

José Luis González Moreno-Navarro

Arquitecto (1973) y doctor en arquitectura, especializado en el conocimiento constructivo-estructural de los edificios históricos. Desde 1992 es catedrático en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya, profesor responsable de la asignatura "Análisis constructivo de edificios históricos", director y profesor del curso de posgrado "Restauración arquitectónica: del análisis constructivo-estructural a las tecnologías de intervención".

Ha sido profesor invitado en las universidades españolas de Alcalá de Henares, La Coruña, Navarra, País Vasco, Valladolid, Politécnica de Madrid, Politécnica de Valencia y en las italianas Università degli Studi di Roma Tre y Università degli Studi di Napoli. También se ha desempeñado como profesor invitado en cursos similares en Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Colegio de Arquitectos de Aragón, Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, Oficina Municipal de Rehabilitación de Santiago de Compostela y la Dirección General de Patrimonio de la Xunta de Galicia.

Como arquitecto especializado ha intervenido en las restauraciones siguientes: Catedral de Pozzuoli (con A. Anselmi y M. Manieri, 2004), iglesia de la Colonia Güell en Santa Coloma de Cervelló (con A. Casals y A. González, 1988-2002), Casa de las Aguas en Barcelona (con V. Argentí y A. Casals, 1987), Casa Llopis en Sitges (con A. Casals, 1985), Pabellón de la Merced del Hospital de Sant Pau de Barcelona (con V. Argentí y A. González, 1981). Como arquitecto especializado ha realizado estudios sobre problemas constructivos y estructurales de: Fábrica Aymerich de Terrassa, Casas de la Caridad y de la Misericordia de Barcelona, iglesia de Sant Jaume ses Oliveres, puentes medievales de Roda de Ter y Puig-Reig, Palacio Maricel de Sitges, castillo de Cubelles, Masía Can Arús del Hospitalet de Llobregat, iglesia de Lloret de Mar, Monasterio de Yuso de San Millán de la Cogolla, Palacio de San Esteban como sede del Gobierno de la Región de Murcia, Casa de los Botines de León, Palacio Güell de Barcelona, Hotel Rosaleda (Andorra), Basílica de los Desamparados de Valencia, Monasterio de Poblet, Seminario Diocesano de La Seu d'Urgell y Catedral de Mallorca. Entre sus publicaciones más destacadas se cuentan numerosos artículos en revistas especializadas y ponencias en eventos internacionales, además de tres libros de alto reconocimiento: *El legado oculto de Vitruvio* (1993), *Claves de la construcción arquitectónica* (1997) y *Gaudí y la razón constructiva* (2002).

Desde el siglo XVIII y hasta muy entrada la edad republicana, ya en el siglo XX, prosperó en el territorio de lo que hoy es Colombia la tradición mediterránea de construir puentes de arco de ladrillo como respuesta a la tarea de vadear un río o salvar un abismo: solo en la región del alto Cauca (que comprende los actuales departamentos de Valle y Cauca) se construyeron al menos 34 de ellos, de características geométricas diversas y dimensiones singulares, siguiendo las pautas relacionadas con la preparación de los materiales de construcción (ladrillos y morteros), la fabricación de encofrados, el tendido de las roscas, el dimensionados de los pilares y, en general, todas aquellas relativas a la conformación de estructuras conservadas durante décadas a pesar de las difíciles condiciones del entorno natural y social, y de la fuerte e intensa actividad sísmica de los suelos sobre los que están fundados.

Este libro recoge los resultados de un trabajo de investigación que se ha ocupado durante los últimos años del inventario y valoración de ese conjunto de puentes construidos, desarrollando una metodología que combina la pesquisa histórico-documental, el análisis estructural a través de programas informáticos y la evaluación de las propiedades físico-químicas de sus materiales constitutivos más importantes con el fin de demostrar la validez y persistencia de las tradiciones constructivas europeas en nuestro territorio a través de la exhibición de algunos elementos formales característicos y métodos de dimensionamiento geométrico de sus componentes estructurales, las características propias de la construcción en concordancia con las condiciones locales —especialmente referidas a materiales y prácticas artesanales—, y la forma en que la aplicación de una metodología combinada se articula hoy en beneficio de la comprensión integral del edificio.



9 789587 101964



Puentes de arco de ladrillo en la región del alto Cauca-Colombia

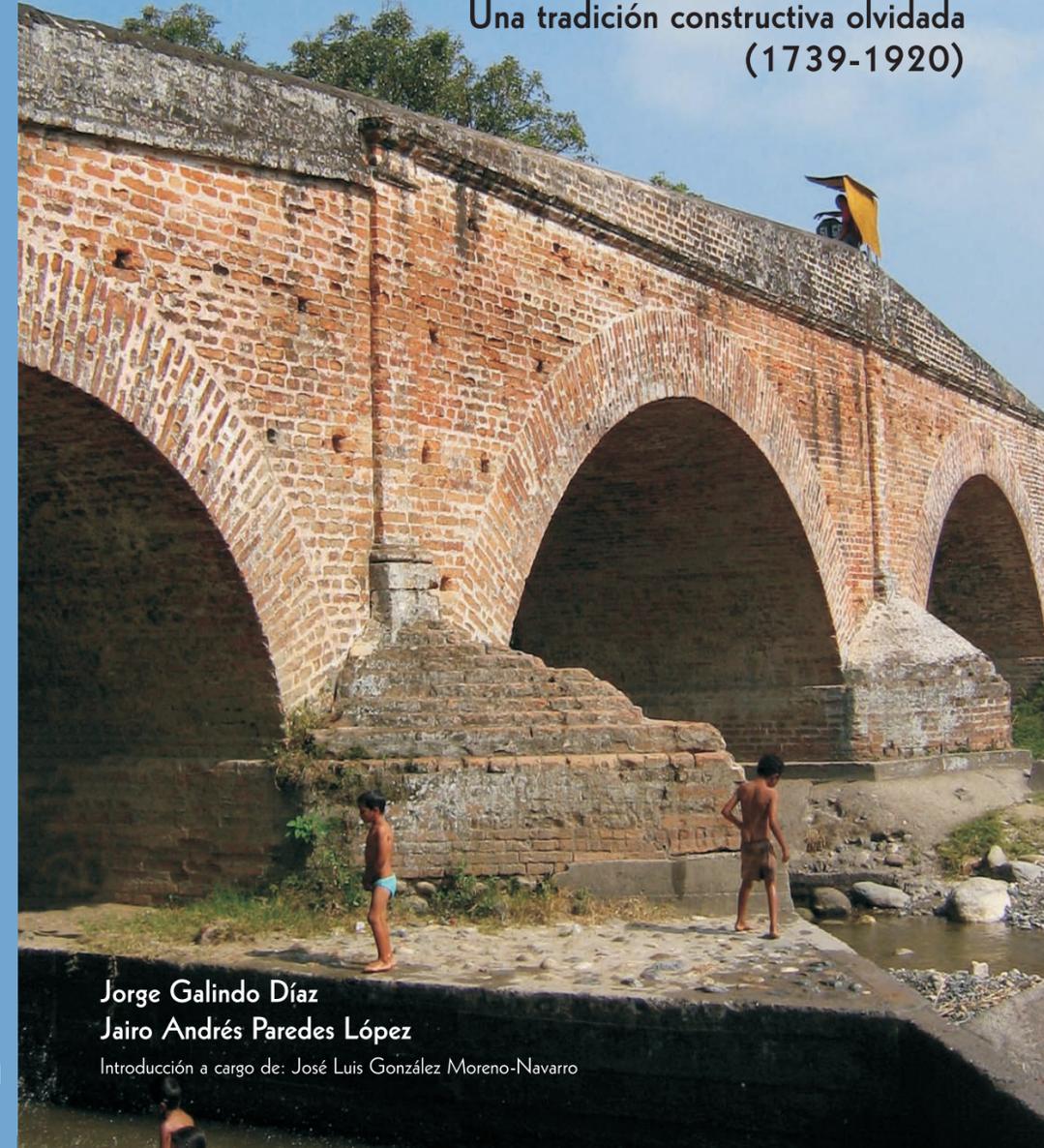
Jorge Galindo Díaz
Jairo Andrés Paredes López



Puentes de ARCO DE LADRILLO

en la región del alto Cauca-Colombia

Una tradición constructiva olvidada
(1739-1920)



Jorge Galindo Díaz
Jairo Andrés Paredes López

Introducción a cargo de: José Luis González Moreno-Navarro

Jorge Galindo Díaz

Arquitecto de la Universidad del Valle (1990), entidad a la que estuvo vinculado como docente hasta febrero de 2000. Desde entonces es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, con dedicación exclusiva. Obtuvo el título de doctor en arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona-UPC (1996).

Ha escrito más de 18 artículos en revistas colombianas y extranjeras relacionados con la historia de la construcción, la técnica y la industria, temas que también le han llevado a ser ponente en eventos nacionales (Bogotá, Cali, Barranquilla, Medellín, Pasto) e internacionales (Roma, Barcelona, Pamplona, Oxford, Valencia, Toulouse, Puebla y Belo Horizonte). Entre sus libros publicados se cuentan *El conocimiento constructivo de los ingenieros militares del siglo XVIII* (2000), *Historia de la teoría de la arquitectura* (2001), *Arquitectura, industria y ciudad en el Valle del Cauca* (2002) y *Cruzando el Cauca. Pasos y puentes sobre el río Cauca en los departamentos de Cauca, Valle y Caldas* (2004).

Jairo Andrés Paredes López

Ingeniero civil de la Universidad del Cauca, en Popayán (1997), magíster en ingeniería civil de la Universidad de los Andes (1999). Fue pasante durante cuatro meses para trabajar en el tema de elementos finitos en la Universidad de Castilla La Mancha, en Albacete (España).

Actualmente es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, donde ha ocupado el cargo de director de Departamento de Ingeniería Civil, coordinador académico de Ingeniería Civil y Coordinador Académico de la Especialización de Vías y Transporte. Ha sido profesor invitado en la Especialización de Estructuras en la Universidad del Norte, en Barranquilla, y profesor invitado en la Especialización de Geotecnia en la Universidad de Caldas, en Manizales.

A partir de 2008 cursa estudios de doctorado en la Universidad Politécnica de Catalunya (Barcelona).



Puentes de
ARCO DE LADRILLO
en la región del alto Cauca, Colombia
Una tradición constructiva olvidada
(1739-1920)

JORGE GALINDO DÍAZ
JAIRO ANDRÉS PAREDES LÓPEZ

Puentes de
ARCO DE LADRILLO
en la región del alto Cauca, Colombia
Una tradición constructiva olvidada
(1739-1920)

Introducción a cargo de José Luis González Moreno-Navarro

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Galindo Díaz, Jorge Alberto, 1966-

Puentes de arco de ladrillo en la región del alto Cauca, Colombia : una tradición constructiva olvidada : 1739-1920 / Jorge Galindo Díaz, Jairo Andrés Paredes López. – Manizales : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2008

290 p.

ISBN : 978-9581-701-964-3

1. Construcción de puentes – Historia – Alto Cauca (Región)- Colombia 2. Diseño de estructura – Historia - Alto Cauca (Región)- Colombia 3. Arquitectura colombiana – I. Paredes López, Jairo Andrés, 1974-

CDD-21 624.63 / 2008

Puentes de
ARCO DE LADRILLO
en la región del alto Cauca, Colombia

Una tradición constructiva olvidada
(1739-1920)

© Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura

© Jorge Galindo Díaz
Jairo Andrés Paredes López

Coordinación de la publicación
Adriana Lucía Correa Salazar

Revisión de estilo
Germán Villamizar

ISBN: 978-958-701-964-3

Diagramación
Olga Lucía Cardozo

Diseño de carátula
Ángela Pílon Herrera

Foto de carátula
Puente de Güengüé, en la vía entre Miranda y Corinto (Cauca), por Edwin Sotelo Zúñiga (2007).

Preparación editorial e impresión
Universidad Nacional de Colombia
UNIBIBLOS
Luis Ignacio Aguilar Zambrano, Director
dirunibblo_bog@unal.edu.co

Primera edición, 2008
Bogotá, D.C., Colombia

Agradecimientos

El libro que el lector tiene en sus manos es el producto de un trabajo de investigación que nació en las aulas de clase de la Universidad del Valle a finales de 1999, orientado a reconocer algunos de los puentes de arcos de fábrica de ladrillo que –olvidados unos y abandonados otros– se conservan todavía en muchos de los caminos y carreteras de la región geográfica del alto Cauca. Varios alumnos de la Escuela de Arquitectura de entonces (y hoy en día arquitectos en ejercicio todos ellos) se volvieron cómplices de ese trabajo y elaboraron, con mi coordinación, un primer inventario que sirvió como documento revelador, por una parte, de la riqueza del patrimonio técnico que florecía en la región y, por otra, de la enorme dificultad de encontrar fuentes documentales que ayudasen a su comprensión. De ese grupo de estudiantes no puedo dejar de mencionar a Paola Gómez, Andrés Castrillón, Cristina Montenegro y Olga Cecilia Eusse, especialmente.

Cinco años más tarde, ya en la sede Manizales de la Universidad Nacional de Colombia, fue posible contar con la plena financiación de un primer proyecto mucho más extenso y ambicioso formulado para la Dirección de Investigaciones (DIMA). Gracias a esos recursos se vincularon en calidad de auxiliares de investigación los estudiantes John Carlos Guzmán y Marisol Caicedo, a los que se sumaron posteriormente Edwin Sotelo y Dianne Valencia, dispuestos a colaborar en la sistematización de la información recogida a través de muy diversas fuentes para producir documentos que ayudasen a la organización de los resultados de esa primera fase de investigación consagrada a recuperar la génesis de más de 20 puentes de arco de ladrillo en la región del alto Cauca, a efectuar sus levantamientos planimétricos y a comprender los principios de su comportamiento mecánico.

Importantes fueron también para la formulación teórica de esta investigación dos pasantías en universidades españolas: la primera, en el otoño de 2003, que facilitó la búsqueda y consulta de tratados de arquitectura e ingeniería de los siglos XVIII y XIX en el Fondo Histórico de Ciencia y Tecnología de la Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona a cargo de Guillermo Lusa y Montserrat Ramon, la cual fue posible gracias a una beca posdoctoral concedida por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI). La segunda, en el invierno de 2005, en el Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Salamanca, gracias a la acogida del profesor Miguel Angel Quintanilla y la plena financiación de la vicerrectoría de la sede Manizales en cabeza del profesor Jorge Eduardo Hurtado.

A mediados de 2006, un segundo proyecto de investigación, continuación del anterior y aún en curso, contó con la valiosa colaboración del profesor Jairo Andrés Paredes López en calidad de coinvestigador, a cuyo entusiasmo y dedicación se debe el desarrollo de muy buena parte de los estudios técnicos y de ingeniería desarrollados sobre algunos de los puentes estudiados. Con su coordinación y con el apoyo del estudiante de maestría en ingeniería Diego Fernando Mora, varios estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la sede Manizales se vincularon a las tareas de análisis numérico, todavía hoy en etapa de maduración.

No puedo dejar de resaltar la enorme colaboración brindada por el personal vinculado a bibliotecas y centros de documentación en Cali, Bogotá y Popayán, en especial a Claudia Villegas Yepes, coordinadora de Asuntos Culturales del Banco de la República en Manizales, quien durante estos últimos años, junto a todo su equipo de colaboradores ha estado atenta a la consecución de material documental (libros, planos y *microfilms*) sin el cual seguramente habríamos tardado mucho más tiempo en presentar nuestros resultados de investigación.

A todos ellos, muchas gracias por la colaboración prestada durante estos años. También, por supuesto, a José Luis González Moreno-Navarro, catedrático de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, maestro y amigo, quien generosamente ha compartido conmigo desde los años de mi tesis doctoral, con su dirección, una particular e interesante visión en torno a la arquitectura y la construcción, en especial la del siglo XVIII, punto de partida de nuestro patrimonio y pensamiento técnico, el mismo que hizo posible la construcción del conjunto de obras que se han de reseñar en este libro.

Jorge Galindo Díaz

Contenido

PRESENTACIÓN

Objeto de la investigación	12
El ámbito geográfico	14
La documentación	18
Plan de la obra	20

Introducción

DEL MÉTODO CIENTÍFICO APLICADO AL CONOCIMIENTO DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS

Por José Luis González Moreno-Navarro

Las preguntas básicas	24
El método científico: análisis desmitificador	30
Los límites y peligros del método científico aplicados a nuestro caso	38

Capítulo 1

ANTES QUE EL PUENTE, FUE EL CAMINO

Las rutas del proceso de poblamiento en el alto Cauca	49
Caminos en los comienzos de la República	67
Rutas y caminos en el Estado Soberano del Cauca	73

Capítulo 2

POPAYÁN, CUNA DE LA TRADICIÓN

Los primeros puentes de arco en Popayán	95
Empresarios, ingenieros y artesanos	107
Tiempos de renovación	137

Capítulo 3

CÓMO EDIFICAR UN PUENTE DE ARCO

Elección del sitio y cimentación	157
La forma y el tamaño de las pilas y los arcos	171
Los encofrados	185
Los rellenos y las calzadas	192
Organización de las obras	199
El fin de la tradición	207

Capítulo 4

CÓMO SE COMPORTAN LOS PUENTES DE ARCO

De las patologías más comunes en los puentes de albañilería	221
De las propiedades de los materiales constitutivos	228
Caracterización estructural de un puente de arco usando MEF	252

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	269
-------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	277
--------------	-----

Presentación

La historia de la construcción es una asignatura pendiente en las escuelas de arquitectura e ingeniería, y tal condición se hace mucho más sentida si ella intenta ser capaz de comprometer ejemplos y referencias de nuestro propio e inmediato entorno. Este parece un tema del que se cuenta con unos pocos datos fijos e inamovibles sobre los cuales no es necesario volver la mirada y mucho menos convertir en objeto de discusión. Sin embargo hoy, en un mundo que exige cada día más la interdisciplinariedad, surgen nuevas preguntas acerca de la condición material de nuestros edificios históricos a la vez que se desarrollan nuevos métodos de validación, nuevas formas de pesquisa y por qué no, nuevos valores en torno a la técnica, revaluada ya en su sentido más positivista.

Es necesario reconocer además que la historia de la construcción se inscribe en la disciplina más general de la historia de la técnica, cargando en ocasiones con sus mismos lastres y limitaciones, unas veces concebida como legitimadora del imperativo tecnológico consagrada a describir de manera lineal una sucesión de artefactos en la que unos reemplazan y mejoran a los otros en aras del ideal del progreso, y otras más recientes, entendida como un resultado de complejos procesos de construcción social¹. En nuestro trabajo, ha sido guía permanente el enfoque sistémico desarrollado por Quintanilla (2002 y 2005), que obliga a incluir en el análisis de una técnica particular no solo elementos cognitivos o económicos, sino también sociales, organizativos y culturales. Enriquecedor ha sido adoptar como premisa conceptual la idea de *cultura tecnológica*, entendida como *la información representacional, práctica o valorativa* que comparten los miembros de un grupo social y que son relevantes

¹ La literatura en torno al tema es particularmente abundante. Por ahora, basta mencionar a Gille (1999), Smith & Marx (1987), Bijker *et al.* (1987) y Sanmartín *et al.* (1992).

en la creación, producción, posesión o utilización de sistemas técnicos². Así, esos mismos *sistemas técnicos* se asumen en realidad como *sistemas híbridos sociotécnicos*, poblados de objetos, conocimientos, creencias, reglas, valores, preferencias y pautas de comportamiento, entre otros muchos ingredientes.

La historia de la técnica, en nuestro caso la historia de la construcción, enfrenta el reto de comprender la manera en que los rasgos característicos de una sociedad particular se relacionan con las líneas de desarrollo que ha sido capaz de asumir. Ella se convierte en una *historia heterogénea* que involucra edificios como artefactos; tecnologías específicas de base científica o artesanal como información representacional; hábitos y reglas de comportamiento racional como información práctica; criterios de utilidad, bienestar o riesgo como información valorativa y, por supuesto, maestros de obras, arquitectos e ingenieros como agentes humanos portadores y artífices de esa misma cultura.

Objeto de la investigación

Los objetos de nuestra historia no son otros que los que conforman un numeroso conjunto de puentes de arcos de ladrillo construidos entre 1739 y los primeros años del siglo XX (alrededor de 1920) en el territorio geográfico del alto Cauca, que comprende el valle del río del mismo nombre y que se describirá más adelante. Se trata, en su mayoría, de construcciones *colectivas*, es decir, cuya autoría no puede adjudicársele a una persona en particular, sino a un grupo de maestros de obra, artesanos, ingenieros prácticos o seudoarquitectos que durante casi dos siglos asumieron la compleja tarea de dotar a la región de un sistema de infraestructura que permitiese la comunicación de sus pueblos entre sí y de estos con el resto del territorio.

El primero de estos puentes se construyó sobre el río Molino, en el camino de Popayán hacia Cali tomando la ruta del norte. Era un pequeño puente de arco único con calzada de doble pendiente. Desapareció en la primera mitad del siglo XX por falta de mantenimiento y una fuerte crecida del río. Dado su valor en la memoria histórica de los habitantes de la ciudad, el puente fue reconstruido por el ingeniero Edgar Simmonds en 1945.

Es probable que la construcción del modesto puente sobre el río Molino, también llamado Puente Chiquito, sirviera para dar confianza a promotores y artesanos, quienes años después, en 1768, asumieron la tarea

2 Quintanilla, M. A. (2005). En preparación.

de construir otro, esta vez sobre el río Cauca, cuyo fuerte caudal causaba destrozos sobre cualquier estructura de madera que intentase salvar su curso. No era pues una obra fácil de ejecutar, por lo que se demandó la ayuda de la persona más versada en matemáticas y geometría que vivía en la ciudad: fray Simón Schenherr, quien elaboró, a pedido del cabildo, dos proyectos fechados en 1753, ninguno de los cuales se llevaría a cabo. Las dificultades económicas que experimentó la Colonia y la aguda crisis en las finanzas locales desatada durante los primeros años de la República fueron sin duda factores que aplazaron la construcción de nuevos puentes en la región y en la casi totalidad de lo que hoy es Colombia. Solo a partir de 1845, cuando se construyó en Cali el puente Ortiz, se reinició un proceso orientado a dotar a las ciudades caucanas de una infraestructura capaz de unir físicamente los centros de producción agropecuaria y minera (Timbío, Caloto, Llanogrande, Cali, Tuluá) con las más importantes plazas comerciales (Popayán, Buga y Cartago). Los puentes dejarán entonces de ser anécdotas edificadas sobre el territorio o producto de simples iniciativas locales y pasarán a ser piezas clave en la difícil misión de completar un sistema de caminos apto para la movilización de pasajeros a lomo de caballos o en carros tirados por bestias.

Desde entonces florecieron sobre el territorio del alto Cauca importantes puentes, algunos de compleja manufactura, como el llamado puente del Humilladero, también en Popayán y también sobre el río Molino, a un costado del viejo y pequeño puente del siglo XVIII. Diseñado por el ingeniero polaco Estanislao Zawadski y construido bajo la dirección del sacerdote italiano Serafín Barbetti entre 1868 y 1873, sirvió de escuela para numerosos maestros de obras, carpinteros, albañiles y ayudantes que participaron en la intensa actividad constructora que se desató por la región. El mismo Barbetti, en compañía de Facundo Nannetti, dirigió la construcción de sendos puentes sobre los ríos Juanambú (1874), Cauca en el camino de La Plata (1875) y Ovejas (1877-78). Luego de su consagración al frente del puente del Humilladero (de 7 arcos de ladrillo), asumió los trabajos de construcción de puentes sobre los ríos Palo (¿1878?) y Amaime (1878).

Para el último cuarto del siglo XIX, se encontrarán, ya en pie, puentes de arco de ladrillo en la población de Timbío (1875), sobre la quebrada La Victoria (1876), sobre el río Cofre (1889), sobre el río Pescador (1891), sobre la quebrada Popurrinas (1893), sobre el río Piendamó (1892) y sobre el río Güengüé (1897), entre otros.

Sin embargo, no se trataba de una práctica constructiva sin raíces. Los puentes de arco, también llamados puentes de bóvedas, formaban parte de una tradición milenaria bien conocida y desarrollada ya en la

Roma antigua, donde es posible que existieran reglas muy precisas para su construcción, incluso de carácter numérico³. Esta hipótesis es fácilmente aceptada por la enorme cantidad de obras construidas en tiempos del imperio, cuando se resolvían complejas estructuras a partir de mecanismos de arcos, bóvedas y cúpulas. Tan importante era entonces la construcción de puentes que la actividad estuvo a cargo de una institución específica: el *Collegium Pontifices*, el cual llegó a controlar la construcción de carreteras y puentes en los territorios bajo su dominio de manera que los conocimientos y habilidades necesarios para tal fin se extendieron rápidamente por la totalidad de la cuenca del Mediterráneo, muy especialmente hasta los pueblos ibéricos.

En el Renacimiento, los puentes fueron entendidos como estructuras de carácter ingenieril que integraban los preceptos vitruvianos de *firmitas*, *utilitas* y *venustas* con la necesaria definición estructural de la obra misma⁴. De todas maneras, esta situación no fue impedimento para que el tema siguiera estando en la lista de preocupaciones de arquitectos, ingenieros y prácticos, como lo comprueban muchos de los tratados y obras manuscritas que consagran páginas enteras a los asuntos propios de la construcción de las cimentaciones de los puentes, del encofrado de las bóvedas, de la albañilería de los tímpanos, de la ejecución de los relleños o de la simple modelación de las calzadas. Gracias a su papel como difusores de saberes, tales documentos, sumados a la presencia física de personas instruidas y entrenadas en las prácticas propias de la ejecución de las obras, constituyeron un cordón umbilical grueso y sano entre esa historia, que era parte de la vieja Europa, y el mundo nuevo que pretendía establecerse en América⁵.

El ámbito geográfico

El río Cauca, conocido inicialmente por los conquistadores españoles como río de Santa Marta, tomó su nombre de los indios de Mompo, que así lo llamaban⁶. Es uno de los más extensos que recorre el territorio colombiano a través de algunas de las zonas de mayor desarrollo, hoy y desde la Colonia, cuando la explotación minera y agrícola de las provincias de Antioquia y Cauca impulsaron su uso como vía fluvial para el

3 Heyman (2001).

4 Silviero *et al.* (1995).

5 Acerca del papel de los tratados de arquitectura e ingeniería como instrumentos de transmisión técnica entre Europa y América, puede consultarse a Galindo (2000) y Gutiérrez (1972), principalmente.

6 Cieza (1971: 131).

comercio del oro y los alimentos que abastecían los distritos mineros⁷. La consolidación del río como canal o como punto de cruce en la red de vías de los sistemas de transporte y comunicación ha sido un proceso continuo, cuyos primeros antecedentes están en las limitadas relaciones de intercambio de las culturas prehispánicas que se asentaban en las regiones que él atraviesa y en las expediciones de reconocimiento realizadas durante la conquista de sus diferentes regiones.

El río hace su recorrido a lo largo de un valle interandino formado entre las cordilleras Central y Occidental, atravesando actualmente 183 municipios de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Antioquia, Sucre y Bolívar. A lo largo del trayecto se pueden diferenciar tres zonas⁸: la primera corresponde al alto Cauca, conformada por dos regiones, una empieza con el nacimiento del río en la laguna del Buey, planicie de Paletará a 3.000 msnm, en el Macizo Colombiano, cerca al páramo de Sotará⁹ y termina en los municipios de Santander de Quilichao y Buenos Aires en el Departamento del Cauca; la otra va desde este punto hasta La Virginia (Risaralda) a una altura promedio de 1.000 msnm. En este sector –caracterizado porque se amplía el cauce del río y la parte plana que lo bordea logra una amplitud media de 10 kilómetros¹⁰– se conforma la región del valle del alto Cauca¹¹. Después de esta empieza la zona conocida como Cauca medio, donde el río se interna en las abruptas tierras de los departamentos de Risaralda, Caldas y Antioquia en las que los flancos de las cordilleras se enfrentan para formar un cañón¹². Finalmente se encuentra el bajo Cauca a la altura del municipio de Tarazá, en Antioquia, donde *empieza a abrirse un nuevo valle que se ensancha hasta confundirse con las planicies costeras del Caribe*¹³. Frente a Pinillos, en el departamento de Bolívar, el Cauca se une al río Magdalena¹⁴, en bocas de Guamal 320 kilómetros antes de que este último desemboque en el mar Caribe. Hasta este punto el río alcanza una longitud de 1.350 kilómetros y la hoya hidrográfica un área de 63.300 kilómetros cuadrados¹⁵.

7 West (1952).

8 Ramírez (2002).

9 Banderas (1943: 421).

10 Vásquez (1996).

11 OSSO (2002).

12 IGAC (1980).

13 *Ibid.*, 496.

14 Las condiciones cenagosas de la depresión momposina, área donde se encuentra el brazo de Loba, no permiten determinar con precisión cual de los dos ríos es el que desemboca en el otro. El criterio que se tiene para considerar al Cauca tributario del Magdalena es la diferencia de caudal; el del Cauca es menor. Ver Suárez (2003).

15 IGAC (1996).

La región del valle del alto Cauca está situada a una altura promedio de 1.000 msnm. Sus puntos extremos en el sur son el municipio de Santander de Quilichao y el corregimiento de Timba, en Jamundí (Valle del Cauca); en el norte, los ríos La Vieja y Cañaveral en Cartago y Ansermanuevo, respectivamente. Esta zona se caracteriza por ser una llanura amplia en la que el río corre cerca de la cordillera Occidental, fenómeno que se explica por el mayor aporte de sedimentos provenientes de la cordillera Central, los cuales forman abanicos largos y de poca pendiente que presionan el río hacia el oeste. Entre los atributos más sobresalientes de esta región están la fertilidad y riqueza de los suelos; la disponibilidad de materias primas; el clima, determinado por temperaturas relativamente altas y uniformes durante todo el año¹⁶; y las condiciones favorables que ofrece la planicie y el río para el desarrollo de diversos medios de transporte y comunicación¹⁷. Estas características particulares de la región la han convertido en una de las más explotadas del suroccidente colombiano¹⁸. Las obras realizadas para regular el cauce del río y lograr mayor capacidad energética han facilitado el fortalecimiento de la agricultura intensiva y el surgimiento de varias industrias en los diversos municipios¹⁹.

El poblamiento en esta zona es constante en ambas márgenes del río, dada la regularidad con la que se encuentran cabeceras municipales a lo largo del recorrido. Sobresale un eje de centros urbanos conformado desde el costado oriental por los municipios de Palmira, Buga, Tuluá y Cartago, rematado por Cali en el extremo suroccidental del área. En el sistema urbano de la región se concentra, con Cali a la cabeza, la mayor parte de la producción, bien sea para el consumo propio y de las poblaciones periféricas o para su distribución en tres direcciones predominantes: el sur del país, el interior y el puerto de Buenaventura.

Teniendo en cuenta la distribución de los centros poblados en el interior de la región y los puntos de enlace con otras zonas, se puede anotar que el sistema de transporte se ha estructurado en dos sentidos: el primero es paralelo al río y se ha desarrollado en ambas márgenes desde

16 Ramírez (2002).

17 Esta, junto con el bajo Cauca, es una de las partes del trayecto del río donde se presentan condiciones favorables para la navegación, las cuales están dadas, principalmente, por la profundidad del cauce y por los pocos rápidos que se encuentran en el recorrido entre Timba (Valle del Cauca) y La Virginia (Risaralda).

18 Vásquez (1996).

19 La distribución general de industrias en los municipios del Valle del Cauca es la siguiente: cementos, llantas y productos químicos en la zona de Cali y Yumbo. En la zona de Palmira, conformada por los municipios de Candelaria, Cerrito, Florida y Palmira, predomina la agroindustria del azúcar. Buga, Tuluá, Bugalagrande y Zarzal se especializan en alimentos de diferentes tipos; Cartago, en los parafinados. IGAC (1980).

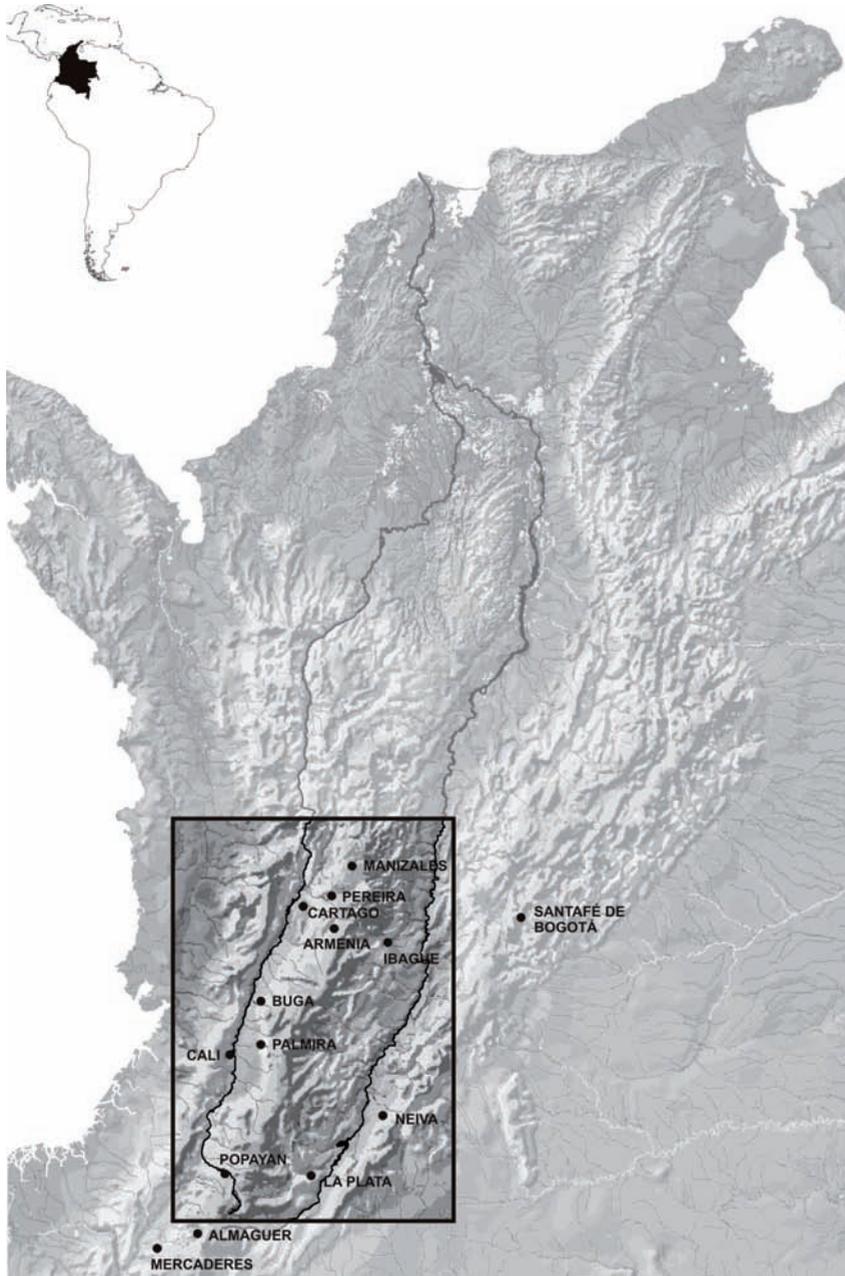


Figura 0.1 Mapa de la región del alto Cauca
Fuente: Grupo de investigación, a partir de material cartográfico:
OSSO (2002), IGAC (1980, 1996) y CVC (1983).

el extremo sur hasta el norte. El segundo es perpendicular y requiere elementos de conexión que relacionan una y otra orilla en sitios específicos. Los elementos que conforman esta red de comunicaciones terrestres, y en algunos casos fluviales, en los sentidos presentados, se encuentran a una altura casi constante que fluctúa entre 915 y 1.250 msnm. Esta característica en la ubicación de los elementos permite desplazamientos predominantemente horizontales a lo largo de una planicie y a través de un canal de agua. En el sistema de transportes del valle del alto Cauca, aun con las periódicas inundaciones que presentaba el río, esto se ha manifestado con una relativa estabilidad en el trazado de las diversas vías y elementos de conexión por los que se ha circulado en esta zona y en los diversos periodos que van desde la Conquista hasta los primeros años del siglo XX²⁰.

La documentación

Para realizar este trabajo se utilizaron varias fuentes documentales. Ante todo, el edificio mismo. Es un hecho aceptado que la condición primigenia de los edificios históricos, y más si de lo que se trata es de un edificio monumental, es la de *documento memoria de la historia y de la cultura del pasado, ya sea este pasado o presente*²¹; además, cuenta con la capacidad de suministrar, mediante el análisis de su materialidad, datos relativos a las técnicas constructivas, sistemas productivos, cuerpos de conocimientos y sobre la historia misma de la región y del país. Es lo que A. González (1999) denomina *doble condición documental*: testimonial e informativa.

A partir del conjunto de puentes aún en pie ha sido posible, mediante tareas de levantamiento planimétrico, obtener información relativa a las características geométricas y dimensionales que, puestas en conjunto, dan cabida a una primera *lectura* de los edificios. Además de la evidente belleza funcional que brindaba su contemplación, quedaron en evidencia elementos propios de la belleza formal y espacial que también poseen, expresada en la disposición de sus materiales constructivos, en la racionalidad técnica que representan e incluso en valores de tipo ornamental que algunos todavía ostentan.

Esta labor se complementó con la búsqueda de documentos escritos. Para ello se acudió a los archivos públicos, poseedores –en ocasiones sin saberlo– de numerosos textos, impresos y manuscritos, relativos al trazado de los caminos y las tareas propias de la construcción de puentes y

20 Melo (1995).

21 González, A. (1999).

otras obras de infraestructura. Particularmente importante fue el Fondo del Ministerio de Obras Públicas del Archivo General de la Nación, en Bogotá, que aún conserva valiosa correspondencia de las últimas décadas del siglo XIX, así como memorias e informes de reparación de muchos de los puentes estudiados, que se efectuaron en el transcurso de su vida útil. Valor especial adquirió la colección del *Registro Oficial del Cauca*²², y estudiada con rigor la impresa entre 1874 y 1904, en la cual fueron quedando constancia de las expresiones de necesidad que manifestaban las comunidades en torno a la construcción de un puente o una vía, los pliegos de licitación o condiciones de privilegio, los contratos de obra y, sobre todo, las actas de entrega de las mismas, en las que acostumbraba hacerse un recuento, a veces detallado, de su génesis y sus expectativas.

También fueron de utilidad textos manuscritos conservados en el Archivo Histórico de la Universidad del Cauca, en Popayán, en los que se consultaron, entre otros temas, los únicos dos planos originales que se guardan de los puentes históricos objeto de nuestra búsqueda.

Se debe recalcar que ambos tipos de documentos –los edificados y los escritos– son complementarios. Ninguno, por sí mismo, puede llegar a ser suficiente.

Una vez se pudo contar con una crónica de los artefactos, de los hechos que los hicieron posibles y de sus actores y protagonistas, fue necesario profundizar en la historia de las particularidades puramente técnicas. De nuevo hubo que acudir al edificio para obtener de él información relativa a sus materiales: mediante extracción de algunas muestras de ladrillos y morteros, haciendo uso de excavaciones simples de poca profundidad, y con la ayuda de equipos de laboratorio, fue posible conocer los valores más representativos de sus propiedades mecánicas y sus características fisicoquímicas, lo cual aportó pistas en torno a los procesos de producción de esos mismos materiales, sus fuentes de materias primas y sus temperaturas de quemado, por ejemplo. Ante la inexistencia de fuentes impresas que dieran cuenta detallada de los procesos de puesta en obra, se apeló a los tratados de arquitectura como documentos útiles para obtener datos relativos a ellos, a las prácticas y los saberes²³. El sano ejercicio de comprobación acerca de cómo la palabra escrita, transmitida durante siglos a través de autores italianos, franceses y españoles, se hacía materia viva en el rincón del mundo que durante el periodo cronológico

22 Órgano oficial del Estado Soberano del Cauca en que se consignaba la contratación, ejecución y entrega de las obras públicas y otros asuntos de gobierno.

23 González, J. L. (1996).

de estudio era el alto Cauca, ha sido sin duda uno de los más interesantes en esta aventura de la investigación en su conjunto.

Finalmente es preciso decir que el análisis estructural también ha permitido hacer una lectura del hecho constructivo, tal vez más íntima y desprovista de cargas afectivas, pero importante en tanto que revela condiciones propias de su estado de equilibrio y de la manera en que la disposición geométrica obtenida a través de una adecuada disposición de sus materiales hace realidad el edificio, además de estable y duradero.

Plan de la obra

Este libro recoge los resultados parciales de un trabajo extenso que ha contado con la valiosa colaboración de muchas personas, en varios momentos con profesiones e intereses distintos. Cuando se dice que son *resultados parciales* es porque, aunque los temas se han desarrollado con integridad, siempre quedan abiertos los espacios para la revisión historiográfica y metodológica, mucho más si se tiene en cuenta que aún son muchos los folios sin leer que albergan nuestros archivos y quizá, porque no, muchos los puentes de albañilería sin conocer²⁴.

Es posible que para algunas personas sea un sacrilegio afirmar que el *método científico* es una herramienta válida en la historia de la técnica y más específicamente en la historia de la construcción. Sin embargo, de la manera en que lo expone a lo largo de la Introducción José Luis González Moreno-Navarro, catedrático de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, es posible entender el *método científico* como un común denominador metodológico capaz de facilitar la interrelación y la intercomunicación de miradas convergentes y profesiones afines pero no idénticas, tan necesarias en las empresas multidisciplinares. A través de preguntas básicas que exigen la sistematización de sus respuestas, se establece un punto de partida para quienes indagan por la naturaleza integral del edificio histórico y patrimonial. Desmitificado el método, es posible

24 Cuando este libro estaba prácticamente en imprenta fue posible conocer dos maravillosos puentes localizados sobre el río Juanambú en el departamento de Nariño y apreciar las imponentes ruinas del mítico puente sobre el mismo río, obra de Serafín Barbetti. Fue un hecho repetitivo que en el desarrollo del trabajo de campo, cuando nos dirigíamos a ver un puente, surgían uno o dos más, lo que finalmente nos permitió abarcar un conjunto significativo. Aún falta por conocer el puente sobre el río Mayo en inmediaciones de la población de San Pablo, también en el departamento de Nariño, y a pesar de varios intentos nunca ha sido posible visitar el puente de ladrillo llamado *del Alto Piendamó*, sobre el río del mismo nombre, que casi devorado por la selva tropical húmeda del Cauca, aún subsiste en un paraje de difícil acceso.

su aplicación al caso que nos ocupa, advirtiendo también de sus límites y peligros.

Los capítulos uno y dos, redactados enteramente por Jorge Galindo, reconstruyen históricamente y a partir de fuentes primarias las condiciones propias y comunes a los puentes objeto de estudio. Se trata de *su contexto*. Este aspecto no podía dejar pasar por alto ni las condiciones del territorio, ni la dinámica de los caminos, ni las políticas públicas que los fomentaron y mucho menos la reseña de las personas que de una u otra manera dieron vida a esas estructuras, intentando explicar por ejemplo cómo se dio inicio a esta práctica constructiva aparentemente desligada de todo contenido simbólico, de qué manera influyó el entorno social para su adopción, con la presencia de qué actores se dio inicio a su construcción y cuál era su *utillaje mental*, cuál fue su legado sobre otras prácticas constructivas. A fin de ser más precisos, el tercer capítulo particulariza, con las lecciones de algunos de los tratados clásicos como referencia, en las operaciones prácticas, las dificultades operativas y las herramientas conceptuales que dieron cuerpo y vida a la tradición.

Finalmente fue necesario desarrollar lo que el mismo José Luis González exigió en su pregunta acerca de las estructuras históricas: *¿cómo se comportan?* Hubo entonces que valorar el estado de conservación de algunos de los puentes a través de diagnosis de patologías por métodos de inspección visual y luego se procedió a la simulación del comportamiento mecánico de uno de ellos a manera de prototipo mediante el uso de programas informáticos de nueva generación. Tarea simultánea fue indagar por la naturaleza de los materiales constitutivos de los puentes de arco: del ladrillo y el mortero de cal componentes de la obra de albañilería y de una mezcla de tierra natural y escorias de ladrillo y piedra de canto, empleada en la elaboración de los rellenos. De estos temas se ocupa el capítulo cuarto, redactado a dos manos entre Jorge Galindo y Jairo Andrés Paredes López, alimentado por las tareas cumplidas por un equipo amplio de colaboradores que se reseña al final de este libro, luego de abordar las conclusiones.

Queda siempre la duda sobre cuánto hay que conocer. Nunca, lo descubierto parecerá suficiente. De cualquier manera, se ha puesto aquí todo el empeño por entregar la mirada más completa posible sobre un conjunto de puentes que son parte de nuestra historia.



INTRODUCCIÓN

Del método científico aplicado al conocimiento de los edificios históricos

Por José Luis González Moreno-Navarro

Si intentamos condensar en pocas palabras el problema que nos plantea un edificio, podemos responder de manera relativamente sencilla. Si nuestra preocupación se centra en los aspectos de identificación de los materiales, comprensión de las causas de sus patologías, definición del modelo representativo de su comportamiento estructural, en realidad nos formulamos las dos preguntas siguientes: cómo es y cómo se comportará. Ambas serán válidas en cualquier caso en el que nos encontremos con un edificio de cualquier tipo.

Si además el edificio es un monumento, hay que tener en cuenta dos aspectos que dejan por fuera las preguntas anteriores, las cuales se deben plantear de otra manera. En relación con el significado, es preciso responder a la cuestión lógica ¿qué significa este edificio en el contexto cultural en el que está situado?, ¿qué papel juega en la memoria de la gente?, o de manera más comprometida, ¿cumple algún papel como signo de la identidad de ese contexto cultural? Todos sabemos que nuestro presente es consecuencia de nuestro pasado. Todo, cómo es, como se comporta y qué significado tiene, es fruto de su historia. Es imposible intentar responder alguno de esos interrogantes si no comprendemos la historia de ese monumento. Esta historia la conoceremos, en parte, con preguntas similares a las anteriores, adaptadas al tiempo pasado: ¿cómo llegó a ser?, es decir,

¿cómo se construyó?, ¿cómo se ha comportado durante los años o siglos precedentes?, y, ¿qué significados ha tenido a lo largo de todos esos años? Estas preguntas pueden ser diferentes en cada etapa de la historia.

Existe una relación de coincidencia entre las preguntas cómo se comporta y qué significa, formuladas tanto en tiempo presente como en pasado, que se han de responder después de haber respondido a la de cómo es. Lo que ambas están intentando averiguar es la relación del objeto con su contexto, con lo que le rodea. Este contexto se puede definir a partir de dos grandes apartados: el contexto humano o cultural y el contexto físico o natural, que no son excluyentes entre sí ya que el comportamiento físico requiere como vara de medir las personas y su cultura. Estos dos contextos son diferentes, pero totalmente interrelacionados.

Las preguntas básicas

Cómo es

El cómo es¹ puede responderse definiendo dos aspectos que se convierten en tres:

1. La forma, entendida como todo aquello que es susceptible de ser expresado gráficamente o a través de cualquier medio de transmisión visual, como una fotografía o un dibujo.
2. La materia, que se debe descomponer en dos niveles: los materiales (piedra, madera, ladrillo o mortero, que en la construcción tradicional habitualmente está en relación dialéctica de acuerdo con su forma).
3. La estructura que relaciona entre sí todos los materiales, entendida en el sentido más amplio de la palabra, en el más prístino y original: el sistema de relaciones entre todos los elementos, sus materiales y su forma que, por supuesto, engloba la estructura que actúa contra los embates gravitatorios u horizontales, es decir, la estructura portante, pero sin agotarse en ella. La estructura global relaciona todo con todo; y como no existe una palabra que la defina, podemos utilizar *estructura constructiva*.

Quede dicho que forma, materiales y estructura constructiva constituyen una realidad indisoluble que solo se descompone en estos tres niveles como medio de análisis. La realidad es única y continua.

1 En este punto el autor adopta los principios que guían las respuestas a estas preguntas en su asignatura de Construcción I en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (González, Casals & Falcones, 1997) y, por supuesto, en su propia actividad profesional.

Cómo se comporta

Si buscamos el cómo se comporta, es imprescindible establecer la vara de medir cultural ya que al edificio no se le pide un comportamiento abstracto, sino el cumplimiento de los fines para los cuales se ha construido: cualquier actividad humana, cualquier artefacto humano, lo justifican sus fines. Para esto utilizaremos de nuevo los principios básicos según los cuales se organiza la asignatura de Construcción en la Escuela de Arquitectura en Barcelona². Aquí entramos ya en el campo genérico de la arquitectura, en el que se contestan las preguntas qué esperan las personas de los edificios y para qué los construyen.

Existen cuatro principios básicos; tres entendidos como finalidades y uno como condición. La primera finalidad básica es la *utilidad*, que responde a lo que se entiende comúnmente por esta expresión. La segunda es la *integridad*, sobre la cual es necesario hacer algunas aclaraciones: entendemos aquí por integridad la cualidad de los edificios que nos garantiza que se mantienen, ellos y sus usuarios, íntegros, es decir sin variaciones notables en su estado inicial, sin rupturas, sin pérdidas durante un tiempo dilatado. La integridad se logra mediante la prevención de las acciones que pueden afectarlas, como la gravedad, los vientos, los terremotos, el fuego y el paso del tiempo. La tercera finalidad está relacionada con el *significado*: los edificios envuelven de manera tan intensa y extensa la vida humana que ineludiblemente están sometidos a los requerimientos estéticos, simbólicos y comunicativos de la naturaleza de los hombres. El cuarto principio es la condición de la adecuación a los recursos disponibles, es decir, la *economía de la producción*.

La idea de integridad tiene antecedentes bastante clásicos, concretamente en la *firmitas*. De hecho estamos ante una nueva tríada vitruviana, pero bien diferente de la que la historia nos ha legado. Sobre ello el autor de estas páginas ha escrito mucho en los últimos años³ y no se insistirá ahora en el tema.

Cuánto hay que conocer

El arquitecto conoce las leyes que rigen la relación entre el cómo es y el cómo se comporta, con relación a los medios físico y cultural, porque eso se enseña en las escuelas de arquitectura. Pero se enseña solo para

2 *Ibid.* Su estructura y contenidos han servido de modelo para otros numerosos cursos en diversas universidades de habla hispana, entre ellas *Tecnología I*, que se imparte en la Escuela de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, a cargo de Jorge Galindo Díaz. Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4020001/index.html>

3 González, J. L. (1993).

proyectar un edificio, es decir, para imaginarlo, y luego, a través de la fase productiva, concretarlo en un hecho real. Sin embargo, estamos frente a una situación muy diferente. El edificio existe, el edificio se construyó muchísimo antes de que existieran los valores culturales y de conocimiento actuales, de manera que nuestro grado de desconocimiento sobre el edificio que tenemos delante es elevadísimo; no conocemos casi nada de él, solo un poco más de lo que podemos advertir superficialmente en su forma visible.

Partiendo de este desconocimiento, es preciso determinar no solo *qué hay que saber sino hasta qué punto hay que llegar* en nuestras investigaciones. No podemos investigar todo de todo. Es preciso dar una orientación en alguna dirección a las pesquisas y la primera aproximación ha de venir de quien nos encarga el trabajo mediante una indicación de lo que, en primera instancia, se espera del edificio. Se trata de determinar qué se va a exigir al edificio como consecuencia de su restauración (si es que ella se va a hacer) porque, en definitiva, nos permitirá plantear la pregunta clave inicial: ¿sirve este edificio para tal fin? A partir de esta se inician las investigaciones.

La experiencia muestra que en muchas ocasiones no se tienen esas respuestas hasta que se han hecho los estudios previos, de manera que estaríamos en un círculo sin salida. Pero son respuestas imprescindibles ya que el mismo principio de economía nos dice que no podemos ensayar todo de todo y que el único modo de decidir qué preguntas o respuestas hay que encontrar es partiendo de la determinación de lo que se pretende del edificio. Se puede proponer como un buen método establecer diferentes hipótesis de restauración posible. No obstante, no se ha de dejar de lado la posibilidad de que alguna administración lúcida, adoptando una postura cercana a la promoción pública del conocimiento científico puro, considere que se han de aprovechar los estudios de los edificios para incrementar lo que sabemos de ellos en general o de las técnicas que utilizamos para ello, aunque ese conocimiento no sea útil en ese momento concreto⁴. En cualquier caso, el principio de economía también exige definir con claridad los objetivos y la estrategia para conseguirlos.

Relacionando los apartados anteriores podemos hacer un esbozo del problema que tenemos planteado en cuanto al conocimiento, y de los procedimientos para alcanzarlo. Ahora bien, podemos dar un paso más y organizar los procedimientos de manera más sistemática a partir de las preguntas planteadas.

4 Esta es una de las mayores virtudes de la investigación científica promovida desde las universidades públicas; justamente lo que ocurre en este libro.

Sistematización de las respuestas

Si la pregunta es ¿cómo es?, hemos de utilizar tres técnicas:

1. Definición de la forma, lo que denominamos *il rilievo*.
2. Identificación de los materiales a través de las técnicas, probablemente las más elaboradas de todas, de identificación de los materiales que nos suministran los geólogos, los químicos, los físicos, los botánicos y los ingenieros.
3. Descripción de la estructura constructiva, que no es más que la combinación de los dos puntos anteriores: la forma entendida como todo aquello que se puede dibujar, concretada en los materiales de que está hecha, llegando al más mínimo detalle de las estructuras más ocultas, las entregas de las vigas a los muros, cómo están resueltos los dinteles, etc. Habitualmente no son evidentes; a veces es necesario hacer catas algo traumáticas y repicar ciertos revestimientos para ver la estructura constructiva.

Pasamos al punto siguiente: ¿cómo se comporta? Con relación a la utilidad o la integridad, hemos de considerar las técnicas de análisis del comportamiento y la vara de medir mencionada, que incluirá también los deseos expresados sobre el edificio objeto de nuestra investigación. Si nos mantenemos en el nivel de los materiales, los profesionales de lo macro o lo micro nos dan los esquemas de comportamiento de multitud de materiales, lo que probablemente es hoy uno de los campos de conocimiento más desarrollados en el mundo de la restauración. Sin embargo, siempre aparecen dudas cuando hay signos de alteración o signos de que ese comportamiento no ha sido el adecuado, el que inicialmente se previó, es decir, en definitiva, cuando hay aquello que entendemos todos por patologías: si los materiales se han degradado, si aparecen rupturas de la continuidad de la fábrica en forma de fisuras, grietas, movimientos, deformaciones; si se han producido fallos en la deseada integridad. El problema de conocimiento es diferente de los anteriores, ya que no se trata de identificar algo que tenemos adelante, sino de establecer claramente una relación causa-efecto.

Desde el punto de vista de la utilidad, el planteamiento ha de ser diferente. Sin duda coincidimos con nuestros antepasados históricos en desear que los edificios duren. Y coincidimos con ellos en que una grieta es inadmisibles. Sin embargo, esta coincidencia no se presenta en cuanto a la utilidad. Nuestros antepasados no tenían el problema energético; no existía ningún requerimiento ecológico; iban más abrigados o sus vecinos

no hacían el ruido que pueden hacer los nuestros; no existían en la calle los artefactos motorizados.

De manera que en cuanto a utilidad, es preciso relativizar nuestros deseos. En parte ocurre lo mismo con relación a la integridad: no podemos exigir lo mismo a una albañilería antigua que a una albañilería moderna respecto a seguridad estructural. En general, no hay que olvidar que cuando se interviene en un edificio, este pasa a estar sometido al cumplimiento de las exigencias de la normativa en vigor. Esto causa múltiples dificultades. No cabe duda de que la principal causa de patologías en un edificio, podemos decir de una manera irónica, es la normativa actual, sobre todo la referente a los aspectos de estabilidad general. Es un hecho comprobado en muchas ocasiones que los edificios del pasado no cumplen las normativas de estabilidad de muros en cuanto a cargas gravitatorias y sísmicas. Esta situación ha desatado desde hace bastantes años una polémica no resuelta en algunos países europeos; esperamos que aquí la provoque también alguna vez, quizá como consecuencias de la aparición de las últimas normativas sísmicas.

La previsión del comportamiento

Mediante todos estos procedimientos podemos contestar a cómo es, cómo se comporta; y si tenemos suerte en la documentación disponible, podemos decir cómo *ha ido siendo*, o sea, cómo llegó a ser y cómo se comportó y qué significó. Además, si tenemos sensibilidad e intuición podemos saber qué significa hoy. No hay que olvidar que ese conocimiento lo necesitamos para contestar a la pregunta clave: ¿cómo se comportará?, es decir, cómo se comportará durante nuestra intervención.

Este es el núcleo del problema: prever las interrelaciones entre el objeto que existe y las diferentes alternativas para intervenir en él, y cómo podemos garantizar en cada una de ellas la consecución de los objetivos que nos hemos planteado en la restauración. Y esto ocurre en todos los niveles de análisis: en el cómo es y en qué lo vamos a convertir; cómo se comporta y cómo se comportará después de la reconversión con relación al doble contexto, al cultural y al físico, y a sus interrelaciones; cómo se comportará, por ejemplo, ante un previsible terremoto o qué nuevo significado podrá tener con relación al contexto cultural.

Esta reflexión tiene una conclusión importante respecto a los instrumentos de conocimiento que utilicemos: los más eficaces serán aquellos que, además de responder a las preguntas del cómo es y el cómo se comporta, pueden darnos indicaciones del cómo se comportará (el cómo será lo debemos decidir nosotros con el proyecto). En este sentido, si ha-

blamos de modelo estructural, serán superiores aquellos procedimientos que nos permitan simular comportamientos. En este campo entra con toda su fuerza la supercomputación, que como muy bien lo ha comentado J. Wagensberg, director del Museo de la Ciencia de Barcelona, *ha hecho cambiar el método científico, ya que permite algo que era imposible antes: simular.*

Queda por establecer el método mediante el cual podemos simular las reacciones ante los nuevos significados propuestos al contexto cultural; de momento no existe ninguna herramienta (evidentemente, no la supercomputación) que nos permita prever esas nuevas reacciones. Probablemente seguirán siendo nuestra intuición y nuestro arrojo los que nos permitirán tomar decisiones al respecto.

La historia

Si el ámbito de la pregunta es el mismo, pero en el pasado, el papel de los historiadores pasa a ser determinante. Cuando utilizamos los procedimientos de la historia, no hacemos más que responder a las preguntas establecidas con relación al comportamiento y al significado. Es decir, cómo se ha comportado a lo largo de los últimos años y qué significado ha tenido en su contexto.

Todas las investigaciones están interrelacionadas. El problema planteado en una investigación (a eso se dedicará el apartado siguiente) es el contraste de las hipótesis establecidas; la experiencia muestra que ese contraste puede provenir de cualquiera de las investigaciones. Los modelos estructurales necesitan el contraste del estudio histórico. Existen defensores de que sólo el estudio histórico profundo nos permite entender el modelo de comportamiento mecánico, que todos los procedimientos actuales (métodos numéricos, etc.) son erróneos y que el único verdadero es el conocimiento histórico. No se trata de defender esta postura, sino de poner un ejemplo en el que es patente que todo está relacionado con todo. Así volvemos a una afirmación anterior: los estudios previos son estudios pluridisciplinarios para añadir ahora que requieren interrelacionarse como garantía de su eficacia.

No se gana mucho situando disciplinas diferentes en relación de simultaneidad o de contigüidad, sino se intercomunican entre sí. La experiencia muestra que esto no es fácil.

Una necesidad: la intercomunicación

Existen dificultades elementales, como la falta de unificación en la terminología utilizada. Sin ir más lejos, los términos *pared* o *tabique* pue-

den tener muy diferentes significados según la especialidad de quien los utilice. Pero si esto fuera el único nivel, con un diccionario bien organizado sería muy fácil de resolver. El problema es más grave y parece estar en los orígenes y las formaciones diferentes, es decir, en las mentalidades y, especialmente, en las metodologías diferentes. ¿Qué es razonable proponer para superar esas dificultades? Este es el punto clave de esta Introducción. La pregunta ha de ser: ¿es posible que exista un método común que facilite la interrelación, la intercomunicación? Aún más, ¿es necesario que exista ese método común?

En vista de todo lo anterior parece razonable decir que no es solo necesario, sino también imprescindible. Aunque es excesivo pedir el método común, podemos encontrar un común denominador metodológico y, si existe, potenciarlo. Esta Introducción se basa en que esa respuesta es que sí, que sí existe ese común denominador, el cual no puede ser otro que el único método que permite elaborar el conocimiento: el *método científico*.

Antes de entrar en su aplicación en nuestro campo, es preciso recordar las características especiales del método y superar algunos de los errores más comunes. Alcanzado este punto, podemos ir al final de la Introducción en el que se destacarán las limitaciones, incluso los peligros, frente a las indiscutibles potencialidades del método científico aplicado a nuestro caso.

El método científico: análisis desmitificador

El objetivo de este apartado es doble: por un lado, recordar la esencia básica del método científico; por el otro, desmitificarlo, desacralizarlo, sin reducir ni un ápice su incontenible potencia, es decir, dejarlo en su sitio, ni más ni menos, lo cual se logra con la correcta explicación de lo que es.

En la línea de dejar las cosas en su sitio, es magnífica la visión que aportan Sokal y Bricmont (1999: 68): *... el método científico no es radicalmente distinto de la actitud racional en la vida corriente o en otros ámbitos del conocimiento humano. Los historiadores, detectives y los fontaneros –de hecho todos los seres humanos– utilizan los mismos medios básicos de inducción, deducción y de evaluación de los datos que los físicos o los bioquímicos.*

El autor que explica con lenguaje más claro y en detalle el método científico es Mario Bunge, quien en una de sus obras (1988) expone con gran poder de síntesis la esencia del método científico y lo reduce a cinco fases fundamentales. Después de la primera lectura de los cinco puntos, veremos su concreción en los diferentes campos del conocimiento propios de los estudios previos de la restauración arquitectónica.

Los cinco puntos

El primer punto señalado por Bunge es el *planteamiento del problema* o la elaboración de las preguntas. Puede tener alguno o todos de estos aspectos: el reconocimiento de los hechos, el descubrimiento del problema y la formulación del mismo. Se trata del planteamiento de preguntas que tienen probabilidad de ser correctas; de la reducción del problema a su núcleo significativo, probablemente soluble y probablemente fructífero con la ayuda del conocimiento disponible. Esto quizá es lo más fácil de todo. Ya lo he expresado en otros textos anteriores y lo repito aquí: el método científico es ante todo el arte de hacer preguntas correctas. No hay nada peor que intentar responder a una pregunta errónea.

Al punto dos, Bunge lo denomina *construcción de un modelo teórico*. Yo lo expreso como *elaboración de posibles respuestas* o *formulación de hipótesis*. Podemos encontrar las siguientes fases: la selección de los factores pertinentes o la invención de las hipótesis centrales y de las suposiciones auxiliares, siempre que sea posible la traducción matemática.

Aunque el primer punto es el más difícil, en el segundo reside la clave del éxito. Por muy bien que se formulen las preguntas, si no sabemos elaborar diferentes respuestas razonables, no podemos seguir. De hecho los cinco puntos son imprescindibles; sin embargo, el más *arriesgado* –podríamos decir–, el *menos reglamentado*, el *menos científico*, el más intuitivo en definitiva es el punto dos. La palabra *intuición* está escogida correctamente. La clave del punto dos es la intuición, la cual es la clave del éxito o del fracaso, como veremos en el punto siguiente. Bunge tiene otro libro cuyo título nos indica el contenido: *Intuición y razón* (1986), en el que precisamente destaca el papel definitivo que puede, no que debe o que tiene siempre, sino que *puede* tener la intuición.

El punto tres es la deducción de consecuencias particulares; dicho de otra forma, la elaboración de predicciones detectables o medibles, consecuencias de las hipótesis, pero teniendo en cuenta las técnicas de verificación y medida disponibles. No tiene sentido valorar algo que después no se puede medir. En general, estas pruebas pueden clasificarse en dos grandes grupos:

1. Las que analizan las discrepancias entre lo previsto a través de las hipótesis y lo que después, en la cuarta fase, podemos observar, es decir, discrepancias entre lo previsto y lo observado.
2. Las de experimentación, que someten el objeto de estudio a estímulos controlados. Los procedimientos básicos del método científico son dos: la observación y la experimentación. Se trata de establecer qué consecuencias medibles, observables o experimentables tienen las hipótesis establecidas.

En el punto cuatro se realizan las pruebas, aunque antes hay que diferenciarlo del punto anterior puesto que se parecen. El punto tres se puede deducir en un despacho, en nuestra casa durmiendo o viajando en autobús. Por el contrario, el cuatro es la realización de esas pruebas en el edificio objeto de estudio o en el laboratorio, dependiendo del tipo que sean. Bunge lo describe en las siguientes fases: *ejecución de la prueba, realización de las operaciones y recolección de datos, elaboración de datos* y, por último, *inferencia de la conclusión*, es decir, interpretación de los datos elaborados a la luz del modelo teórico. Este es otro de los puntos clave (de hecho al final lo son todos), ya que la infinidad de procedimientos nos suministran resultados cuya interpretación es cada vez más compleja. Es decisivo el saber interpretar correctamente el resultado de las pruebas.

El punto quinto es definitivo: introducción de las conclusiones en la teoría, es decir, la comparación de las conclusiones con las predicciones, contraste de los resultados de las pruebas con las consecuencias del modelo teórico, precisando en qué medida, este puede considerarse conformado o no. Si es así, hay que pasar al reajuste del modelo, basado en una eventual corrección o reemplazo, y reiniciar el proceso. Es importante destacar que el método científico no es más que esto, pero tampoco menos: el planteamiento del problema y la formulación de respuestas al problema, que solo quedan corroboradas como auténticas (a la espera de que otro las conteste mejor) si se desarrollan con éxito los tres puntos siguientes.

Es común en el mundo de la arquitectura, dado el carácter no cuantificable de sus aspectos ligados a la expresión artística, que domine el principio de autoridad, el cual corrobora la veracidad de un aserto según sea el prestigio del que lo hace. No es un error exclusivo de los arquitectos; los más avanzados científicos también caen en él. Sin embargo, lo que caracteriza a los arquitectos es la inconsciencia con que lo hacen. La *autoridad* se basa en que nadie, ni el que emite la afirmación ni los creyentes que la consideran una verdad, sigue aplicando los puntos tercero y siguientes, y se queda en las hipótesis, sancionadas solo por ser quién es el que las emite.

Pero no hemos de pensar que el método científico excluye la intuición y la capacidad creativa en cuanto a generación de hipótesis. Lo que lo diferencia del principio de autoridad es el procedimiento riguroso y casi humilde a través del cual esas hipótesis han de quedar contrastadas con los tres puntos que les siguen.

Aplicación a nuestro caso

Si hacemos una primera aplicación a nuestros campos de estudio, podemos decir que en el campo histórico se establecen hipótesis sobre sucesos del pasado. El contraste de las mismas no deja de ser problemático. La experimentación lógicamente está excluida de raíz y el único procedimiento es discrepar entre lo predicho con relación al pasado y lo que podemos observar por los indicios que suministren los diferentes estudios. Aquí aparece la clave comentada acerca de la interrelación de las investigaciones. Una hipótesis arqueológica puede quedar corroborada a través de una investigación de la historia de la construcción, o viceversa.

Si el análisis es sobre el comportamiento de los materiales, es evidente que existe una serie de conocimientos acumulados de tal nivel que en pocos casos quedarán problemas sin resolver. La identificación de los materiales casi se convierte en una operación de deducción. Pasamos del conocimiento genérico, que se puede formular de modo simplificado diciendo: *las piedras calizas de determinada cantera tienen esta composición*, a definir todas sus características hasta los niveles más microscópicos. Si yo tengo una piedra que responde a todas ellas, es razonable afirmar por deducción que mi piedra es de aquella cantera. Así ocurre con el resto de procedimientos de identificación, tanto de ladrillos como de piedras o morteros.

En el ámbito de las patologías del material surgen siempre las mayores dificultades. En libros especializados existen casos muy bien explicados sobre la dificultad de encontrar el origen de unas humedades o la causa de unas fisuras o patologías de la continuidad de las fábricas existentes. En cualquiera de estos casos, el primer punto se concentra en la recolección de todo lo conocido sobre la cuestión y su aplicación a nuestro problema, de manera que realmente podamos, como dice Bunge, llegar a una formulación del problema mínima o concreta.

Veamos ahora en más detalle temas específicos de nuestro campo, agrupados según los cinco puntos señalados.

Formular preguntas

Recordemos que la primera fase es el planteamiento correcto del problema y que puede formularse a partir de los dos sencillos enunciados siguientes: qué tenemos, y qué se quiere conseguir de ello.

Primero es preciso establecer una aproximación al objeto de estudio, sin hipótesis por comprobar, tomando simplemente el máximo número de datos que objetivamente podamos, utilizando métodos relativamente sencillos que nos den idea de la forma general del edificio y de todos sus

elementos y una catalogación de sus materiales. En esta primera aproximación se debe desarrollar el levantamiento y la catalogación, en el caso de que sean visibles, de todos los indicadores de las posibles alteraciones del estado inicial, tanto de la forma (desplomes, giros, fisuras, grietas, etc.) como del material (meteorizaciones, pudriciones, etc.), lo que habitualmente se denomina, con palabra algo impropia pero ya inevitable, *patologías*. No se debe olvidar que muchas de las alteraciones no son visibles. Como después se verá, estos indicadores tienen un papel decisivo en el contraste de las hipótesis, por lo que su conocimiento exhaustivo siempre es imprescindible, aunque no inicialmente, sino cuando ya existe un criterio de búsqueda intencionada. Con todo ello habremos respondido a la primera pregunta: ¿qué tenemos?

La segunda respuesta, como se ha dicho antes, la mayoría de las veces ha de venir dada por el que encarga el trabajo. Si suponemos que están resueltas las dos preguntas (qué tenemos, qué queremos conseguir de ello), tendremos el planteamiento correcto del problema, que no es otra cosa que saber si sirve lo que tenemos para lo que se espera de este. Puede ser que la respuesta sea rápida e inmediata o que se obtengan contestaciones parciales, es decir, no del todo, falla en algo, etc. De todas maneras no es conveniente adelantar conclusiones hasta haber desarrollado sistemáticamente las cinco fases, aunque sea con brevedad.

En este momento es importante la descomposición del edificio en diferentes niveles, porque en ellos vamos encontrando las maneras correctas de resolver las preguntas. Si, por ejemplo, la pregunta es si el edificio cumple la nueva normativa sísmica, estamos hablando principalmente del nivel de la totalidad del edificio, que también ha de alcanzar a cuestiones de otras escalas, como la determinación relativa de los diferentes módulos de elasticidad o de valores absolutos de la resistencia a cortante de la fábrica. Por el contrario, si las cuestiones estructurales no generan ninguna pregunta importante, pero se tiene constancia de una degradación de los materiales, que ponen en duda su durabilidad, daremos importancia definitiva a este nivel de análisis y no haremos ninguna consideración sobre el nivel global. De esta manera podremos determinar con claridad cuáles son los niveles de escala en los que debemos movernos y con todo ello habremos conseguido plantear correctamente el conjunto de factores que constituyen el problema.

Antes de pasar a exponer la fase siguiente, no es ocioso recordar que se ha de evitar la confusión entre *fin*es y *medios*. Estamos inmersos en una cultura de desarrollo espectacular de procedimientos de una brillantez casi cegadora. No nos dejemos deslumbrar. Hemos de destacar como prioritaria la definición de objetivos y no debemos dejarnos llevar por esa

brillantez, tanto en nuestra técnica de investigación previa como después en la intervención.

Imaginar respuestas

Un modelo se puede entender como un conjunto de hipótesis contrastables para cada una de las escalas en las que hemos planteado las preguntas. Si la pregunta se hace sobre la capacidad del entrepiso de madera para resistir un cambio de uso de privado a público, el modelo va a ser relativamente sencillo ya que serán suficientes las fórmulas que determinan la flecha a partir de la carga repartida que todos conocemos, pero requerirá una respuesta garantizada sobre los valores probables del módulo de elasticidad de la madera, lo cual ya no es tan inmediato. Si esta pregunta se hace sobre paredes de ladrillo muy esbeltas, los modelos ya no están tan claros. Si la escala de percepción es la del material, los modelos serán sobre su constitución fisicoquímica. Si el nivel es de todo el edificio para conocer, por ejemplo, su respuesta sísmica, el modelo será bastante más complejo y debemos recurrir a procedimientos informáticos de tipo elementos finitos o sus derivados. Puede ocurrir que sea necesario el conocimiento de todos los niveles; en ese caso deberemos establecer un modelo en todos los niveles cuya unión nos suministre el modelo global del edificio. En algún caso especial cabe utilizar los clásicos modelos de la estática gráfica, que explican el comportamiento hipotético de los arcos.

Cuando existen indicadores de alteración (patologías visibles), las hipótesis han de intentar encontrar la relación causa-efecto, es decir, los factores iniciales de aquellas y los mecanismos según los cuales se han desarrollado. Esto se hace con la intención de anular o contrarrestar el proceso de deterioro.

El problema fundamental de los modelos es la fiabilidad, es decir, la confianza que podemos tener en ellos. En muchos casos en los que no podemos desarrollar las tres fases que siguen, la fiabilidad podrá venir de la comprobación de su eficacia en casos similares al nuestro. De hecho este es el procedimiento habitual en nuestra actividad técnica normal. No estamos poniendo en duda constantemente los modelos matemáticos que predicen el comportamiento mecánico de lo que proyectamos. Pero una cosa es proyectar y otra conocer algo que ya existe, que en la mayoría de los casos, si se aplican aquellos modelos, no cumplen los márgenes de seguridad exigibles precisamente porque son objetos que no se concibieron con nuestros métodos actuales de proyectar. El único procedimiento para incrementar la fiabilidad es continuar con las siguientes fases.

Es conveniente recordar lo ya dicho con relación a las hipótesis: han de ser contrastables, lo cual quiere decir que han de permitir el paso a la tercera y cuarta fases, en las que se desarrollan las pruebas de contraste. En la tercera se determinan las pruebas y en la cuarta se realizan.

Planificar las comprobaciones

Veamos algunos casos de observación: por ejemplo, calcular valores a una variable que después se pueda medir en el sitio. Si se ha establecido un modelo sobre el descenso de cargas, solo será contrastable si, en algún punto accesible de la estructura, se puede determinar cuál es la tensión prevista mediante un procedimiento, también fiable, que pueda medir esa tensión en la cuarta fase. Pero no tiene que ser siempre con valores numéricos. También puede ser el análisis de los signos de alteración que se puedan correlacionar con aquellos valores; es decir, si el modelo nos da tensiones superiores a las de rotura, se podrá contrastar, en parte, su validez mediante la determinación, en esta tercera fase, de los indicadores de alteración correspondientes a esa tensión excesiva que se deberá comprobar en la cuarta fase.

Si estamos hablando de un modelo de elementos finitos que pretende construir una hipótesis sobre el comportamiento frente a un sismo, el contraste es bastante más complejo o incluso imposible. Una posibilidad es fiarse de la bondad del método en sí mismo a partir de lo fiable que es en otros casos. Podemos encontrar métodos de contraste no a partir de la producción de un terremoto, sino de deducción de alteraciones (patologías) posibles introduciendo en el modelo un estímulo conocido en la historia y buscando las alteraciones previstas en el propio edificio. Otro procedimiento combina los dos tipos de pruebas con la inducción de efectos controlables, como las vibraciones que pueden contrastar las predicciones hechas sobre ellas con el modelo.

De todas formas, si un modelo predice el colapso ante acciones gravitatorias y el edificio está en pie, naturalmente no se ha de inferir de inmediato la falsedad del modelo, sino que hemos de verificar el coeficiente de seguridad que hemos aplicado en las predicciones del colapso porque es posible que el modelo exija un coeficiente de seguridad de 2,5 y nuestro edificio esté en 1,05 y no ha colapsado. Si la variable no se puede medir ni contrastar de ninguna manera, habremos quedado en el final de la segunda fase, en la que el modelo solo será fiable por comparación en otro caso similar.

En general, si existen indicadores de alteración (patologías visibles), estos serán al mismo tiempo los que nos habrán sugerido una hipótesis

explicativa en la segunda fase, que a su vez, en esta tercera fase, deberá dar lugar a un cuadro completo de indicadores de alteración teóricos que se deberán contrastar mediante su correlación exhaustiva con los indicadores existentes en la realidad en la cuarta fase.

Veamos ahora las pruebas del segundo tipo, de experimentación, en las que se somete al objeto a estímulos reales controlados. Es preciso distinguir las pruebas según se puedan realizar en el mismo edificio o en un laboratorio. La distinción entre unas y otras pasa por la escala del fenómeno que analizamos. Todos los fenómenos sobre materiales pueden reproducirse, en general, en el laboratorio, pero no el comportamiento del edificio ante un sismo. En el primer caso, la cuestión básica pasa por la certeza de que el fenómeno que se reproduce en el laboratorio es equivalente al que se desarrolla en el edificio. De todas maneras, ante esta palabra todos hemos imaginado el típico local con mesas altas, etc., pero no debemos olvidar que también se debe entender por laboratorio cualquier situación que permite un control razonable de las variables relevantes. Desde este punto de vista no hay que olvidar un aspecto fundamental con relación a los edificios: no hay mejor laboratorio que ellos mismos, ya que al menos los mecanismos de respuesta a los estímulos no están mediatizados por ningún procedimiento de modelización.

Si el edificio es el laboratorio, cabe considerar dos casos con relación a los estímulos. En el primero, producimos los estímulos; por ejemplo, una prueba de carga en los entresijos o las vibraciones antes citadas. En el segundo, se trata de controlar los efectos que producen los estímulos estrictamente naturales durante un periodo relevante con relación a los estímulos a estudiar. Un año, por ejemplo, para medir mediante técnicas de monitoreo los efectos de las variaciones térmicas anuales. Quinientos años para analizar los efectos de la sismicidad en la zona. Evidentemente, no los próximos sino los pasados. Aquí aparece con todo su valor experimental la propia historia del edificio. No hay mejor experimentación posible que la propia observación del comportamiento del edificio a lo largo de los años, y cuanto más años, mejor. Las dificultades provienen de la falta de documentación sistemática de ese comportamiento histórico, aunque sí la tenemos de los estímulos, al menos de los sísmicos, en los archivos de los servicios geológicos.

Pero no todo son ventajas. La prudencia e incluso la humildad son dos virtudes clave para el buen científico.

Los límites y peligros del método científico aplicados a nuestro caso

El objetivo final del método a desarrollar es el conocimiento de la realidad material del edificio. El método debe permitir contestar preguntas del tipo ¿cómo es?, ¿cómo se comporta?, ¿cómo se comportó?, en consecuencia, ¿cómo se comportará previsiblemente? Aunque es preciso aplicar el método científico porque es el único eficaz para alcanzar el grado suficiente de conocimiento, este no es un acto científico puro en sí mismo, ya que su objetivo no es el conocimiento lo más completo posible, sino estrictamente el necesario para ponerlo al servicio de un acto no científico, sino técnico: la restauración del objeto por estudiar.

En la restauración lo que cuenta no es el conocimiento verdadero, sino la garantía de la eficacia. Interesa sobre todo esta última, no la verdad. No interesa el dato exacto, sino el intervalo alrededor de valores característicos que nos garanticen con cierta probabilidad cualquier hecho.

Planteado así, queda patente que estamos ante una manera de actuar o un conjunto de actividades intelectuales para las cuales, en general, no hemos sido formados los arquitectos en particular, ni los técnicos en general. En principio, parece más eficaz la formación de los científicos en este proceso del conocer. Pero, como veremos líneas adelante, dada la especial naturaleza de los objetos por analizar, tampoco el perfil científico usual es totalmente adecuado. Si es cierto todo ello, existe cierta carencia que debe llenarse. En eso estamos.

Este conocimiento, al igual que en cualquier rama del conocimiento científico, nunca puede ser total y absoluto, sino que siempre es parcial y se fundamenta en la elaboración de modelos representativos de la realidad. La eficacia del modelo será mayor o menor en tanto refleje con mayor o menor fidelidad aquellas características relevantes que nos interesan del objeto real. Es decir, el proceso de estudio previo consiste en la creación de un modelo sobre el cual vamos a trabajar, supuesto que refleja con suficiencia para nosotros el objeto real. Es el único método posible, potente en muchos aspectos, aunque no deja de tener muchas limitaciones de diverso tipo. La principal no es consecuencia de la inexactitud de los métodos concretos de análisis, sino de dos cuestiones básicas que se ponen en juego: la esencia del objeto que investigamos y nuestro método cognoscitivo. Veamos en detalle las dos cuestiones y sus caracteres significativos. Primero, el método cognoscitivo.

La mentalidad

El método científico permite elaborar un modelo representativo mediante la comprobación –y reajuste en su caso– de un conjunto de hipótesis, conjeturas o suposiciones que hemos tenido que formular previamente. La economía del proceso exige que, antes de iniciarse la costosa experimentación sistemática, se establezcan esas hipótesis concretas que encaucen ordenadamente en una dirección precisa todas esas actividades. En esa fase previa de formulación de hipótesis, los conocimientos acumulados, la experiencia, la habilidad, la imaginación, en suma, lo que se puede englobar bajo el término intuición del investigador adquiere un valor insustituible. El método científico, antes que nada, es el arte de formular las preguntas que tenemos que contestar.

También la intuición, además de orientar la dirección de las preguntas, reagrupa, reordena y junta los datos obtenidos para dar vida a ese modelo. De hecho los valores analíticos procedentes de ensayos de todo tipo en sí mismos son absolutamente mudos; solo nosotros los encajamos y conseguimos, si somos eficaces, reordenar este rompecabezas misterioso en una unidad superior que es el modelo. Precisamente en esas intuiciones puede fallar más el método. El riesgo viene de pensar en los edificios antiguos con una mentalidad o cultura poco apropiada a ellos. La intuición no es ajena a nuestra mentalidad, entendida esta como conjunto de pautas permanentes de razonamiento. Y nuestra mentalidad es subsidiaria, a su vez, de la cultura del siglo XX, bien diferente de las de los siglos anteriores.

Lógicamente, nos referimos a la cultura constructiva, entendiendo por ella un conjunto de saberes concretos organizados según un conjunto de pautas mentales de razonamiento que pretenden entender la materialidad de la arquitectura, de modo que esta pueda cumplir sus objetivos. La experiencia muestra que, de los dos conjuntos que definen esa cultura, el conjunto de pautas permanentes de razonamiento, lo que se puede entender por mentalidad, es más trascendente que los conocimientos concretos puestos en juego mediante esas pautas. En la gran mayoría de los casos, los fracasos no son producto de errores de conocimiento, sino de criterios erróneos en la aplicación de ese conocimiento. En consecuencia, se trata de averiguar cuáles son los hechos significativos que diferencian nuestra cultura de la que en su tiempo modeló la mayoría de los monumentos.

Si se busca para ello una expresión adecuada la cultura de la fragmentación se puede considerar la mejor. No se va a discutir aquí que la formación del conocimiento pasa por la etapa del análisis, en la que la fragmentación es imprescindible. Pero lo característico, lo que nos dife-

rencia más del pasado es el enorme desarrollo de una fragmentación que conlleva una pérdida de criterios de recomposición de sí misma. Es una cultura de especialistas.

La primera fragmentación, la más trascendente, surge de una vieja tradición académica sobre la que he escrito bastante en los últimos años, que separa la cultura constructiva de la cultura arquitectónica global. La consecuencia es el enfrentamiento entre arte y ciencia o sentimiento y razón que nos envuelve. La tendencia fragmentadora va más allá y llega a descomponer el saber constructivo en ramas tan artificialmente creadas, y a la postre tan alejadas entre sí, como las estructuras, la construcción y el acondicionamiento ambiental. El panorama académico queda esbozado en definitiva si añadimos que, salvo honrosas excepciones, las asignaturas que más podrían contribuir a la comprensión de la cultura del pasado están dominadas por una mentalidad estrictamente figurativa o herméticamente abstracta.

Además, conceptos tan actuales como la industrialización o la aplicación de normas sobre edificios sin construir, la separación entre estructura y cerramientos, entre estabilidad y durabilidad, impiden comprender el comportamiento real de los edificios antiguos. Estos responden a una cultura basada en los oficios artesanales y el sistema de muros de obra de fábrica, en los que son esenciales conceptos tan poco actuales como la traba y el saber hacer de aquellos oficios.

Es razonable, en consecuencia, la hipótesis de que la cultura constructiva actual, dominada por el material más representativo de ella, el hormigón armado, difícilmente es útil para la comprensión de monumentos antiguos. Podemos afirmar que si actuamos en uno de ellos es necesario plantear nuestra mentalidad mediante métodos que nos permitan al menos captar sus aspectos fundamentales, aunque no podamos tener la cultura del pasado.

El objeto

Los edificios son artefactos materiales que han de comportarse adecuadamente para que se pueda usar el espacio que contienen en unas condiciones determinadas de aspecto, ambiente y seguridad durante un lapso lo más largo posible. La clave básica de la comprensión de esos artefactos está en ver que la múltiple relación entre las características formales y materiales del edificio y el comportamiento frente a esa gran variedad de exigencias es *multiescalar*. Es decir, para comprender el comportamiento de un edificio es necesario analizar todas las escalas, en especial sus interrelaciones, desde la que representa al edificio como una unidad global hasta las microscópicas; desde la biología celular hasta la atómica.

Por ejemplo, la durabilidad depende de todas las escalas de percepción: la molecular, en los procesos de meteorización de la piedra; la celular, en los ataques bióticos; la de la fábrica y la del subsistema, en los procesos debidos a movimientos diferenciales; y la del edificio, por ejemplo, en los deterioros debidos a una exclusión defectuosa del agua derivada de una forma general equivocada. En la estabilidad va desde lo molecular o atómico, en todo lo relacionado con la resistencia, hasta el nivel edificio en su globalidad cuando analizamos su respuesta al viento o sobre todo, al sismo, que además depende también de la resistencia.

A ese carácter multiescalar se añade el carácter continuo del comportamiento frente a las diferentes exigencias. De hecho, la separación entre estabilidad y durabilidad expuesta antes es fruto de nuestra manera analítica de acercarnos al objeto, consecuencia del construir actual que organiza también los edificios especializando partes y comportamientos. En realidad, en los edificios antiguos esos dos comportamientos están enormemente interrelacionados entre sí y con el resto de aspectos parciales del comportamiento.

Este doble y simultáneo carácter multiescalar y continuo convierte a los edificios en objetos difíciles de comprender, en general, desde una estricta mentalidad de especialista (volvemos a la mentalidad) que basa su eficacia en el aislamiento de las variables por analizar. La propia escala del edificio, que lo hace difícilmente reproducible en un laboratorio, aumenta las dificultades.

La superación de nuestras limitaciones está en adaptar nuestras pautas de razonamiento, nuestra mentalidad, a la naturaleza histórica y compleja de los edificios del pasado con el fin de que la aplicación del método científico no sea subsidiaria de intuiciones alejadas de esa naturaleza. Para ello se pueden proponer las siguientes reglas, que no se deben olvidar durante el desarrollo de las investigaciones, en especial las que estudian el edificio en su conjunto.

- Dar prioridad a la comprensión del edificio como una unidad. El comportamiento frente a los requerimientos tiene pocos mecanismos especializados y más bien actúan como una unidad global frente a ellos.
- Buscar procedimientos que abarquen todas las variables, todos los objetivos por conseguir y todas las escalas de percepción. La imprescindible descomposición del edificio en partes hasta llegar a los materiales se ha de hacer de manera que lleve en sí misma una recomposición que nos haga ver el edificio como una unidad de comportamiento.
- Suprimir el concepto de estructura, entendida como un subsistema independiente, ya que en la casi totalidad de los casos el mismo edificio es su estructura. En el pasado, la fábrica (no la estructura) debía

ser sólida (no estable ni duradera). Como condición necesaria, es imprescindible suprimir cualquier comparación con una estructura de hormigón armado.

- Para acercarnos más al concepto de *sólida*, es preciso fundir inicialmente los análisis de estabilidad y durabilidad para tener mayor libertad a la hora de reorganizar todos los fenómenos que de manera intrincada y simultánea afectan a ambas nociones en las construcciones del pasado.
- No caer en la simplificación de que la falta de especialidad en los subsistemas comporta menor heterogeneidad, sino que esta también es un rango esencial en la construcción tradicional, a la que se añade mayor discontinuidad. Nunca se construyeron en la historia unidades tan homogéneas y continuas como las estructuras de hormigón armado, continuas física y mecánicamente desde el cimiento hasta la cúspide.

Como conclusión final, siguiendo con el aspecto clave del trabajo multidisciplinar: la comunicación, parece lógico formular la propuesta siguiente: todos los profesionales, además de ser competentes en su área, deben conocer las bases fundamentales, los principios, las manías, los errores comunes de los ámbitos de los profesionales con los cuales trabajan. Nosotros mismos, ¿qué debemos estudiar más? Después de todo lo dicho, hay dos ámbitos clave: la historia como asignatura y la comprensión de los edificios del pasado como unidades constructivas.

CAPÍTULO 1

Antes que el puente, fue el camino

La introducción de animales de tiro y carretas del Viejo Mundo produjo que algunos de los caminos construidos en la era precolombina fueran sencillamente inútiles para los nuevos fines, en tanto que otros debían ser necesariamente modificados: el ancho, la pendiente, la estabilización de los taludes o el paso de los ríos eran temas por reconsiderar en un contexto donde los técnicos cualificados estaban prácticamente ausentes. Quizá por ello en el Nuevo Reino de Granada, desde mediados del siglo XVI, fueron continuas las quejas de los funcionarios españoles acerca de que la colonia estaba aislada en sus comunicaciones por tierra puesto que faltaban caminos en el occidente del territorio, el tránsito entre la costa Caribe y el altiplano cundiboyacene era muy difícil, y hasta en los alrededores de Santafé de Bogotá los caminos eran malos, incluso para el paso de caballos.

Muchas fueron las solicitudes relacionadas con la construcción de caminos y puentes para un sin número de poblaciones colombianas¹: en 1750, por ejemplo, el gobernador Ignacio de Sala reclamaba la necesidad de construir unos puentes en Cartagena de Indias y sus alrededores; en 1763 Salvador de Vargas Pimentel informaba a las autoridades de la necesidad de construir un puente sobre el río Oiba, en el sitio llamado El Bejuco, camino obligado de Girón, San Gil y otras poblaciones a Vélez,

¹ Consultar fondos del Archivo General de la Nación (a partir de ahora AGN), en especial en el Fondo Mejoras Materiales, sección Colonia.

Tunja y Santafé; en 1779 el cabildo de Popayán solicitaba se aprobase el contrato de Francisco Torres para la construcción de un puente de cal y canto sobre el río Cauca; en 1788 el señor José Antonio Serrano Solano proponía la construcción de un puente sobre el río Soatá, en Girón; en 1790 se profirieron autos referentes a la construcción de un puente sobre la quebrada de Ana, en Medellín, a cargo de Joaquín Tirado; en 1797 un tal Nicolás Franco Chacón solicitó licencia para construir un puente sobre el río Suárez en Pare, siete años después de que Manuel Gabino Angulo y Olarte propusiera la construcción de la primera estructura sobre el río Lenguaruco, que comunicase a esta población con la de Santa Ana. Y así hasta completar un extenso recorrido a lo largo y ancho de la geografía durante todo el siglo XVIII.

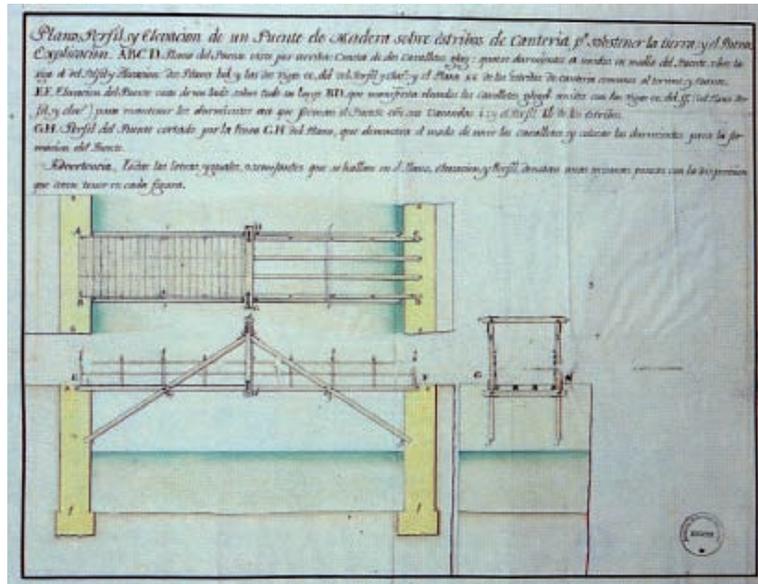


Figura 1.1 Plano y perfil de un puente de madera sobre estribos de cantería para sostener la tierra y el puente sobre el río Gualí, en Honda, año de 1750, por el ingeniero militar Ignacio de Sala. Fuente: AGN, Mapoteca 4, No. 366-A, VC 552.

En casi todos los casos, se pedían estructuras duraderas, bien de madera, ladrillo o piedra, aunque existía plena conciencia de que las primeras eran las más limitadas por la excesiva longitud de las vigas y su escasa capacidad de carga. Ejemplos todavía reconocibles a través de la documentación gráfica existente son el nuevo puente de madera sobre el río Gualí, en Honda, proyectado en 1750 sobre estribos de cantería capaces de sostener su estructura y de soportar los empujes horizontales

del terreno², el puente sobre el río Coello en las montañas del Quindío proyectado por Ignacio Nicolás de Buenaventura para cruzar el río San Juan en 1777³; el del río Guátara cerca a la ciudad de Pasto; el del río La Plata; y el del río Chitagá⁴.

Más apetecidos que los de madera eran los puentes de arcos, que fueron poco a poco poblando los caminos de las más importantes rutas colombianas, aunque fuesen de mayor costo y no siempre infalibles a la fuerza de los ríos. Su construcción requería una estructura provisional o cimbra de madera sobre la cual se iban colocando las roscas de ladrillo y mortero de cal hasta el momento de su cierre, es decir, hasta la colocación de la clave o última dovela centrada en el eje vertical central. La cimbra era entonces innecesaria. Luego de ser retirada, permitía que el arco trabajase por sí solo expandiendo sus empujes hacia las pilas intermedias o los estribos laterales.

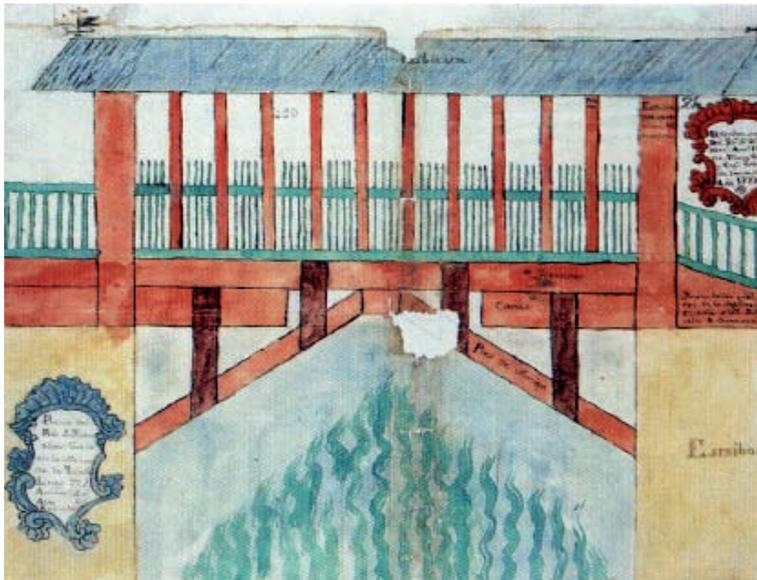


Figura 1.2 Puente sobre el río Coello en la montaña del Quindío, proyectado por Ignacio Nicolás Buenaventura para cruzar el río San Juan en 1777.
Fuente: AGN, Mapoteca 4, No. 96-A, VC.

- 2 AGN: Mapoteca 4, No. 366-A, VC 552. En el siglo XVIII la ciudad de Honda llegó a contar con dos puentes sobre el río Gualí: uno de madera; otro de cantería. Una detallada explicación en torno a ellos y su relación con el desarrollo urbano de la ciudad se encuentra en Guzmán (2002).
- 3 AGN: Mapoteca 4, No. 96-A, VC 563.
- 4 Estos dos últimos reseñados por Patiño (1991: 106-107).

Lamentablemente no se cuenta con descripciones de los procesos constructivos relacionados con estas labores, aunque sí han quedado testimonios de la admiración que causaban en el común de los pobladores. En 1801, por ejemplo, el alcalde de la población caucana de Caloto daba cuenta de la urgente necesidad que había de construir un puente de cal y canto sobre el río Palo en vista de que las estructuras de madera que antes existían no brindaban las condiciones de seguridad suficientes:

Los curas doctriñeros de indios y negros esclavos, se han insignuado conmigo a fin de que informe a V.E. la gran necesidad que hay de que se construya un puente de estribos de cal y canto y maderas dobles en el caudaloso río llamado El Palo que parte por la mitad de la jurisdicción de esta ciudad de San Esteban de Caloto, haciendome ver los peligros en que continuamente se ven quando transitan a la Administración de los Santos Sacramentos a que se allan precisados en virtud de su ministerio y que muchas veces por no exponer sus vidas a tan evidente y manifiesto peligro se les han muerto sin los santos Sacramentos... Este peligro lo he remediado yo construyendo en los años que he sido Alcalde puente de madera y clavazón de fierro, pero como está sugeto a corrupción, quando más subsiste año y medio y volvemos a quedar en la misma necesidad y peligro...⁵

Para entonces ya se habían construido los primeros puentes de arcos en Santafé, la capital del Virreinato, tanto para atravesar los ríos San Francisco o San Agustín, como para dar continuidad a los caminos que comunicaban la ciudad con su entorno próximo. Se terminaron en el siglo XVIII el puente de Aranda (construido en tiempos del virrey Messia de la Zerda sobre terrenos de Juan de Aranda), el puente de Bosa (construido por el albañil Antonio Aillón sobre el río Tunjuelo alrededor de 1713), el puente de Lesmes (sobre el riachuelo de San Agustín y desaparecido en 1814), el llamado Puente grande (levantado en seco a un costado del álveo del río Funza o Bogotá), el puente de San Agustín (construido en la intersección de lo que hoy es la calle 7 con carrera 7 por el licenciado Luis Enríquez), el puente de San Francisco (originalmente edificado de madera y bautizado con el nombre de San Miguel fue reconstruido en 1664 en la intersección de la hoy carrera 7 con Avenida Jiménez), el puente del Común (obra de Domingo Esquiaqui inaugurada en 1792), el puente del

5 AGN: Fondo Documental Mejoras Materiales, sección Colonia, t. I: *Caloto: su alcalde, Nicolás de Vergara Caicedo informa sobre la urgencia de construir un puente de cal y canto sobre el río Palo*, 1801, f. 836.

Arzobispo (construido en 1808), el puente de Madrid (también de Esquiaqui) y el puente del Carmen⁶.

En otras ciudades y provincias del Virreinato se emplearon estructuras de arcos variando la escala y sus características geométricas: el puente de La Carnicería en la ruta que salía de Pasto hacia Popayán fue construido mediante arcos de ladrillo entre 1587 y 1590⁷; el del río Gualí, en Honda, concluido antes de 1757 con dictamen del ingeniero Antonio de Arévalo y Antonio Conning, de la Compañía de Jesús y coautor del puente⁸; el ubicado sobre el río Mayo en Nariño, del cual apenas se tiene noticia⁹; o el de Medellín, levantado inicialmente en 1788 y reparado en 1860¹⁰, son apenas algunos ejemplos ligeramente reseñados por la historiografía. Sin embargo, dos importantes puentes construidos en Popayán se pueden documentar de manera casi completa: el del pequeño puente sobre el río Molino, hoy llamado Puente Chiquito, iniciado hacia 1698 luego de comisionar al capitán Juan Jiménez para tal menester¹¹, y el puente sobre el río Cauca, que por sus particularidades dimensionales y materiales llegaría a ser uno de los mayores retos a la técnica regional.

Antes de entrar en la descripción y el análisis de los puentes de arco más importantes construidos en la región del alto Cauca, pasemos revista a la génesis de sus rutas de poblamiento y a la explicación del porqué de sus caminos.

6 Bateman (s.a.).

7 Ortiz (1948). Para este autor, el primer puente de mampostería en Pasto se construyó por orden del gobernador y capitán de la Gobernación de Popayán don Juan de la Tuesta Salazar; para tal efecto se contrató al maestro Andrés Gómez, a quien se pagó con dinero de las contribuciones de varios ciudadanos.

8 Guzmán (2002: 70).

9 Además del dibujo de Riou incluido en el álbum de André (1884) que se reproduce en la figura 1-3, existe una fotografía del puente sobre el río Mayo en un interesante álbum fotográfico publicado en la Biblioteca Virtual Luis Ángel Arango, sin fecha, pero seguramente de finales del siglo XIX. Disponible en: <http://www.lablaa.org/blaavirtual/historia/mfotosigloxix/LibroFT0013/pagina37.htm>

10 Estos últimos reseñados por Patiño (1991: 107-111).

11 Archivo Histórico del Cauca (a partir de ahora AHC): Cabildo, julio 3 de 1698, t. 5, f. 17. Decisión tomada en sesión del Cabildo de Popayán, fechada el 17 de marzo de 1698.



Figura 1.3 Puente sobre el río Mayo, dibujo de Riou, tomado del álbum de André (1884).
Fuente: Revista Geográfica de Colombia, Bogotá, No. 7, junio de 1939, p. 25.

Las rutas del proceso de poblamiento en el alto Cauca

Escribir la historia de los caminos que surcan la geografía colombiana es una tarea por hacer. Pese a recientes trabajos que aglutinan variadas disciplinas, no es posible encontrar todavía una mirada íntegra a la cronología y los hechos que condicionaron la construcción de la red de caminos, carreteras y obras accesorias en el territorio de lo que hoy es Colombia. Esta historia es además viva y cambiante sobre un suelo en el que los elementos de su compleja geografía –sus cordilleras, ríos, selvas y valles– han constituido desde los comienzos de su ocupación una auténtica barrera al intercambio y la comunicación.

Contrario a afirmaciones comunes que aseguran que los caminos coloniales se levantaron casi en su totalidad sobre rutas prehispánicas, estudios recientes como el de Langebaek (1995) sugieren *que las comunicaciones entre las diferentes subregiones del país antes de la llegada de los españoles tenían poca importancia en la formación de redes amplias de interacción económica* y que si bien existía un conjunto de caminos, muchos de ellos tenían un carácter más ceremonial que práctico sin llegar a formar un verdadero *tejido vial* que intercomunicase las distintas regiones del país con fines de comerciar grandes volúmenes de productos. Se trataba más bien de rutas domésticas *vinculadas con el movimiento de gente de un mismo cacicazgo a través de diferentes ecologías, aprovechando un patrón de poblamiento disperso que les permitía explotar autónomamente un rango de ecologías diversas*¹². Sería pues española la idea de ir construyendo un sistema de vías de comunicación capaz de articular las regiones sirviéndose en algunos casos de las estructuras existentes y, en otros, de las ventajas que la propia naturaleza les brindaba: durante décadas los cauces longitudinales de los ríos Cauca y Magdalena fueron las más importantes vías de comunicación entre las costas del Caribe y los valles interandinos del centro y del occidente del territorio colombiano.

A la llegada de los españoles a la región del valle del alto del Cauca existía en ella una misma tradición cultural en la que los cacicazgos eran unidades en proceso de consolidación; en algunas partes ya estaban superadas por los señoríos¹³: se tienen 17 fechas absolutas de hallazgos arqueológicos que sugieren su inicio hacia el año 800 d.C. *y su desarticulación hacia el año 1550 como resultado de la implantación de un nuevo*

12 Langebaek (1995: 36).

13 Tovar (1993).

*orden colonial*¹⁴. Entre los cacicazgos de esta zona, las evidencias sobre el uso del río como un canal de comunicaciones están representadas en las huellas de caminos que, en la zona de Calima, atravesaban la cordillera Occidental desde el litoral Pacífico hasta el valle del río Cauca, y en algunos puntos donde lo cruzaban¹⁵. Así mismo, están las referencias consignadas en las narraciones de la conquista sobre el uso de canoas por los nativos para navegar por el río. Una de esas narraciones corresponde al relato del segundo viaje del capitán Jorge Robledo por el río Cauca en 1540, en el que se anota lo siguiente sobre un caserío anterior al pueblo de indios de Palomino, hoy Riofrío:

*... y otro día de mañana vinyendo por una buelta grande q[ue]l río hazia, en nuestras valsas descubrimos ciertos ranchos de indios que son como cabañas a la orilla dél y los indios como toviero[n] sentimiento, diéronse muy gra[n] priesa a recojer lo que tenían en canoas y con todo lo que más pudiero[n] se fuero[n] río abaxo ...*¹⁶

En este suceso y en otros que durante este viaje relata Sardela, el escribano de Robledo, queda implícito el poblamiento y la apropiación de las riberas y la circulación por el río en el valle del alto Cauca en el momento de la conquista.

De este periodo, los registros relativos a las exploraciones que se tienen de la región del valle del alto Cauca corresponden en su mayoría a los viajes de tres expedicionarios: en primer lugar está Sebastián de Belalcázar, quien después de llegar a Villa de Ampudia¹⁷ en 1536 reunió dos grupos para reconocer las márgenes del río Cauca. Una de las campañas estaba comandada por Miguel Muñoz y su recorrido iba por el costado oriental del río; la otra, bajo el mando del propio Belalcázar, iría por la orilla occidental. Muñoz, aunque no ha podido establecerse muy bien cuál es el punto donde cruzó el Cauca, llegó hasta el río La Vieja¹⁸; Belalcázar hasta las regiones donde años más tarde se fundaría la ciudad de Anserma.

En segundo término están dos viajes¹⁹ que realizó Jorge Robledo navegando por el río Cauca. La ruta de ambos, en la región del valle del alto

14 Rodríguez (2002: 270).

15 Herrera, *et al.* (1975).

16 Tovar (1993: 266).

17 Este nombre le fue dado a una fundación que hizo en 1536 Juan de Ampudia, adelantado de Belalcázar, en las tierras del valle del alto Cauca. Se cree que el lugar de este primer poblado es Jamundí. Cuando Belalcázar regresó de la provincia de Anserma, deshizo esta fundación y funda a Cali. Ver Tamayo (1980).

18 Simón (1981).

19 De estos dos viajes están los relatos de dos escribanos que acompañan a Robledo. El primero: *Relación de lo que sucedió en el descubrimiento de las provincias de Antochia, Anserma y Cartago y*

Cauca, es la misma: partieron de Cali y se dirigieron hacia Vijes, donde la compañía se dividió en dos grupos: uno haría el recorrido a pie por la banda occidental y el otro tomaría el curso del río. El primer punto de llegada fue el pueblo grande de Los Gorriones, luego el pueblo de Palomino y concluyó en el extremo norte de la región²⁰.

Por último, está el recorrido que Juan Badillo, gobernador de Cartagena de Indias, inició desde San Sebastián de Buenavista en 1537 para llegar a Antioquia por la cordillera Occidental; luego, desde Anserma, inició el reconocimiento del río Cauca, por la margen izquierda, hasta Cali en 1538²¹.

En las expediciones de los conquistadores se destacan algunos aspectos relevantes en lo referido al río Cauca como un elemento estructurante en el sistema de comunicaciones de la región. El primero está relacionado con la predominancia, en los primeros años de la Conquista, de los recorridos por la margen occidental del río, lo cual puede explicarse por las condiciones físicas de esta zona, ya que el área de inundación es menor y la cordillera bordea el cauce; sin embargo, también puede tener relación con la resistencia de los nativos a la incursión española. Esta situación retrasó hasta después de la mitad del siglo XVI (cuando se fundó Buga) la apropiación de la planicie oriental.

Respecto al uso del río Cauca como vía fluvial, en los viajes de Robledo se verifica su función no solamente en cortos tramos, sino a través de distancias tan largas como las recorridas en su último viaje: entre Vijes, el punto de partida, y Cartago, hay aproximadamente 280 kilómetros. Por último, la existencia de poblados en las márgenes del río y la diversidad de recursos complementarios encontrados en cada uno de los costados fueron un factor decisivo para establecer puntos de dominio a ambos lado del valle y, en consecuencia, conservar y aumentar los puntos de cruce y embarcaderos en el río Cauca.

ciudades que en ella están pobladas por el señor capitán(n) Jorge Robledo (1539–1540), firmado por Pedro Sarmiento; el segundo, Relación de lo que sucedió al magnífico señor Capitán Jorge Robledo (1540-1541), escrita por Juan Baptista Sardela. Ver Tovar (1993).

20 El primer viaje terminó con la fundación de Anserma y Cartago en sus sitios primitivos. En el viaje narrado por Sardela, los expedicionarios abandonaron el río después de naufragar en los rápidos de Sopinga, cerca de La Virginia, punto donde el Cauca abandona el valle y empieza a internarse en el cañón de las dos cordilleras.

21 Cieza (1971).

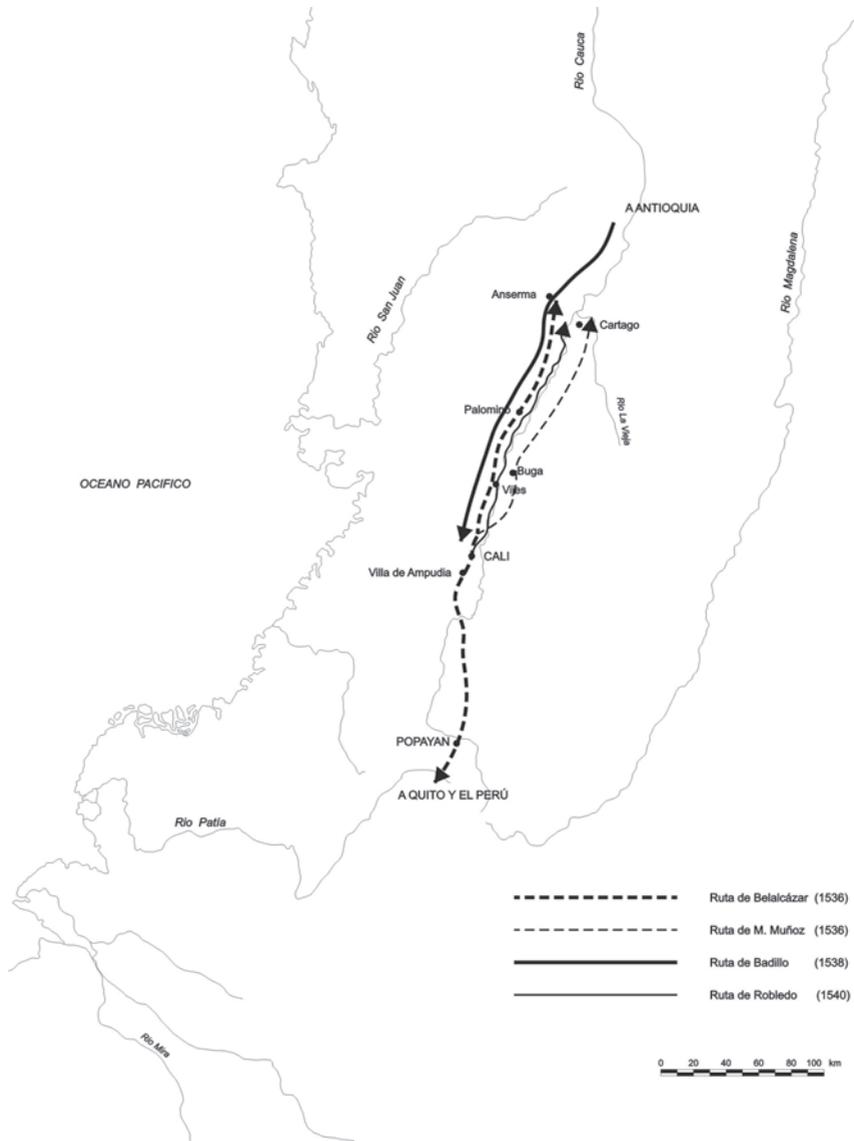


Figura 1.4 Mapa de los recorridos de conquista en la región del alto Cauca (siglo XVI).

Fuente: Elaboración propia.

Primeros elementos de la red colonial

Con el reconocimiento geográfico del continente descubierto y el establecimiento de los primeros centros poblados que aseguraron el dominio sobre algunas regiones, empezó de forma simultánea la conquista de territorios y la conformación de sus gobiernos. En este sentido, gran parte del territorio de la actual Colombia pasó de ser, en la conquista, una indeterminada zona llamada Tierra Firme a conformarse a partir de 1550 como la Nueva Granada²². Este territorio, enorme en dimensiones y en gran parte desconocido, estuvo conformado para su administración por provincias y gobernaciones. Una de las más extensas fue Popayán. Sobre su extensión, en una relación geográfica²³ de 1582 de fray Jerónimo de Escobar, se anota lo siguiente:

Esta Provincia llamada así de Popayán corre desde el pueblo que llaman Otavalo que es como veynte leguas más abaxo del pueblo que llaman San Francisco del Quito hasta el pueblo que llaman Sançta Fe de Antiochia de suerte que ay del principio al cabo dozientas y treynta leguas la mayor para dellas de asperísimos caminos que gran parte dello no se puede andar a cavallo y rios peligrosísimos en compás i contorno destas dichas dozientas y treynta leguas²⁴.

En este largo recorrido que se describe queda inmerso el valle del alto Cauca y las poblaciones que para esta fecha ya habían sido fundadas: Santiago de Cali, Guadalajara de Buga, Cartago, Toro y Anserma. Aunque estos no eran los únicos centros poblados en la época, si constituían los puntos más destacados y los que articulaban el sistema de transportes y comunicaciones que se fue consolidando con las actividades mineras y agrícolas de la región durante la Colonia.

Entre 1536 y 1540, con las primeras fundaciones de la conquista en el valle del alto Cauca, se establecieron las áreas de dominio en los extremos de la región. En el sur se fundó Cali; al norte se fijó una frontera de explotación minera con las poblaciones de Cartago y Anserma en las márgenes oriental y occidental, respectivamente. Estos primeros puntos

22 Tovar (1993).

23 Cuando se establece un gobierno sobre los territorios descubiertos y se reconocen unas actividades económicas en las diversas regiones, disminuyen los relatos que narran las hazañas de la conquista y se empiezan a elaborar nuevos textos en los que la descripción del entorno americano es más sistemática y rigurosa. Algunos ejemplos de esta literatura son las *Relaciones Geográficas* escritas, aproximadamente, después de 1550 como una respuesta a la necesidad de establecer cuáles eran las características y los potenciales de los nuevos territorios. Si bien las relaciones fueron frecuentes en América, sus antecedentes están en las ciudades de diversos reinos europeos. Ver Kagan (2000).

24 Tovar (1993: 388).

distantes en la región se relacionaron a partir de algunos centros indígenas existentes a la llegada de los españoles, los cuales –situados sobre el costado oriental del río– conformaban la ruta de circulación interna a lo largo del valle. La articulación de esta ruta con las ciudades situadas fuera del área delimitada, determinantes política, económica o militarmente, se estableció desde estas ciudades extremas. Así, de Cali se iba a Popayán, cruzando el río Cauca. Al mismo tiempo, se intentaba la comunicación con Buenaventura²⁵.

En el norte, con la fundación de Cartago se inició el sometimiento de los señoríos de la zona de Quimbaya; en Anserma, de los del valle de Hembra²⁶. Para estos años de transición entre la incursión de los conquistadores y el establecimiento de una colonia, surgen en el territorio los primeros elementos y lugares del sistema de transporte y comunicación en la región, determinados principalmente por el eje predominante del río Cauca y los caminos paralelos de la margen occidental. En sentido transversal, sobre los puntos de cruce, y ante la ausencia de recursos tecnológicos para construir puentes que salvaran luces tan amplias como las del río Cauca en esta parte de su recorrido, se establecieron lugares de *paso*²⁷. Para el caso en cuestión, se encontraban solo en los extremos: para comunicar a Cartago, desde su antiguo asiento, con la banda contraria, estaba el paso de Gallo; al sur de Cali, para tomar el camino que conducía a Popayán por la margen oriental, se encontraba el paso de La Balsa²⁸.

Las crónicas de la primera mitad del siglo XVI y las relaciones geográficas posteriores hacen referencia a estos cruces, anotando aspectos comunes en los modos de transporte²⁹: ... *luego se allega al río grande ...*

25 La comunicación con el mar Pacífico fue un proyecto constante para los conquistadores del occidente del país. Hubo un primer intento con la expedición que Belalcázar envía con Juan de Ladrilleros al frente. Hasta que en 1540 Pascual de Andagoya encuentra la bahía de Buenaventura y desde aquí llega a Cali el mismo año. Ver Tamayo (1980).

26 Las zonas de estos señoríos con abundantes yacimientos auríferos corresponden a los territorios que ocupan hoy los departamentos de Quindío y Risaralda en las vertientes de las cordilleras que forman el valle del río Cauca.

27 Los pasos eran lugares de obligado tránsito, escogidos por experiencia en los enclaves más favorables para: (1) el cruce de una masa o corriente de agua; (2) pasar una angostura entre barrancas altas; (3) franquear un portachuelo o depresión en las montañas... Como en esos sitios se facilitaba ejercer la vigilancia y control de viajeros o de artículos, en ellos estaban los funcionarios encargados de percibir los derechos de peaje o portazgo. Ver Patiño (1991: 304).

28 *Ibid.*

29 Las balsas y canoas fueron constantes en los pasos de la Colonia, establecidos al inicio de la República. Este modo de transporte cambia de vehículo con las estructuras de las barcas metálicas y los planchones de principios del siglo XX. *Ibid.*

*mas pasado de la otra parte con balsas y canoas, se juntan los dos caminos, haciéndose todo uno: el que va de Cartago y el que viene de Anserma ...*³⁰

En la descripción de Popayán de 1583 se anota lo siguiente: *Desde Cartago a Enzerma ay veinte leguas de muy mal camino y tierra muy fragosa y en medio del camino pasa el río grande de Cauca, passase este río por canoa y es río muy caudaloso ...*³¹

Respecto al paso del camino a Popayán, partiendo de Cali, Cieza (1971) escribe: *Mas adelante, en balsas y canoas se pasa el río grande de Santa Marta, por los indios comarcanos, que hacen ese servicio a los que van de una ciudad a otra*³².

Para 1566 estos dos únicos pasos sobre el río Cauca, junto con los del río Magdalena, los puertos y entradas al reino, quedaron gravados³³ por las disposiciones del presidente Venero de Leyva y se consideraron parte de la Hacienda Real y patrimonio del soberano. La corona, desde los inicios de la dominación, reconoció el valor estratégico de los lugares de conexión de los sistemas de transporte y comunicación del territorio, y como máxima autoridad de las colonias, estableció la utilidad de estos³⁴. Sin embargo, invirtió muy pocos recursos tecnológicos y económicos en este patrimonio. A pesar de su importancia en la integración de los nuevos reinos y sus efectos en la economía de estos, dejó tal aspecto en manos de instituciones locales y particulares.

Avances sobre la margen oriental del río Cauca en el siglo XVI

A partir de 1550 se empezaron a hacer avances importantes sobre la margen oriental del río Cauca. El manejo restrictivo dado a las encomiendas en su asignación y la relación de ellas con el bienestar y la riqueza que podía alcanzar un español en los nuevos territorios generaron en las ciudades una presión por ampliar las fronteras de conquista y lograr así entregar tierras e indígenas a los soldados, estantes y tratantes que no alcanzaron a ser favorecidos en la banda occidental del valle³⁵. De acuerdo con esta situación y algunos indicios de riquezas auríferas, se inició una conquista tardía de los territorios que ocupaban en la margen oriental los

30 Cieza (1971: 108).

31 Tovar (1993: 449).

32 Cieza (1971: 95).

33 En el acta de la Junta Real de Hacienda del 17 de septiembre de 1566 se establece un "arbitrio rentístico" para los pasos y se fijan los derechos a pagar: ... *medio peso por cada caballo, y dos tomines por cada español y un tomin por cada negro o indio*. En Patiño (1991: 305).

34 *Ibid.*

35 Valencia (1996a).

pijaos y los bugas³⁶. Esta iniciativa, común a los cabildos de Cali y Cartago, empezó con la fundación efímera, en 1569, de Jerez de la Frontera y se concretó con el establecimiento definitivo de Guadalajara de Buga en la parte plana del valle, en el costado sur del río Las Piedras. Este punto de avanzada sobre el oriente de la región supuso, además de la pacificación de los naturales de un área apta para la ganadería y la agricultura, comprendida entre el río La Paila y el lugar de Llanogrande, la posibilidad de un camino más corto entre Cali y Cartago y, en consecuencia, una comunicación más rápida con Santa Fe de Antioquia y Bogotá. Las mejores condiciones de esta nueva vía estaban relacionadas con los recorridos rectos y planos que se podían hacer y las facilidades para el tránsito de recuas por la amplitud y continuidad del trayecto. De acuerdo con esto, el oidor de la Audiencia de Quito, Pedro de Hinojosa, en una visita a la provincia de Popayán, entre 1569 y 1570, ordenó la apertura de un camino estable entre Cali y Buga³⁷, cuyo cruce sobre el río Cauca se determinó en el sitio de Mediacanoa, cerca al pueblo grande de Los Gorriones.

Las motivaciones que llevaron a la fundación de Buga no fueron las únicas que se dieron para poblar la banda oriental del río Cauca; años atrás, las primeras mercedes otorgadas por Sebastián de Belalcázar se situaron en las zonas de los municipios de Yumbo y Vijes. La pobreza de estos suelos, la escasez de agua y los constantes ataques de los gorriones promovió la solicitud de tierras en Llanogrande. Esta petición fue acogida por el cabildo de Cali; en 1568 se entregaron mercedes a Gregorio de Astigarreta, Gaspar González y Pascual de Segura, todos vecinos de esta ciudad³⁸.

La búsqueda de nuevos yacimientos auríferos llevaron a los pobladores de Buga a pasar el gran río, adentrarse en la cordillera Occidental y fundar, en 1573, la ciudad de Toro. El fracaso de esta empresa por la resistencia nativa y las dificultades del hábitat de esta zona³⁹ hizo necesario, 15 años más tarde, el traslado del núcleo a su sitio actual. El establecimiento de este centro minero y la fragmentación en encomiendas, mercedes y estancias de la zona conquistada con la fundación de Buga y las tierras cedidas desde 1568 por el cabildo de Cali en las inmediaciones de Llanogrande crearon en el siglo XVI los puntos de referencia para empezar a establecer los vínculos entre una y otra orilla.

36 Bugas y pijaos eran los nombres genéricos que recibían los diversos grupos nativos que habitaban la cordillera Central. Entre estos se encontraban los siguientes: putimaes, paeces, chinches, capacaríes, augies y anaponimas. *Ibid.*

37 Patiño (1991).

38 Arboleda (1956).

39 Aprile-Gnisset (1991).



Figura 1.5 Mapa de las vías en la región del alto Cauca durante el siglo XVI.

Fuente: Elaboración propia.

A finales de ese siglo de conquistas e instauración de dinámicas ajenas a las de los nativos de la región, se contaba con una red de circulación caracterizada por tres elementos:

1. Los centros poblados, representados en ciudades, villas y pueblos de indios que se enlazaban a partir de los caminos abiertos o conservados en uno y otro costado del valle. Muchos de estos, los que conformaban la ruta entre Cartago y Popayán, pasando por Cali, formaban parte *del camino real que sube del Nuevo Reyno de Granada al Piru que no ay otro camino descubierto por tierra sino es este el qual dura desde los llanos de Benezuela hasta Santiago de Chile que son mil y ochocientas leguas de camino real todo él a do quiera que ay indios y españoles*⁴⁰.
2. Los lugares de arribo de las balsas y canoas que recorrían el río en sentido longitudinal; entre ellos varios pueblos de la margen occidental, como los mencionados en los relatos sobre los viajes de Robledo y las relaciones posteriores a 1570: Vijes, Yotoco, Riofrío, Roldanillo y Pescado, punto de arribo de las balsas que subían desde la confluencia del río La Vieja y el Cauca⁴¹.
3. Los pasos administrados de La Balsa, en la jurisdicción de Cali; Mulaló, que comunicaba estancias de uno y otro lado; Mediacanoa, que permitía el paso a Buga; Roldanillo, para ir a Toro⁴²; y Gallo, entre Cartago y Anserma.

Consolidación interna del sistema de transporte a principios del siglo XVII

Las prácticas sociales y económicas del siglo XVI generaron situaciones negativas en el aparato productivo que se implementó en los primeros años de la Colonia. Por un lado, hubo un agotamiento del primer ciclo minero en las ciudades de Anserma y Cartago; los intentos por impulsar esta actividad muchas veces fueron proyectos frustrados, como el de Toro. Por el otro, los enfrentamientos de la conquista y el trabajo impuesto a los nativos ocasionó, en poco tiempo, descensos en las tasas demográficas de la región, situación que puso en riesgo la permanencia de muchos poblados, dada la insuficiencia de mano de obra rural y la dispersión por los

40 Tovar (1993: 407).

41 Friede (1982).

42 Las referencias encontradas sobre estos pasos son de 1572. En este año el procurador de Cali, Rodrigo Villalobos y Ayala, pidió al Concejo que se estableciera una tarifa para los pasos de La Bolsa, Mulaló, Mediacanoa y Roldanillo. Ver Arboleda (1956).

procesos seguidos en la distribución y tenencia de la tierra⁴³. Igualmente, las funciones de las ciudades pioneras y los pueblos periféricos a estas se transformaron y redefinieron el reciente modelo espacial: Cali perdió el control del comercio hacia Buenaventura y las regiones mineras, ciudades como Buga, Caloto y Toro se convirtieron en sus fronteras, mientras Cartago y Anserma se especializaron en la explotación, desarrollando muy poco la agricultura y la ganadería⁴⁴.

Este panorama crítico que heredó el siglo XVII empezó a superarse levemente con los procesos de mestizaje que permitieron un incremento de la población, sobre todo rural. En consecuencia, se logró una densificación de las áreas de explotación agrícola y ganadera de la región, lo cual favoreció la multiplicación de unidades agrícolas de menor tamaño y manejo familiar, y el establecimiento de nuevas haciendas y trapiches⁴⁵.

La intensificación en el uso de las tierras planas del valle en las márgenes del río Cauca generó dos acontecimientos relacionados con los caminos y los pasos sobre el Cauca. En cuanto a los primeros, se estableció una vía permanente que conducía desde Cartago hasta Popayán sin necesidad de ir a Cali pasando por Buga, Llanogrande y por las estancias que existían entre estos dos puntos hasta llegar a Caloto, donde se unía con una ruta que venía desde Cali, atravesando el paso de La Balsa; para esta época el trayecto era muy frecuentado por animales de carga y los ingenios empezaron a hacer uso de él para llevar miel hasta Popayán⁴⁶. La importancia que Cali pierde en la región durante estos años contrarresta el efecto de atracción que la ciudad había ejercido sobre todos los caminos y ayuda a establecer un trayecto independiente y completo a lo largo de todo el valle del alto Cauca. Respecto al conjunto de lugares de cruce sobre el río, se mantuvo una composición similar a la del siglo anterior, a excepción de un paso que se abrió en Yumbo y reforzó las comunicaciones de la parte occidental, cerca de Cali, con las propiedades de Andrés Alderete y Sebastián Aguirre Astigarrete, en la margen opuesta a los alrededores del río Amaime, actualmente municipios de Guacarí, El Cerrito y Palmira⁴⁷. El conjunto de estos pasos fortaleció la red de intercambios de las dos bandas, exigió mayor control en los recaudos por su uso y requirió, seguramente por el tiempo transcurrido para algunos y la experiencia lograda en cuanto a la administración de caminos, trabajos más frecuentes de reparación y mantenimiento.

43 Colmenares (1983).

44 Valencia (1996a).

45 Aprile-Gnisset (1991).

46 Arboleda (1956).

47 Colmenares (1983).

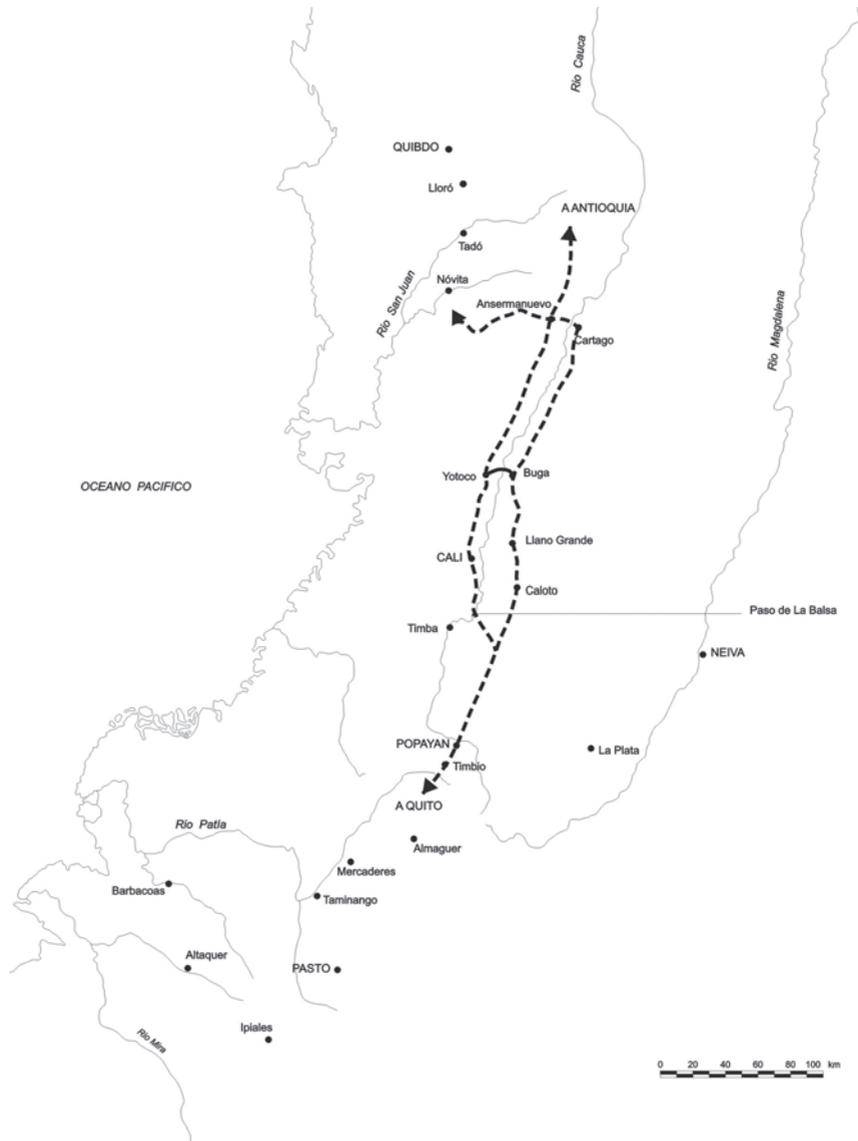


Figura 1.6 Mapa de las vías en la región del alto Cauca durante el siglo XVII.
Fuente: Elaboración propia.

Para 1650 los yacimientos auríferos de las vertientes de las cordilleras que bordean el valle eran ya un recurso conocido en los recorridos de la conquista. Hubo una apropiación rápida por parte de payaneses de las minas cercanas a Caloto y otras en los poblados de los quilichaos. Sin embargo, la conquista de las riquezas de Chocó y de varios ríos que bajan al Pacífico fue, por mucho tiempo, una de las empresas más difíciles que se propusieron las provincias cercanas⁴⁸. La ocupación de estas áreas se inició con procedimientos diferentes, dada la experiencia de las primeras fases armadas de penetración, y empezó a hacerse efectiva con las entradas de vicarios y clérigos enviados por las gobernaciones de Popayán y Antioquia. El establecimiento de los reales de minas en el alto San Juan y Atrato alto dieron origen a las poblaciones de Tadó, Lloró, Quibdó y Nóvita.

Con estos espacios de producción minera se logró la integración de varias regiones del territorio occidental de la Nueva Granada: se puede decir que la economía local agrícola del valle logró un ensanche complementario con las minas del Pacífico. Los términos generales de esta relación estaban dados por el abastecimiento de panela, mieles, aguardiente, carne y grasa a las cuadrillas de los reales de Chocó por los hacendados del valle. Este proceso fortaleció las unidades productivas de la cuenca alta del río Cauca, cercanas a las ciudades de Cali, Buga, Cartago, Toro y Anserma; así mismo, impuso la necesidad, a finales del siglo XVII, de contar con redes de circulación más eficientes a lo largo y a través del río Cauca. El impulso que dio la actividad minera a la región requería una circulación permanente de productos y personas, la cual se lograba con vías en buenas condiciones y trayectos más cortos entre los espacios de interés. Estas exigencias de vías en la segunda mitad del siglo XVII significaron el aprovechamiento, la organización y el mejoramiento de la red existente.

El avance significativo que dio a la red de caminos la apertura de una vía continua por la banda oriental del río Cauca y el apoyo que esta ofrecía a la economía de explotación primaria que se daba en la región tuvieron, dentro del marco del transporte y las comunicaciones, efectos particulares sobre las ciudades de Cartago y Cali. En la primera, las condiciones sociales que produjo el mestizaje y la atracción que ejercía Chocó en el orden espacial, definido en el transcurso de este siglo, fueron factores relevantes para decidir el traslado de la ciudad a un lugar más próximo a los caminos del valle. Además con la reactivación minera del Chocó, Cali recobró la importancia que se había visto disminuida en los años anteriores. En ese sentido requería reforzar los vínculos con las planicies

48 *Ibid.*

fértiles de Llanogrande y con el camino que corría con la autonomía de su jurisdicción.

Enlace de regiones en el siglo XVIII

Este es el contexto en el que se estructuró el sistema de circulación de la región. Las condiciones físicas del valle del río Cauca y el emplazamiento de importantes poblaciones en sus extremos determinaron la conformación de un eje lineal en el sentido norte-sur que, paralelo al curso del río, fue capaz de comunicar las poblaciones situadas entre Cartago y Popayán.

Aunque la ruta hacia el sur, partiendo desde Cartago, tenía en la margen oriental del río Cauca una región extensa, de fácil topografía, alterada solo con leves ondulaciones y con un brillante porvenir económico dada la fertilidad de sus suelos, el efecto de continuas inundaciones que formaban ciénagas fue el inconveniente que en muchas ocasiones obligó a los viajeros a utilizar la navegación *aguas arriba*, al menos hasta el sitio conocido como el paso de La Balsa, en inmediaciones de lo que hoy conocemos como la población de Timba. En una anónima relación acerca de Popayán y el Nuevo Reino de Granada, citada por Zuluaga⁴⁹ y fechada entre 1559 y 1560, se encuentra el siguiente relato que describe las condiciones de la ruta:

De la ciudad de Cali a la de Cartago hay cuarenta leguas, las treinta de ellas por el valle Cali abajo, todo de muy buen camino llano que pueden andar recuas y andan por él; pero úsase poco, y porque el contrato de las mercaderías y pasajeros bajan por el río abajo en balsas de cañas gordas. En la mitad del camino está el pueblo de Pescado y población de los Gorriones... Y de este pueblo al de Cartago hay otras veinte leguas, todo de camino llano, que nadan recuas por él y camino de sabana todo, hasta cuatro leguas de la ciudad, que desde allí es todo cañaveral muy cerrado, que los caminos es menester que todos los meses del año se abran, para poder andar por ellos.

Con el pasar de los años, en especial a lo largo del siglo XVIII, la región comprendida entre la cordillera y la margen derecha del río Cauca se fue poblando de haciendas dedicadas al cultivo del azúcar y el tabaco que remplazaron la mano de obra indígena con esclavos africanos. Con ellas se consolidó también la ruta que desde Cartago atravesaba El Naranjo, Buga y la población de Llanogrande, desde donde descendía hacia Candelaria y Caloto antes de adentrarse en el camino hacia Popayán.

49 Zuluaga (1995: 170).

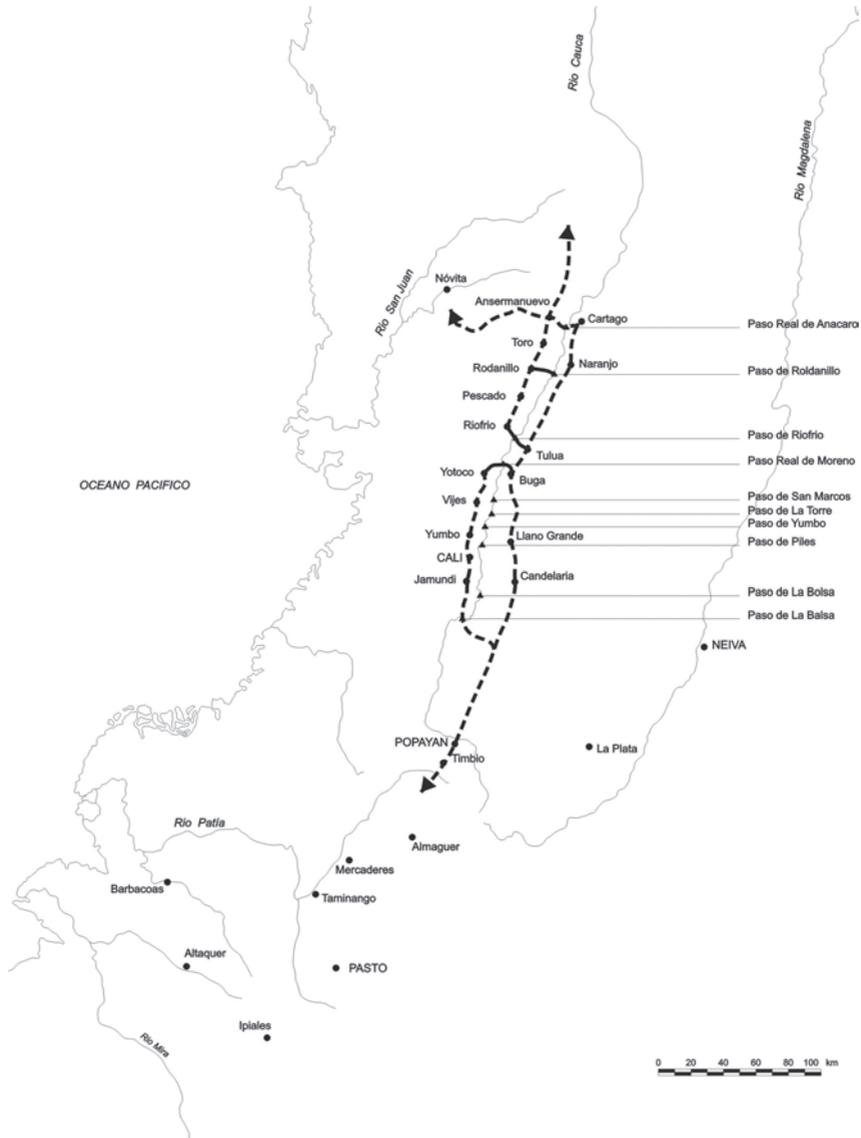


Figura 1.7 Mapa de las vías en la región del alto Cauca durante el siglo XVIII.
Fuente: Elaboración propia.

Durante el siglo XVIII, en este intercambio entre regiones, el fortalecimiento de la red interna de caminos y pasos del valle se caracterizó por la necesidad de adecuar las vías para el tráfico de recuas, que en algunos periodos era intensivo, y por la urgencia de definir nuevas rutas que condujeran con más rapidez a los centros de más alto consumo, producción y jerarquía política, muchos de estos localizados en los extremos de la región. Durante la Colonia, los caminos eran una obra pública de interés para la corona, pero desarrollada por particulares, controlados por algunas instancias del gobierno local. En los caminos de la región este papel lo cumplió el cabildo de los poblados, el principal encargado de verificar el mantenimiento de las vías, así como de la inspección en los lugares de paso. De acuerdo con esto, entre las funciones de los ediles y los asuntos de los miembros del concejo estaban asignar los trabajos de reparación, recaudar los arrendamientos de los pasos, autorizar los remates de estos y disponer de los ingresos que por este servicio se percibía. Pasados en el siglo XVIII ya varios años de dominio colonial, se pueden observar algunos procesos definidos y unos elementos perfilados en el sistema de transporte y comunicación del valle del alto Cauca.

Las rutas que recorrían el valle consolidaron la configuración paralela al río, que se inició con un tránsito predominante por la banda occidental. Sin embargo, este proceso mostraba diferentes niveles de desarrollo en cada margen. Tomando como punto de partida los informes oficiales sobre caminos, provenientes de los cabildos, y la cartografía disponible para este siglo en los archivos nacionales, se tiene que el camino existente era continuo desde Cartago hasta Caloto, en el costado oriental, y presentaba, en el lado opuesto, desde el paso de La Balsa hasta Anserma, una discontinuidad entre Yotoco y Riofrío. En este punto el trayecto se recomponía hasta el paso de Anacaro en el extremo norte de la región⁵⁰. Teniendo en cuenta la regularidad con la que se recorría la margen derecha del río Cauca desde la conquista, tal vez no sea preciso anotar que algunos tramos de este camino desaparecieron; seguramente entraron en desuso por las rutas abiertas en la margen oriental y la forma directa en que estas podían conducir a algunos lugares específicos y relevantes de la cordillera Occidental, como Roldanillo, Toro o Anserma⁵¹. La falta de tráfico llevó a que su trazado se omitiera en varios mapas del siglo XVIII, acompañado de muy pocas menciones en los documentos oficiales.

50 AGN: Mapoteca 2, No. 1064. Este era el nombre que tenía el paso entre Cartago y Anserma en la cartografía de 1774. El sitio se encuentra desplazado unos kilómetros al sur del antiguo paso entre estas dos ciudades.

51 En 1771 el virrey manda que se establezca una ruta de correos que desde Popayán entrará al Valle y sirva las minas de Quinamayó, la ciudad de Quilichao, Caloto, Llanogrande, Cali, Buga y Cartago, con desviaciones a Toro y Anserma. En Barona (1996).



Figura 1.8 Plano puntual del terreno que comprende las ciudades de Cartago y Buga (s. XVIII).
Fuente: AGN, Mapoteca 4, No. 1064.

Junto al caso de esta ruta se observa, desde la mitad del siglo XVIII, la modificación de la que desde Cali llevaba al sur de la provincia: el trayecto tradicional de este viaje iba de Cali al paso de La Balsa o de forma alterna al paso de La Herradura, de ahí a Caloto y luego a Popayán. Frente a esta vía usada desde el siglo XVI, se empezó a plantear en 1745 otra alternativa en el cabildo de Cali, como lo plantea Arboleda (1956: 180): *Discutieron los ediles acerca del nuevo camino que se estaba transitando para Popayán, Caloto y minerales de Quinamayó, por el paso que llaman de La Bolsa, que se ha demostrado es de utilidad para este comercio, sin perjuicio del paso de La Balsa. Y en una queja presentada en 1754 al gobernador por la obstrucción de esta vía, el procurador de Caloto anotaba que este recorrido era usual desde hace años, así no tuviera la categoría de público y que sus ventajas estaban en los días de camino que disminuían entre Cali y Caloto*⁵². Superadas las disputas sobre el derecho que tenía don Francisco Antonio Arboleda⁵³ para el cierre de la vía, el paso de La Bolsa salió a remate en 1778 y el camino que conduce a él se convirtió en una vía expedita.

Casos como estos eran frecuentes en los sistemas de transportes y permiten intuir que si bien el esquema general de circulación regional era constante, presentaba muchas variaciones locales que se manifestaban en

52 Arboleda (1956: 262) dice: *...era dispendioso caminar por La Balsa o por La Herradura; sostenía que por la primera de las tres vías [La Bolsa] se andaba desde hacía más de un siglo, aunque no estuviera en la categoría de pública; que por allí se iba en día y medio o un día de Caloto a Cali, en tanto que por La Balsa se gastaban tres o cuatro días y por La Herradura cuatro o cinco...*

53 Don Francisco Antonio Arboleda alegaba tener una provisión de Quito, expedida en 1752, que le permitía evitar la servidumbre por su hacienda, empalizando la vía, y obligando así al uso del paso de La Balsa como ruta hacía Caloto. *Ibid.*

los trazados viales y en la localización de los lugares de cruce. Sobre esta dinámica, la *Cédula de Caminos* del 5 de mayo de 1783 reconocía las particularidades de la red de comunicaciones en el valle del alto Cauca y disponía lo siguiente:

*...mandaba a conservar los caminos y las calzadas, reparar los puentes y que si fuera necesario se hicieran unos y otros. Y por lo que mira a apertura de nuevos caminos y construcción de puentes, manteniéndose como está dicho los necesarios y que el único río sin vado que lo es el Cauca mantiene tres paseros de canoas para el transito de pasajeros y correos no hay necesidad de puente en él, fuera de ser imposible por su anchura, hondura y flojedad del terreno*⁵⁴.

En cuanto a las condiciones técnicas de las vías y sus obras de arte (puentes y pontones principalmente), es revelador un informe del Cabildo de Popayán, ya en las postrimerías del siglo XVIII, que describe el estado de los caminos que comunican a Popayán con las provincias de Buga, Cali, Caloto, Cartago, Quito y Almaguer, entre otras, con mención especial a los puentes que se hacía necesario construir⁵⁵. Desde Popayán se informaba:

*...sea urgente la necesidad de una total composición del camino de Guanacas, en donde por su fragacidad y deterioro de las palizadas, se experimentan no pocas desgracias, impidiendo al mismo tiempo lo caudaloso de sus ríos, el transito a los pasajeros, quienes sufren estas molestias... No menores desgracias y perjuicios reciben los caminantes de Buga, Caly, Caloto y Cartago a esta por lo caudaloso de los Rios que intermedian siendo preciso para facilitar este transito poner un solido puente en el Rio de Ovejas, otro en Piendamó, otro en el Cofre, otro en el Palo y reformar el insubsistente del Palaze ...*⁵⁶

Y desde Almaguer se hacía una solicitud particular referente a un puente de madera:

Y que por lo respectivo a Puentes, fuera muy conveniente, se construyeran estos en los tres rios que median en el transito de esta ciudad al

⁵⁴ *Ibid.*, 51.

⁵⁵ AGN: Fondo Documental Mejoras Materiales, sección Colonia, t. VII: *Popayán: su cabildo, en obediencia a Real Cédula, determina la composición de los caminos que la comunican con Buga, Cali, Caloto, Cartago, Quito y Quindío, y la construcción de puentes en el río Ovejas, Piendamó, Cobre, Palo y Palacé*, 1776-1782; ff. 620-688.

⁵⁶ *Ibid.*, 621. Desde el siglo XVII el camino de Guanacas, entre Santafé y Quito a través de Tocaima, Neiva, La Plata y Popayán, era uno de los más transitados en todo el Virreinato. Ver Barona (1995).

*pueblo de Mercaderes, que son el de San Jorge, distante tres leguas de esta ciudad; Sambingo, doce leguas y Hatoviejo, a tres leguas del pueblo de Mercaderes. La del expresado río de San Jorge se podría facilitar de madera, con el costo de doscientos patacones, según la regulación que se ha hecho por los sujetos mas practicos de estos lugares...*⁵⁷

Mientras que desde Pasto se hacía gala de las cualidades de otro:

*En quanto a puentes, habiéndose puesto el del caudaloso río Guaytara, casi incorruptible y dispuesto con tan prolijas precauciones que quando menos se promete la duración de un siglo, solo resta el del Río Juanambu...*⁵⁸

Y en Cali se reconocían las dificultades de atravesar el río Cauca:

*Y por lo que mira a la apertura de nuevos caminos y construcción de puentes y manteniéndose como esta dado los necesarios aderezados y que el unico Río sin bado que lo es, Cauca, mantiene tres pasos de canoa para el transito de pasajeros y correos, no hay necesidad de puente en el, fuera de ser imposible por su anchura, hondura y floxedad del terreno...*⁵⁹

Para el siglo XIX las cosas no serían radicalmente distintas. No son pocos quienes sostienen que hasta 1860 los caminos caucanos *eran prácticamente los mismos de la época colonial*⁶⁰. En todo el país las vías eran escasas y malas, de difíciles pendientes e intransitables en los inviernos, cerrando un círculo vicioso en el cual esta situación se explicaba en un débil comercio interregional que a su vez no contribuía al crecimiento económico de la Nación ni al mejoramiento de sus obras de infraestructura.

Caminos en los comienzos de la República

Luego de la independencia, la construcción de vías carretables fue la prioridad de muchos gobernantes: ya Santander y Bolívar habían establecido criterios para licitar obras de esta naturaleza fomentando con ello tanto la intercomunicación nacional como la colonización de baldíos⁶¹. Pero solo cuando se consolidó la República se emitieron las primeras dis-

57 AGN: Fondo Documental Mejoras Materiales, sección Colonia, t. VII; f. 623.

58 *Ibid.*, 626.

59 *Ibid.*, 630-631.

60 Valencia (1996b: 120).

61 Salazar (2000).

posiciones legales sobre el tema, como la ley expedida el 12 de octubre de 1821 que ordenaba que todos los caminos públicos de Colombia fueran medidos y que se pusieran postes o mojones que indicaran la distancia de un lugar a otro⁶². Dos años más tarde fue expedida una nueva ley⁶³ que establecía reglas para la concesión de privilegios exclusivos para las obras públicas, partiendo del reconocimiento del mal estado de los caminos *sin exceptuar los principales y más necesarios* que no hacían más que dificultar el comercio, la agricultura, la industria y las comunicaciones. Con esta ley como marco –modificada luego mediante decreto del 29 de septiembre de 1827–, el Congreso se limitó a dictar otras nuevas que concedían privilegios para la apertura de nuevos caminos, su mejoramiento y hasta la distribución de auxilios, pero sin llegar nunca a formular un plan global capaz de focalizar las necesidades viales del país. Para el periodo comprendido entre 1823 y 1845, Molina (1995b) cita al menos 13 leyes o decretos expedidos por el Gobierno, orientados a regular asuntos relacionados con la construcción o el mejoramiento de caminos de herradura a lo largo y ancho de la Nación.

Durante la primera presidencia de Tomás Cipriano de Mosquera⁶⁴, heredero de la concepción de un Estado centralizado y parecía estar poseído por una voluntad modernizadora de su aparato administrativo, se dio comienzo a un cambio en la manera global de pensar el territorio: bajo su mandato se sancionó la ley del 7 de mayo de 1845 que fomentaba la ocupación de baldíos y el poblamiento alrededor de los caminos, bautizando como tales aquellos que partían de la capital en dirección de las costas y las fronteras, a la vez que permitía al poder Ejecutivo nombrar hasta tres directores de vías y obras públicas que serían por lo menos ingenieros de puentes y calzadas, los cuales podían ser extranjeros. En caso de hallarse fuera del país, sería de cuenta de la Nación su transporte hasta donde sus servicios fueran necesarios, puesto que, en palabras del general caucano:

*No hai un arquitecto, un mecánico, un agrimensor, un ingeniero civil, un geógrafo. Tenemos que mendigar conocimientos extraños para la menor obra de este jénero*⁶⁵.

62 Expedida por el Congreso de Villa del Rosario, reglamentada por el Decreto del 9 de diciembre de 1828 y refrendada por José Manuel Restrepo, secretario de Estado en el Departamento del Interior. Ver Bateman (1968).

63 Ley 1ª de 31 de julio de 1823.

64 Entre 1845 y 1849.

65 Citado por Martínez (2001: 54).

Así, el Estado quedaba facultado para contratar total o parcialmente la construcción de todo tipo de obras públicas, estipulando un precio fijo o concediendo a los empresarios hasta por cincuenta años los derechos de peaje, pontazgo, pasaje o navegación –o unos y otros– o incluso cederles en propiedad hasta 8 mil fanegadas de tierras baldías por cada legua de camino o canal que construyesen. Con tierras también se beneficiaría *hasta a cien obreros prácticos* extranjeros dedicados a los trabajos, así como a las familias que se asentaran en las partes despobladas de los caminos nacionales⁶⁶. Acto seguido se promulgó la ley 1 del 30 de mayo de 1845 que destinaba una suma de 8 mil pesos para la composición de la anhelada ruta entre las poblaciones de Cartago y Nóvita, motivada seguramente por los intereses de los comerciantes del oro radicados en Popayán y Cali desde el siglo XVII⁶⁷ y en medio del entusiasmo que generaban relatos alusivos a las riquezas de la zona, como los que hicieron Agustín Codazzi luego de su travesía por tierras de Chocó en 1819⁶⁸ y Jean-Baptiste Boussingault en 1827⁶⁹.

Sin embargo, en la práctica, la principal preocupación de Mosquera y de quienes le sucederían en el poder por varias décadas era siempre mejorar la red que enlazaba las áreas más densamente pobladas del país⁷⁰ con el río Magdalena o *abrir caminos cortos hacia el mar, apoyándolos sobre él directamente*⁷¹ o sobre otros ríos navegables.

Leyes nuevas para caminos viejos

La ley 1 de 1845 fue seguida por un decreto del 16 de junio de ese mismo año en el cual se fijaban las rutas a seguir y se determinaba la presencia de dos directores, uno para la apertura y composición de la parte del camino de Bogotá hasta Honda y otro para el puerto de Buenaventura; así como tres subdirectores, uno para el camino que salía hacia el golfo de

66 A este respecto, Aprile-Gnisset (1991: 176) afirma: *Las obras públicas de comunicaciones, apertura de caminos y construcción de ferrovías, se convirtieron durante el siglo XIX en un poderoso instrumento de reconstitución del latifundio, de enriquecimiento ilícito y en un semillero de pleitos eternos: de estos que entabla el abuelo y de los cuales se notifica el fallo al nieto, o que se inician bajo Núñez y culminan durante el mandato de Olaya Herrera.*

67 Colmenares (1983).

68 Codazzi (1973).

69 Boussingault (1992).

70 De acuerdo con Melo (1997: 127): *...las áreas más densas del país se encontraban en la altiplanicie cundiboyacense, y en la hoya alta del Suárez, que conformaban la región oriental del país; en las áreas circundantes de Pasto, Túquerres, Popayán y Cali, en el suroccidente colombiano; en el centro de Antioquia; y en las regiones costeñas vecinas a Cartagena, Mompo y Santa Marta. Estas cuatro grandes regiones se encontraban relativamente aisladas entre sí, separadas por grandes extensiones de selva doblamiento muy disperso, cruzadas por caminos muy difíciles de transitar.*

71 Ospina (1955).

Urabá, otro para el de Panamá y un tercero destinado a terminar el camino del Quindío. En lo atinente a las rutas que atravesaban el suroccidente del país, se precisaba que el camino nacional que partía de Bogotá hacia la costa del Pacífico en la provincia de Pasto debía seguir las huellas del de Guanacas, pasando por La Mesa, Tocaima, Neiva, La Plata, Popayán, Patía, La Venta, Cabuyal, Pasto, Peñol y río Patía hasta Tumaco.

El que comunicaba a Bogotá con Buenaventura compartía con el anterior el tramo hasta Tocaima y luego se bifurcaba hacia Ibagué, pasando por la cordillera del Quindío, desde donde descendía a Cartago, Tuluá, Buga, Cali y San Antonio, desde donde ascendía nuevamente la cordillera en busca del río Dagua y desde allí iba al puerto de Buenaventura. Esta fue otra de las rutas que obsesionaría a Tomás Cipriano de Mosquera durante toda su vida⁷².

Aunque la escala proyectada por Mosquera era tan vasta que nunca permitió establecer prioridades distintas a las personales⁷³, dejó sentadas las bases sobre las cuales se ejecutarían las obras públicas en la segunda mitad del siglo XIX. Desde entonces y hasta 1905⁷⁴ se promulgaron más de 175 leyes o decretos que establecían reglas para la construcción de vías de comunicación, autorizaban la construcción de un puente, concedían empréstitos, exoneraban multas, concedían privilegios de explotación o destinaban partidas presupuestales, entre otros muchos aspectos⁷⁵.

En lo concerniente a las vías caucanas, este conjunto de piezas de legislación estaba destinado solo a unas pocas rutas: las ya mencionadas entre Cartago y Nóvita⁷⁶, y entre Cali y Buenaventura⁷⁷, a las que se sumaban la vía de Popayán a la costa Pacífica⁷⁸, el camino entre Túquerres

72 El Congreso concedería a Mosquera un privilegio para la apertura de un camino de ruedas entre Cali y Buenaventura mediante decreto del 12 abril de 1859, ampliado y refrendado luego por el del 30 de agosto del mismo año. Ver Argüelles (1946).

73 Al respecto, Safford (1978: 59) comenta: *tanto al gran general [Mosquera] como a los legisladores de la época les quedaba difícil negarle importancia nacional a cualquier carretera...*

74 Año de creación del Ministerio de Obras Públicas.

75 Molina (1995b).

76 Además de la ley 1 del 30 de mayo de 1845, la ruta Cartago-Nóvita se verá afectada por las siguientes: ley 69 de 1871, ley 22 y ley 64 de 1874, ley 62 y 105 de 1876, ley del 7 de junio de 1877, ley 87 de 1881, ley 141 de 1888, ley 24 de 1890 y ley 19 de 1904. Ibid.

77 Ley 8 de 1846, ley del 1 de junio de 1850, decreto de 12 de abril de 1854, decreto del 30 de abril de 1855, ley 29 de 1863, ley 33 y ley 40 de 1864, ley 9 y ley 29 de 1866, ley 14 de 1868 y ley 41 de 1869.

78 Decreto de 22 de mayo de 1846, decreto del 20 de mayo de 1851, decreto del 6 de mayo de 1855, decreto del 28 de marzo de 1856, decreto del 29 de febrero de 1860, ley 26 de 1883, ley 81 de 1888 y ley 97 de 1890.

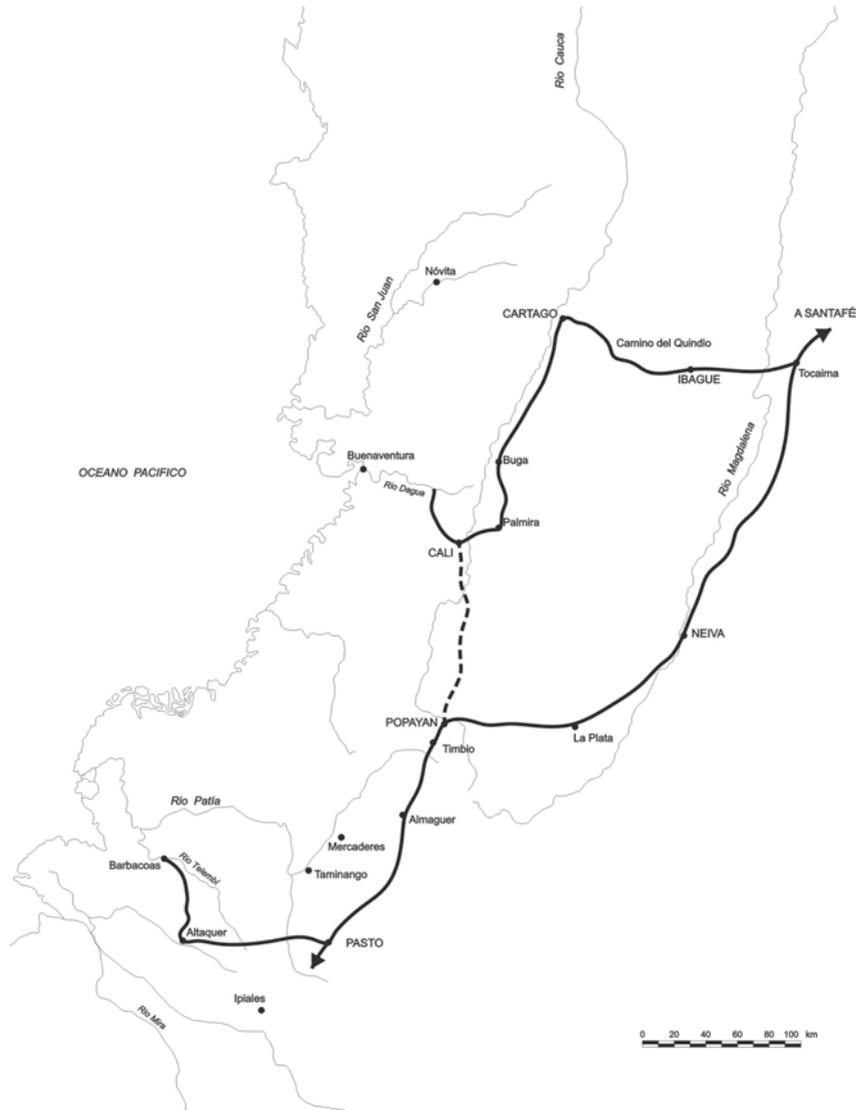


Figura 1.9 Mapa de los caminos nacionales conforme al Decreto del 16 de junio de 1845.
Fuente: Elaboración propia.

y Barbacoas⁷⁹, el camino de Guanacas o Moscopán⁸⁰, el camino del Quindío⁸¹, el camino entre Cali y Llanogrande⁸², y el de Las Delicias entre los Estados de Cauca y Tolima⁸³. Solo una ley estaba dedicada a la ruta entre Cali y Popayán⁸⁴, vía que habrá que entender como una espina dorsal desde la cual se desprenderían otras y que prácticamente quedaría a merced de las autoridades regionales.

Y si las leyes eran muchas, a veces confusas y en otras incluso contradictorias, no era fácil disponer de un aparato administrativo nacional para llevarlas a la práctica. Aunque la Secretaría de Hacienda había nacido con la Constitución de 1821, solo en 1824 mediante la ley 3 de ese año surgirá la Dirección General de Hacienda y Rentas Nacionales, encargada de manejar los dineros del país. Posteriormente, mediante la ley 20 de 1850 se creará el Departamento Administrativo de Gastos de Obras Públicas; 16 años después, del Congreso de los Estados Unidos de Colombia, surgirá el Departamento de Obras Públicas y Fomento, precursor del Ministerio de Fomento, que en 1872 hubo de dividirse en varias secciones capaces de asumir bajo su cargo las vías de comunicación, los telégrafos, las minas, la agricultura y el seguimiento estadístico de la Nación. Esta situación tal vez puede ayudar a explicar la razón por la que en el ramo de la construcción de obras públicas su labor se limitaba casi exclusivamente a la concesión de privilegios a particulares. La sección primera tenía a su cargo los asuntos del ramo de la ingeniería, de las obras públicas y de los *negocios generales* atinentes a los dos anteriores; pero sin duda, fueron los asuntos relacionados con las obras ferroviarias los que ocuparon la mayor parte de sus esfuerzos, descuidando las vías carretables, como lo habría de reconocer el ministro de turno en 1888 en su informe al Congreso:

Cada día se hace más palpable y se acentúa más fuertemente la necesidad de mejorar las [vías de comunicación] que tenemos, que si no están en peor estado que en el tiempo colonial, en lo general no han mejorado, quedando así casi incomunicadas las diferentes poblaciones de la república y sin poderse hacer entre ellas el cambio de sus respectivos productos.

79 Ley 8 de 1846, decreto del 25 de mayo de 1849, ley 40 de 1864, ley 69 de 1871, ley 63 de 1876, ley 52 y 87 de 1881 y ley 107 de 1888.

80 Leyes del 13 de abril y 13 de junio de 1853, ley 69 de 1871, ley del 23 de mayo de 1877, ley 64 de 1879, ley 43 de 1886 y ley 23 d 1887.

81 Ley 40 de 1864, ley 69 de 1871, ley 16 de 1873, ley 27 de 1879, ley 27 y 88 de 1880, ley 87 de 1881, ley 59 de 1884, ley 77 de 1886, ley 4 de 1888 y ley 30 de 1890.

82 Ley 105 de 1876 y ley 71 de 1880

83 Ley 59 de 1884 y ley 52 de 1890

84 Ley 54 de 1896.

Llevados de la fiebre de un progreso exagerado, que más que natural desarrollo, es consecuencia de nuestra impaciencia y consiguiente inconsistencia, nos lanzamos en la construcción de vías férreas que, iniciadas, unas murieron, como las del Ferrocarril del Norte, Puerto Wilches, Ferrocarril Brown, etc., y en otras apenas se construyeron algunos kilómetros y se suspendieron, como el del Cauca y Antioquia, habiéndose gastado en todas cuantiosas sumas de dinero.

En mi concepto si esos recursos se hubieran empleado en mejorar nuestros caminos de herradura y en construir carreteras, el país habría desarrollado industrias y riqueza que hoy nos permitirían la construcción de vías férreas con nuestros propios recursos⁸⁵.

Efectivamente, después del ferrocarril de Panamá, construido entre 1849 y 1855, ningún otro ferrocarril se construyó en el país hasta 1869, cuando se dio inicio al ferrocarril entre Barranquilla y Puerto Salgar, puesto en servicio dos años después. A partir de entonces la fiebre por este sistema de transporte invadió a las autoridades de todo el país y, al margen de los inconclusos caminos, se dio inicio a la tarea de armar una red ferroviaria concebida a partir del mismo modelo: unir las zonas de mayor productividad económica con los puertos fluviales y marítimos. Las primeras líneas buscaban conectar Medellín con Puerto Berrío (1874), Cúcuta con Zulia (1878), Buenaventura con Cali (1878), Santa Marta con Ciénaga (1882), Bogotá con Girardot (1885), Cartagena con Calamar (1891) y La Dorada con Honda (1882), entre otras⁸⁶. Sin embargo, en 1898 solo unos 550 kilómetros del total de las vías férreas proyectadas estaban en funcionamiento⁸⁷.

Rutas y caminos en el Estado Soberano del Cauca

Si a escala nacional el panorama no era halagador, en las regiones de un país en formación las cosas eran sombrías. El Estado Soberano del Cauca, resultado de la Constitución federalista de 1858, necesitó muchos años para su consolidación política y territorial. En la segunda administración del general mosquerista Julián Trujillo, entre 1873 y 1875, se expidió la ley 69 de 1874, *Sobre caminos*⁸⁸, una de las primeras que intentaba organizar el

⁸⁵ República de Colombia (1888, III y IV).

⁸⁶ Poveda (1993).

⁸⁷ Melo (1997: 129).

⁸⁸ *Registro Oficial del Cauca* (a partir de ahora ROC), 19, diciembre 13 de 1874.

complejo ramo de las vías al interior del Estado. Mediante ella, se decretaba que tanto los fondos destinados a su construcción como todo lo relativo al fomento de las vías públicas quedaba a cargo de una Junta Central de Caminos afincada en Popayán y respaldada por juntas locales de orden municipal; entre las funciones de la primera estaban fijar las bases para los contratos de apertura, reparación o conservación de las vías de comunicación, dejando a las subalternas una función más de tipo fiscalizador.

En la misma ley se clasificaban las vías públicas en principales, secundarias y municipales, siendo las primeras aquellas que el Estado se reservaba para su exclusiva propiedad y a su propia costa en virtud de su importancia estratégica: no es extraño que entre ellas se contase la llamada Vía Central que partía de la frontera con Ecuador y atravesaba Pasto, Patía, Popayán, Santander, Palmira, Buga, Tuluá, Cartago y Ansermanuevo, desde donde se dirigía a Nóvita y Quibdó, y se unía con el río Atrato hasta su desembocadura en el golfo del Darién. También se encontraban entre ellas *todas las que atraviesan el territorio de cuatro o más municipios*, las que atravesaban la cordillera Occidental en busca del litoral Pacífico y las que, cortando la cordillera Central, comunicaban la región con Tolima y Antioquia. Las vías secundarias se definían como aquellas *que interesaban al menos a tres municipios*, quedando clasificadas entre ellas la que desde Popayán iba a Cali por Buenos Aires y luego continuaba desde la futura capital hacia Yumbo, Yotoco, Roldanillo, Toro y Ansermanuevo.

Importante también en el acto legislativo de 1874 era el tema de los fondos destinados al ramo de los caminos, los cuales se alimentaban de muy diversas fuentes: el 9% de la totalidad de las rentas del Estado; las apropiaciones municipales, que equivalían al 3% de sus ingresos; los auxilios nacionales; las multas; las donaciones particulares; y los pontazgos, principalmente. A su vez, se determinaba la manera en que tales cantidades debían invertirse privilegiando las vías que para entonces se consideraban de primera necesidad para los intereses generales: el camino del Castigo entre Pasto y Popayán, el de Túquerres a Baracoas, el de Guanacas en comunicación hacia el Tolima, el del Quindío, y por supuesto el que desde Juntas de Tamaná conducía al valle del San Juan y desde allí al Atrato.

En cuanto a la construcción de puentes, la ley fijaba que el producto de los pontazgos debía destinarse a la conservación y mejora de aquellos que permitían su recaudo y de los cinco miriámetros de la vía inmediata. Como en los caminos, las obras podrían asumirse por el sistema de administración *contrata general* (a precio global), *contrata parcial* o *privilegio*; en cualquier caso, el contratista debía garantizar la calidad de sus trabajos por espacio de 15 años.

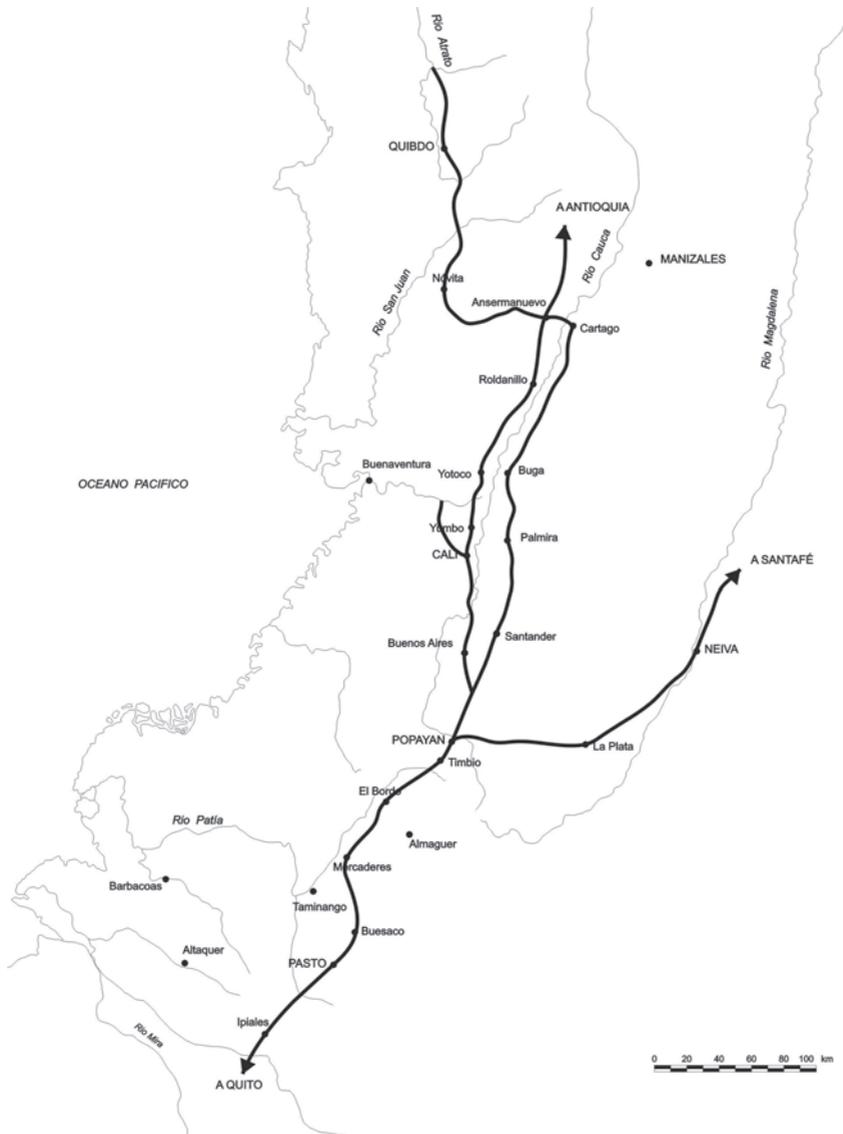


Figura 1.10 Mapa de los caminos decretados por la Ley 69 de 1874.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, antes de doce meses aparecería una nueva ley que modificaba y complementaba la de 1874. Mediante la número 25 de 1875, *Sobre vías de comunicación*, se clasificaban de nuevo los caminos, aunque se conservaban las rutas previamente determinadas, y se establecían prioridades para la construcción de un conjunto de puentes, los cuales deberían hacerse *de madera sobre estribos de piedra o calicanto, y cubiertos a la manera del construido sobre los ríos de Piendamó y Palo*, en el siguiente orden: sobre el río Quilcacé, entre Popayán y Pasto; sobre el río Mondomo, entre Popayán y Santander; sobre el río Ovejas *en el punto más conveniente entre Morales y Buenos Aires*; sobre los ríos La Paila, Güengüé y Desbaratado en el camino que une Santander con Palmira; sobre los ríos Amaime, Fraile, Tuluá, Bugalagrande, La Paila, Las Cañas y las quebradas La Honda y El Mico; sobre los pasos de los ríos Buesaquito, Sapuyes, Carlosama y Carchi, en la vía de Popayán a Ecuador; sobre el río Risaralda, entre Ansermanuevo y Ansermaviejo; y sobre el río Guachico-no, en el paso de Quiteto, entre Popayán y La Cruz.

Con este marco legal, el Estado Soberano del Cauca, a través de la Secretaría de Hacienda, se dio a la tarea de acometer trabajos tendientes a abrir nuevas vías o simplemente mejorar aquellas de las que disponían, para lo cual casi siempre era necesario contratar con particulares ya que la dependencia oficial no disponía ni del personal calificado ni de los recursos técnicos. Hay que decir, sin embargo, que en muchas ocasiones los contratistas particulares tampoco gozaban de ese patrimonio, aunque sí de una gran capacidad de persuasión y, por supuesto, de amistades influyentes en las esferas del Gobierno local y central que les permitían acceder de manera fácil a los contratos.

En lo relacionado con el estado de los caminos en la región del alto Cauca, no ha sido posible contar con un documento oficial que los describa de manera íntegra; solo algunos relatos fragmentarios consignados por viajeros o expedicionarios permiten formar una idea más o menos clara acerca de sus reales condiciones. Por ejemplo, la obra del norteamericano Isaac Holton⁸⁹ es un valioso registro del estado de las vías en Colombia en el inicio de la segunda mitad del siglo XIX, en especial en el valle del río Cauca, gracias al detallado relato que hace del recorrido entre las ciudades de Cartago y Cali. Incluso su propia afirmación: *...nunca dejo de mencionar los puentes por donde paso...*⁹⁰, constituye un buen precedente para tener en cuenta sus descripciones.

89 Holton (1981).

90 *Ibid.*, 412.



Figura 1.11 Mapa de los puentes por construir conforme a la ley 25 de 1875.
Fuente: Elaboración propia.

Holton había llegado a Colombia en agosto de 1852 tocando los puertos de Santa Marta y Barranquilla para tomar desde allí curso por el río Magdalena en busca de la sabana de Bogotá. En la capital permaneció hasta mediados de enero del año siguiente, cuando inició su travesía por las tierras del Tolima, pasando por Melgar, El Espinal, Coello e Ibagué para luego tomar el difícil camino del Quindío que lo conduciría hacia Cartago, donde llega a fines de ese mismo mes. Su interés por la flora y la fauna de la región lo distrae constantemente hacia aspectos de la vida cotidiana de manera que, a lo largo de todo su viaje hacia el sur bordeando el río Cauca e incluso atravesando en varias ocasiones su cauce, insistirá en las condiciones materiales de la región. De manera general, sobre el estado de los caminos afirma tajantemente:

En nueve meses que permanecí en el Cauca solo recuerdo haber visto construir un puente peatonal y nunca ví que se invirtiera ningún dinero o se trabajara en el sostenimiento de caminos...⁹¹

Sobre las enormes dificultades que producen los innumerables ríos y arroyos que descienden de las cordilleras en busca del río Cauca, escribe:

Los atascaderos del Valle del Cauca son tremendos y echan a perder el placer del viaje. Muchos de ellos son corrientes de agua con las ruinas de un puente encima, pero si uno los logra cruzar los olvida rápidamente, mientras que los lodazales se siguen recordando todo el tiempo⁹².

Desde su llegada a Cartago, el panorama aparenta ser desolador:

...pasamos uno de los numerosos puentes que cruzan los arroyos y zanjas que tanto abundan en las llanuras circundantes. La vieja estructura de madera se había roto al pasar la mula de carga de un caballero...⁹³

Y páginas más adelante, cuando relata con detalle su recorrido desde Cartago hacia Tuluá, afirma:

Pasamos el río de los Micos por un puente descubierto y bastante respetable, de hecho el único en toda esta región que puede soportar el peso de un caballo⁹⁴.

91 *Ibid.*, 394-395.

92 *Ibid.*, 483.

93 *Ibid.*, 403.

94 *Ibid.*, 412.

Sin embargo, también se sorprende enormemente cuando al salir de Libraida (hoy Zarzal) reconoce un puente hecho con guaduas cuyo proceso constructivo describe en detalle:

De nuevo nos internamos en un bosque por cuyo límite corre el río La Paila, el más grande que se encuentra después de salir de Cartago. Corriendo algún peligro lo crucé diagonalmente y contra la corriente, pues aquí, por lo general, los caballos no nadan con el jinete encima. Desde entonces construyeron un puente de guaduas para peatones.

El sitio mejor para hacer un puente de guadua es donde haya un árbol grande cuyas ramas se extiendan sobre el río. En la orilla se clavan muchas guaduas altas y delgadas una al lado de la otra, de tal manera que los tallos se proyecten hacia arriba y encima del río. Si es necesario se añaden otras guaduas a las primeras hasta que las puntas se puedan doblar y entretrejer un arco, que cualquier arquitecto podría imitar con provecho. Claro está que el puente queda mucho más estrecho y delgado en el centro porque las guaduas se adelgazan en los extremos superiores. Sobre el arco colocan un piso de láminas de guadua, a veces le añaden un pasamanos y aseguran la estructura con bejucos amarrados a las ramas del árbol que están sobre el agua. De tal manera que todo el puente es de tallos atados con bejucos y para construirlo no se necesitan taladros, ni cinceles, ni serruchos, ni clavos⁹⁵.

A las corrientes naturales de agua que debían vadearse, se sumaban las obras artificiales de irrigación haciendo más intransitable el camino, en especial si la misma iniciativa privada era incapaz de resolver el problema del cruce de sus cauces. En su recorrido desde Tuluá a San Pedro, Holton describe lo siguiente:

Desde entonces he vuelto a pasar por ese camino y lo único que puedo decir es que es terrible cruzar por la noche esos arroyos llenos de barro. En realidad, la mayoría son acequias construidas para irrigar los campos y llevar agua a las casas. La ley ordena que los propietarios de acequias construyan puentes para cruzarlas pero tan pocos la cumplen, que no recuerdo más de uno o dos puentes⁹⁶.

También relata la presencia de otros puentes de madera con pisos hechos de troncos sobre los cuales se apisonaba un tendido de tierra:

95 *Ibid.*, 440.

96 *Ibid.*, 525.

Viniendo de La Ribera, tuve que pasar por la población que está al sur del río Tuluá, el cual se cruza por un puente largo, alto, estrecho y sin barandas. Está hecho con troncos puestos uno al lado del otro entre las dos orillas, y a veces con tierra encima. Cuando uno de los palos se quiebra, corren los otros y por eso el ancho del puente varía todo el tiempo. Mucha gente no se atreve a pasarlo a caballo, a pesar de que de día los puentes estrechos son por lo general seguros, a menos que el caballo sea tuerto⁹⁷.

En su trayecto hacia la ciudad de Cali, Holton cruza el río Sonso luego de pasar por Buga y se desvía hacia El Cerrito en lugar de tomar el camino del llamado Paso de La Torre, que era hasta en tiempos de inundación un lugar seguro para alcanzar la margen izquierda del río Cauca. En su paso por el río Sabaletas identifica nuevamente una estructura de guadua:

Nos detuvimos un rato en una venta a orillas del río Sabaletas, río bastante grande sobre el cual hay un puente de guadua. Se requiere valor para aventurarse a cruzar esta débil construcción, aunque algunos dicen que es lo bastante fuerte para resistir el paso de una mula...⁹⁸

Y luego de permanecer en Palmira por espacio varios días, se dirige hacia Cali *por el peor de los caminos del mundo* para atravesar el río Cauca probablemente en el sitio denominado Paso del Comercio:

¡Por fin llegamos al paso del río! Subimos las monturas a la barca, tomamos la brida de los caballos y nos alejamos de la playa. Los hombres reman, los animales chapucean y atravesamos diagonalmente el río hasta la orilla occidental del Cauca, dejando la provincia de este nombre y entrando en la de Buenaventura⁹⁹.

Ya desde la futura capital, Holton exalta las condiciones materiales del puente Ortiz sobre el río Cali, del cual afirma es el mejor y más largo de los que conoció en su recorrido: construido sobre siete arcos de ladrillo bajo la dirección de fray Ignacio Ortiz, había remplazado un precario puente de guaduas que tal vez se asemejaba a la estructura que él mismo había descrito antes en su paso por Zarzal¹⁰⁰.

97 *Ibid.*, 524.

98 *Ibid.*, 538.

99 *Ibid.*, 541.

100 Hincapié (2000).



Figura 1.12 Mapa de los recorridos de Holton, Mollien y Hamilton por el valle del río Cauca.
Fuente: Elaboración propia.

Otro revelador testimonio, pero esta vez sobre la ruta entre Cali y Popayán, que se desarrolla en los primeros años de vida republicana, es del francés Gaspard-Théodore Mollien, quien cubría en 1823 la ruta de Guanacas, entre Santafé y Popayán, para desde allí dirigirse hacia el puerto de Buenaventura¹⁰¹: en su recorrido logra describir el puente sobre el río Cauca a la salida de Popayán y llegando un poco más al norte menciona su paso por Tunía y la existencia de dos puentes sobre los ríos Pescador y Ovejas. Luego de su paso por Mondomo, Quilichao y Caloto, dobla a la izquierda para atravesar la laguna de Taula (que equivocadamente confunde con un río) y, finalmente, el río Cauca, quizás a la altura del paso de La Bolsa:

*El curso de este río es tranquilo y por aquí es poco ancho; lo pasamos en piragua y continuamos en dirección a Cali; a las tres de la tarde llegamos a Jamundí. Ya era de noche cuando entramos a Cali...*¹⁰²

Luego de su estancia de seis días en la capital provincial, Mollien retoma el difícil camino hacia el occidente en busca del puerto de Buenaventura:

*La primera jornada fue más bien corta; los caminos eran tan estrechos y resbaladizos que había que caminar muy despacio; ya se acercaba la noche cuando bajamos a un vallecito donde había una casa muy bonita conocida con el nombre de La Portera. El Dagua nace a poca distancia de allí*¹⁰³.

Pocos años después, en 1827, el inglés J. P. Hamilton¹⁰⁴ hacía una ruta similar: llegado a Popayán desde La Plata, toma rumbo norte cruzando las poblaciones de Piendamó, Mondomo, Quilichao, Japio, El Bolo, Llanogrande, Buga, Tapias, Las Lajas y Cartago pues su escaso interés por la ciudad de Cali y las dificultades que otros le relatan acerca de atravesar el río Cauca le llevan a circular por su margen oriental. Lastimosamente sus descripciones no tienen el grado de detalle que se encuentra en Mollien o Holton.

En 1855, cuando ejercía como gobernador de la provincia de Buenaventura, Tomás Cipriano de Mosquera obtuvo del ingeniero Agustín Codazzi un informe relativo al camino que podría comunicar a Cali con el puerto sobre el Pacífico, acompañado del *Mapa de las provincias del*

101 Mollien (1992).

102 *Ibid.*, 308-309.

103 *Ibid.*, 311.

104 Hamilton (1955).

*Cauca y Buenaventura*¹⁰⁵ que representa el valle geográfico del río Cauca entre las poblaciones de Quilichao y Riofrío, además de la zona comprendida entre la cordillera Occidental y el Océano Pacífico. En él se aprecia claramente la totalidad de la incipiente red vial con que contaba la región a través de la cual se comunicaba Caloto con Tuluá por la margen derecha del río Cauca atravesando los ríos Palo, Güengüé, Tiple, Fraile, Bolo y Amaime, entre otros, así como las conexiones con la margen opuesta a través de los pasos de La Bolsa, La Balsa, Cifuentes y La Torre. Conforme a este plano, no existía un único camino sino más bien una serie de ejes transitables por los que se optaba en función de los intereses del viaje, las condiciones del clima y el nivel de las inundaciones causadas por el río Cauca.



Figura 1.13 Versión del mapa realizado por Agustín Codazzi (1855) de algunas de las provincias del Cauca y Buenaventura. Se ha hecho una copia eliminando las sombras que representan las cordilleras y algunos textos y convenciones situados en la parte inferior izquierda del original a color que se encuentra en el Museo Nacional de Colombia.

105 El original reposa en el Museo Nacional de Colombia. Una reproducción se encuentra publicada en Antei (1993: 102); en el Fondo Documental del CITCE, Universidad del Valle, hay una versión facsímil copiada por Olimpo Gallo.

De fecha más tardía es el breve testimonio del alemán Friederich von Schenk¹⁰⁶, quien viaja entre Manizales y Cali en diciembre de 1880 y un mes después se dirige hacia Popayán. De la primera parte de su viaje, escribe:

El 27 de diciembre salimos de Cartago. El camino era difícil de encontrar... En la época de lluvias, durante semanas es imposible o por lo menos peligroso viajar por aquí, en la época de verano solo con mucho cuidado se pueden cruzar las casi secas zanjas cuya superficie está cubierta con un delgado manto de hierbas engañosas, ya que debajo de él se encuentra una arcilla pegajosa de grueso espesor, en la cual se hunden los caballos hasta el pecho... Los anchos ríos La Onda, El Mico y La Paila, que por esta época están casi completamente secos, exigen en tiempo de lluvias numerosas víctimas. (Entre Cartago y Tuluá no existe un solo puente). El primero que se encuentra es uno de guaduas cerca de Tuluá, pero tan peligroso que preferimos pasar a caballo el aquí bastante profundo río. Los viajeros muchas veces tienen que interrumpir por algunos días su viaje en alguna orilla de las tormentosas aguas salvajes, esperando que al bajar el nivel permitan el paso de los animales de silla y carga.

... El primero de enero de 1881 llegamos a Cali¹⁰⁷.

En lo concerniente al trayecto de Cali a Popayán, Von Schenk confirma claramente la existencia de dos rutas: una que tomaba por la población de Quilichao atravesando el río Cauca en el paso de La Bolsa, y el de Buenos Aires, que finalmente adopta, el cual cruzaba el río Cauca en el paso de La Balsa.

De su experiencia narra lo siguiente:

El 26 de enero de 1881 salí de Cali en dirección a Popayán... Al sur de Cali se extiende por muchas horas un llano sin árboles en el cual se cruzan los caminos en todas direcciones. Cerca del pueblo de Jamundí, donde se desprende el camino hacia Quilichao, estuvimos varias horas extraviados, y más tarde perdimos todavía varias veces el camino... Así, llegamos muy de noche a Buenos Aires. En la segunda jornada, bastante corta debido al intenso calor, llegamos hasta el río Aganche, pasando unas lomas muy estériles y sin agua, no muy lejos del puntado cerro cónico, La Teta, a cuyo pie se encuentra una mina de oro en función... El tercer día de viaje alcanzamos el río Piendamó, que

106 Schenck (1953).

107 *Ibid.*, 54-56.



Figura 1.14 Mapa de la ruta seguida por Von Schenk a través del valle del río Cauca (1881).
Fuente: Elaboración propia.

tiene en su parte superior interesantes cascadas. También entre los ríos Aganche y Piendamó se encuentran muy escasamente agua y bosques, predominando el rastrojo bajo sobre las lomas, entre las cuales pasa el camino... El 29 de enero llegamos a Popayán¹⁰⁸.

Finalmente, el único relato del siglo XIX con carácter eminentemente técnico referente a la ruta entre Cali y Popayán que se ha podido conocer corresponde al que escribió el ingeniero Aquilino Aparicio en 1873¹⁰⁹, contratado por el Estado Soberano del Cauca para hacer una exploración y trazado del llamado Camino de Occidente, entre ambas ciudades, pasando por la población de Buenos Aires y la hacienda Calibío luego de cruzar el río Cauca en el paso de La Balsa¹¹⁰.

Conforme al contrato, Aparicio se comprometía a hacer *una exploración científica*, cumpliendo las siguientes obligaciones:

Trazará la línea sobre el terreno desde la hacienda de Calibío hasta donde el río Cauca sea navegable, buscando el menos desnivel posible... Hará la exploración de la línea que, partiendo de la ribera occidental del río Cauca, en el punto que se halla al frente de la población de "Paneso" va a dar a la loma de "Las Cañas"... formando un presupuesto... para compararlo con el que en su concepto, exija la composición de los actuales callejones conocidos con el nombre de "La Balsa". Examinará el camino que hoy existe entre el río de "Las Cañas" y "Rioclaro" para determinar las variaciones que deben hacerse... En el caso de que al explorar la vía, prefiera la denominada de "Gelima" pasando por el río Cauca, para trazarla por la cordillera occidental, formará el proyecto de presupuesto del puente... que sea necesario¹¹¹.

En compañía de Marcos Vergara, un *práctico en topografía*, Aquilino Aparicio hace un primer recorrido de la ruta entre Cali y Cañas Gordas a través de terrenos pantanosos que precedían la llegada a Jamundí para luego cruzar los ríos Claro y Las Cañas hasta *al sur de la isla que está al frente de la población de Paneso*¹¹², lugar donde debía trasladarse la barca

108 *Ibid.*, 58-59.

109 Aquilino Aparicio había nacido en Buga en 1851. Se tituló de Ingeniero en Bogotá y ejerció la docencia en su ciudad natal y posteriormente en Cali. Ejercería varios cargos públicos al servicio del Estado del Cauca y la Gobernación de Popayán. Falleció en Topaipí en 1921.

110 *ROC*, 19, diciembre 13 de 1873.

111 *Ibid.*

112 En la cartografía más reciente no aparece registrada la población de Paneso. Sin embargo, conforme al plano IGAC 320-II-B-Cauca de 1950, la quebrada llamada Paneso desemboca en el río Cauca sobre una madre vieja que presenta una formación en forma de isla, pocos metros al norte del puente de Timba sobre el río Cauca, construido en 1925. Ver Galindo (2003).

cautiva para aprovechar el camino existente al sur de esta población, *encontrando á muy poca distancia el camino actual*. Pero el camino podría acortarse aún más cruzando el río Cauca por el punto denominado El Poso, otra opción para la reubicación de la barca que existía en el paso de La Balsa.

Para Aparicio, el camino denominado Callejones de la Balsa, no era otra cosa que un conjunto de *lodazales horrorosos cubiertos por el monte y cuya composición será demasiado costosa alargándose en gran manera el camino...* Por tanto, proponía cruzar el Cauca, bien en Paneso, bien en El Poso para buscar desde allí el camino a Buenos Aires que lo conectara con Mondomo siguiendo el curso del río Teta y desde allí dirigirse a Popayán por el camino que cruzaba antes a las poblaciones de Pescador, Tunía y Piendamó. Esta ruta, que aún existe, era una alternativa al llamado camino de Gelima (o Jelima) que desde Jamundí continuaba por la margen occidental del río Cauca hasta llegar a la actual población de Suárez para desde allí cruzar el río y ascender hasta Morales y Piendamó¹¹³.

Otro fin de la expedición de Aparicio era explorar una ruta alterna para llegar desde la orilla del río Cauca a Popayán. Para ello, partía de un punto situado junto a la desembocadura río Asnazú, *que es hasta donde puede ser navegable el río Cauca, y continúa por esa margen, por las vegas del Cauca en terreno plano, muy seco y libre de inundaciones*. Encuentra luego la desembocadura del río Inguító, el cual *se divide en dos brazos demasiado correntosos; el primero tiene 16 m de ancho y el segundo 14 metros...* Y piensa que... *sobre este río puede construirse económicamente un puente de madera...* Concluye que es posible cruzar el río Cauca por el estrecho que se formaba a poca distancia de la desembocadura del río Piendamó mediante un puente de cal y canto, de por lo menos tres arcos teniendo cada uno de ellos doce o catorce metros de luz o abertura. También propone la construcción de otro puente de arco sobre el río Piendamó por la buena calidad de las arcillas del entorno. Superado este último, se asciende el alto de Michinchal, toma dirección sudeste, pasa por el alto de La Lagunita hasta encontrar el río Cajibío, atraviesa las quebradas de Carrisal, Guanguvivo y el río Palacé, terminando en la hacienda Calibío.

No se tiene constancia de las consecuencias prácticas de la expedición de Aparicio, aunque sí está documentado que un año después, para abril de 1875, el ingeniero caucano había construido 775 metros de camellones dotados de alcantarillas de manera que en su recorrido *no lo rieguen las inundaciones producidas por el derrame de las aguas de los ríos Cauca*

113 El mejoramiento de esta ruta sería sacada a licitación en 1881 por la administración caucana, con el fin de *servir más tarde para rieles*. Ver ROC, 154, octubre 8 de 1881.

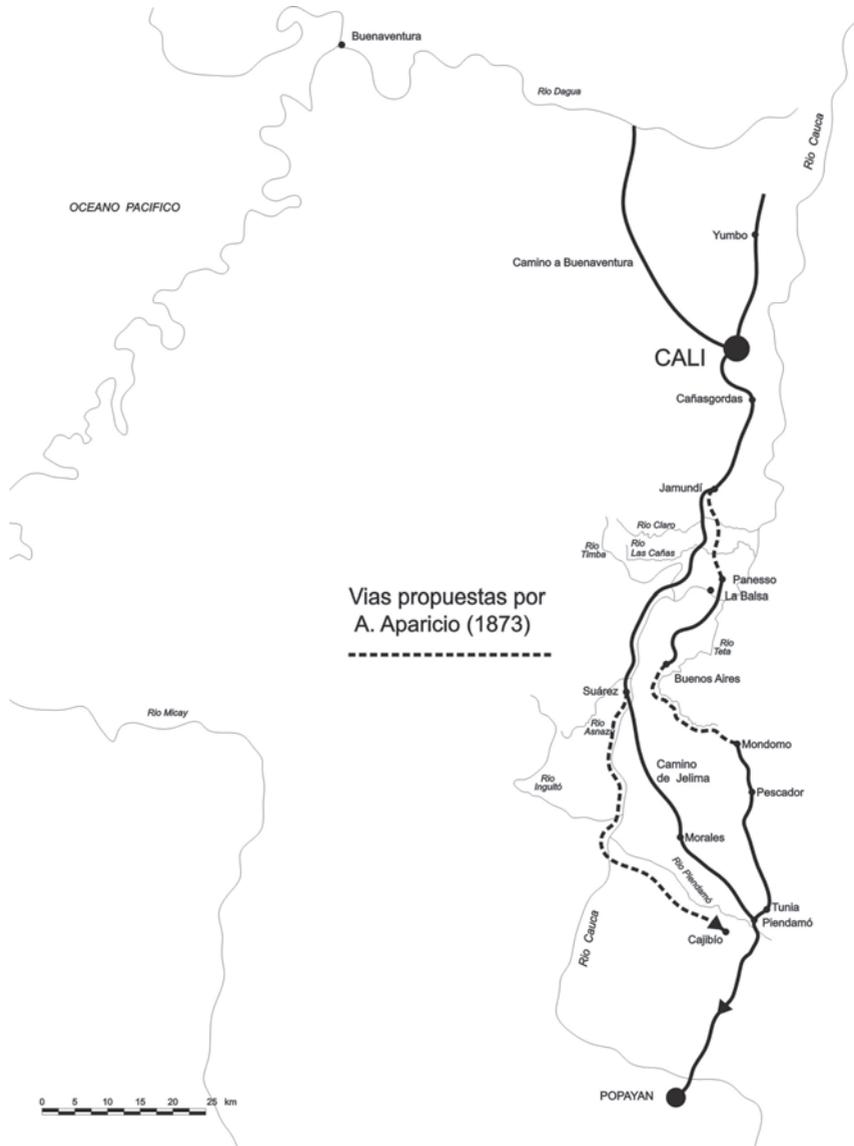


Figura 1.15 Mapa de las rutas exploradas por el ingeniero A. Aparicio en 1873 entre Cali y Popayán.
Fuente: Elaboración propia.

y *Timba*, y se había trasladado la barca cautiva sobre el Cauca al sitio de Paneso¹¹⁴. Solo diez años después se ordenará por decreto la construcción de puentes sobre los ríos Las Cañas y Río Claro en el trayecto hacia La Balsa; en 1892¹¹⁵ el Camino de Occidente será rectificado gracias a un desvío practicado en el río Ovejas, sobre el punto denominado Aganche, *haciendo el pedazo de camino que une en la ribera izquierda el puente de hierro colgante con el camino Nacional, en una extensión de trescientos cincuenta metros lineales...*¹¹⁶ El puente, construido en 1891, había estado a cargo de Cenón Caicedo, otro de los ingenieros locales que perpetuará su existencia a través de numerosas estructuras de alambre y madera, las mismas que empezarían a remplazar los viejos puentes de arco de ladrillo, sepultando en el olvido una tradición constructiva que no tuvo tiempo de madurar.

De Popayán hacia el sur, en busca de la comunicación con Pasto y Túquerres, y desde allí con el Ecuador, el llamado Camino del Castigo se convertiría en otra de las vías capaces de retar los ánimos de los más entusiastas. Si bien su existencia data del periodo colonial, como lo ha documentado Uribe (1995), la ley 69 del 6 de junio de 1871 impulsó su construcción. Gracias a ella, dos años más tarde, se celebró un contrato entre el Estado Soberano del Cauca y un tal Aparicio Mazorra con el fin de que este último realizase una inspección, la cual ha quedado registrada en detalle en un informe fechado en 1874:

*Desde el pueblo de Patía empecé a hacer observaciones generales con la exactitud que podía proporcionarme, repetidas en todos los puntos convenientes, que me diesen por resultado un plano que debía levantarse con una escala muy reducida, por ser muy grande la extensión del territorio que empezaba a reconocer*¹¹⁷.

Mazorra toma el camino entre las poblaciones de Patía y El Castigo a lo largo de 14 leguas¹¹⁸ de terreno sólido y plano, siguiendo la margen occidental del río también llamado Patía; se encuentra con la quebrada Cumbitara y el alto de El Rosal para luego transitar por una parte pantanosa que se inicia en Guadualito. Del momento de cruzar el río para dirigirse a Pasto, escribe:

114 ROC, 94, abril 17 de 1875.

115 ROC, 435 de septiembre 17 de 1892.

116 ROC, 892 de noviembre 16 de 1895.

117 ROC, 36, abril 11 de 1874.

118 Unos 78 km.

Figura 1.16 Carta de ruta para servir al general Tomás Cipriano de Mosquera en las campañas del Sur, litografiada por J. Desplanques en Santiago de Chile. Fuente: AGN, Mapoteca 6, No. 84.



*El paso del Patía, denominado “La Guasca”, es el que, desde hace muchos años ha servido para comunicarse del Castigo al municipio de Pasto. Por desgracia a este paso lo acompañan circunstancias fatales de tal magnitud, que traerían al comercio gravámenes, demoras y peligros. Se pasa por una tarabita de 88 m de largo...*¹¹⁹

119 ROC, 36, abril 11 de 1874.

Arribando a Pasto cuatro días después de iniciada su travesía y luego de pasar por las poblaciones de Taminango, Tambo y Genoy, Aparicio continúa en dirección a Túquerres:

Al hacer el reconocimiento de esta línea, tuve en consideración buscar la más corta de las tres que van a Panga: una que pasa en línea recta por el páramo de los Frailes, cerca del Azufra, y dos a los costados de esta bastante separados que pasan por los pueblos de Ancuya y Yas-cual¹²⁰.

A partir de esta expedición, en octubre de 1874, el Estado Soberano del Cauca contratará a Edmon Sammis, ingeniero práctico, para la construcción del camino, así como de los puentes, calzadas y demás obras necesarias que hubiese necesidad de hacer en él.

Alterna a la ruta de El Castigo era la de Mercaderes, descrita en 1875 por Edouard André (1884), quien luego de pasar por la población de San Francisco o El Bordo desciende hasta el valle del río Patía, cruza el río Guachicono, pasa por Mojarras, atraviesa el río Mayo rumbo a las poblaciones de La Unión y Berruecos para, antes de Pasto, pasar por el célebre puente sobre el río Juanambú, edificado sobre cinco arcos de ladrillo por el padre Serafín Barbetti pocos meses antes.

120 *Ibid.*



CAPÍTULO 2

Popayán, cuna de la tradición

A finales del siglo XVI la Gobernación de Popayán figuraba como la más extensa de las cuatro que había generado la conquista: Santa Marta, Cartagena, el Nuevo Reino y la misma Popayán. Sus límites jurisdiccionales cubrían casi la totalidad del occidente colombiano abarcando la franja de territorio comprendida entre las ciudades de Cartago y Pasto. En esta gobernación era evidente una fuerte tendencia a la especialización económica: mientras que en la región del valle geográfico y en los altiplanos del sur se establecía una economía agropecuaria¹, en algunas ciudades del norte, como Anserma, y en otras más meridionales, pero próximas al piedemonte de las cordilleras, como Caloto o Almaguer, prosperaba la extracción de oro en minas de veta o de aluvión. Estos dos rasgos tan propios hicieron de la región una unidad claramente diferenciada del resto del actual territorio nacional y demandaron desde entonces un sistema de transporte y comunicación, bastante eficaz para poner en contacto los frentes de producción entre sí y a estos con los centros del comercio. Sin embargo, al menos hasta el siglo XVIII, las divisiones políticoadministrativas tenían un marcado carácter patrimonial², más sujetas a decisiones familiares y de clase que a las de tipo social y colectivo.

La ciudad de Popayán asumió bien temprano su condición de capital mediante cédulas del 10 de marzo y 31 de mayo de 1540; cuatro años más tarde era sede del obispado y gracias a ser lugar de tránsito obligado de productos que venían hacia el interior, de Cartagena de Indias a Quito,

1 Valencia (1996a, 40).

2 Colmenares (1997: XVII).

fue adquiriendo valor estratégico y comercial. Al mismo tiempo la ciudad experimentaba un proceso de crecimiento urbano, verificado con el hecho de que, para finales del siglo XVIII, concentraba el mayor porcentaje de población en toda la Gobernación (13,72%)³, superando a la totalidad de la Provincia de Los Pastos (13,10%) y muy levemente a Cali (12,06%).

Paralelamente al desarrollo económico, Popayán también se fortalecía como centro administrativo y lugar de residencia de comerciantes y hacendados. Desde 1640 la ciudad contó con un colegio a cargo de la Compañía de Jesús⁴, donde se impartían cátedras de gramática castellana, latín, filosofía escolástica, entre otras, y en especial matemáticas. Funcionó hasta 1767 cuando la sanción de Carlos III confiscó los bienes de la comunidad religiosa⁵. En el Real Colegio Seminario, el nombre oficial de la institución, se educaron a lo largo de más de 125 años individuos llamados a constituir las elites caucanas, entre quienes se contaban personajes vinculados a la construcción de obras públicas. Es el caso de Jacinto de Mosquera y Figueroa⁶, encargado de edificar en 1713 el pequeño puente sobre el río Molino; Pedro Agustín de Valencia, quien levantaría a su costa el primer acueducto urbano y uno de los puentes de arco sobre el río Palacé; Francisco Antonio Arboleda, quien refaccionó el templo de Santo Domingo en 1748; José Marcelino Mosquera, a quien se debió la construcción del camino entre el centro de Popayán y el río Cauca, así como Manuel Cristóbal Mosquera y Francisco Basilio de Angulo, promotores de la construcción del puente de albañilería sobre ese mismo río en 1753.

La ausencia de estudios específicos sobre el contenido de los cursos impartidos en el Real Colegio Seminario de Popayán y la inaccesibilidad de sus fuentes dificultan establecer una correspondencia entre saberes impartidos y saberes aplicados –al menos en el campo de la técnica–. Sin embargo, es posible aventurarse a pensar que la presencia de libros de dibujo, geometría y matemáticas, hecho característico de las bibliotecas

3 April-Gnisset (1991: 317).

4 Aragón (1925: 33).

5 Para entonces la Compañía de Jesús contaba también con Colegios en Santafé, Tunja, Cartagena, Mompox, Pamplona, Honda, Buga y Santafé de Antioquia. Ver Silva (2002).

6 Aragón (1925: 33).

7 En el desarrollo del trabajo de campo que soporta esta investigación no ha sido posible ubicar de manera precisa el sitio donde existió (¿o existe?) el puente de arcos sobre el río Palacé. Tampoco se cuenta con información gráfica de la estructura, con la sola excepción de una pintura, obra del payanés José María Espinoza, que reposa en el Museo Nacional de Bogotá. En el cuadro, que ilustra la batalla del alto Palacé acontecida el 30 de diciembre de 1813 en inmediaciones del río, se observa, en el escenario de fondo, un bello puente de arcos.

jesuíticas en América⁸ y en el Nuevo Reino de Granada⁹, de alguna manera influyó sobre académicos y artesanos. Este último gremio, según Colmenares (1997), gozaba en la ciudad de un alto grado de integración con terratenientes y mineros, para quienes ejecutaban encargos de platería, pintura y carpintería, entre otros.

En 1782 se contabilizaban en Popayán gremios de once oficios diferentes, entre los cuales se mencionan los albañiles y los canteros, cada uno con cuatro integrantes¹⁰. Con toda seguridad, estos gremios participaron de una intensa actividad constructora en la ciudad durante gran parte del siglo XVIII, levantando desde sus cimientos destacados ejemplos de arquitectura civil, religiosa y doméstica, en especial poco después del terremoto de 1736, que obligó a la reconstrucción de no pocas edificaciones, entre las que se cuentan la llamada Casa del Fundador, construida por encargo de Diego Ibarra, y la Casa del Regente, ambas en ese mismo año. También se destacan la iglesia y el claustro de San Francisco (construidos hacia 1775 por el español autodidacta Antonio García¹¹), la iglesia de San José o de La Compañía (inicialmente encargada al jesuita alemán Simón Schenherr¹²), la iglesia y el convento femenino de La Encarnación (con intervención del constructor santafereño Gregorio Causí) y la iglesia del Carmen (concluida en 1744 también por Causí), entre otros¹³. No es difícil imaginar que en un ambiente tan fértil para la técnica constructiva, fuese un hecho más o menos común levantar un puente de arco de ladrillo.

Los primeros puentes de arco en Popayán

Desde su fundación en 1537 Popayán ha ocupado un pequeño valle enclavado entre las cordilleras Central y Occidental a una altura media de 1700 msnm, muy cerca de la bifurcación del sistema orográfico de los Andes ecuatoriales. De la cordillera Central desciende el río Cauca, que nace en la laguna y páramo del Buey, cuyo curso corre a una distancia de poco más de 5 kilómetros al norte del emplazamiento urbano en dirección

8 Gutiérrez (1972).

9 Silva (2002: 233), por ejemplo, identifica 8 libros de matemáticas en la biblioteca de la Compañía de Jesús en Santafé en 1767, que representan solo un 1% del total de la colección; sin embargo, en citas que el mismo autor hace de la correspondencia entre ilustrados neogranadinos, se mencionan autores como Benito Bails y Vicente Tosca.

10 Colmenares (1997: 225).

11 No hay claridad en torno al origen de García. Ver Gutiérrez, Vallín & Perfetti (1999); Arango (1989) y Sebastián (1964).

12 Quien habría llegado a Popayán procedente de Quito, según Arango (1989, 84).

13 Datos tomados de Téllez (1996).

este-oeste buscando cotas más bajas en inmediaciones de la cordillera Occidental. Al oriente de Popayán se levanta el cerro de la Eme, llamado así porque la figura que forma es semejante a esta letra, en el cual nace el río Molino, que transita por el borde norte de la ciudad hasta desembocar en las aguas del río Cauca.

Para un viajero cualquiera que se dispusiera a salir de Popayán con rumbo norte en busca de las tierras de Quilichao, Jamundí y Cali, ambos ríos eran obstáculos a salvar: una vez se dejaban atrás las primeras calles era necesario bajar la empinada cuesta llamada *del humilladero* para salvar allí el cauce del río Molino, y poco más adelante el torrentoso río Cauca, luego de transitar por un camino recto que para finales del siglo XVII estaba apenas arreglado con un empedrado que se mezclaba con el fango en épocas de lluvias. Es probable que sobre ambos ríos durante años existieran puentes provisionales de madera, cuya durabilidad estaba sujeta a los vaivenes del caudal máximo de sus aguas.

En 1698 llegaron las primeras solicitudes al cabildo para reparar el camellón y puente del río Molino¹⁴. El alcalde Alonso Ladrón de Guevara presentó cuenta de gastos y declaró insuficientes los fondos públicos disponibles para ello. Gracias a la donación de José Hurtado del Águila¹⁵ fue posible la construcción de un puente del cual no se tienen detalles, aunque sí hay certeza de que cinco años más tarde de haberse puesto la cimentación había desaparecido la totalidad de la estructura de cal y canto, por lo que los vecinos pidieron restablecer el viejo puente de madera.

Solo en 1718 se encargará de manera simultánea la construcción formal de dos puentes: esta vez se pedía también uno sobre el río Cauca (con bejucos y guaduas, con mano de obra de los indios encomendados al mismo Hurtado del Águila y Miguel de la Vega) y el del río Molino, a cargo de Cristóbal Mosquera:

*...para la puente del Molino se ha dado la providencia necesaria obligándose el Mestre de Campo Don Cristóbal de Mosquera a hacerlo con tal de que se le de solamente la cal necesaria y se regula su importe ser de cuatrocientos patacones...*¹⁶

Para el año de 1739 el puente sobre el río Molino estaba en funcionamiento y se demandaba que fuese reparado; otras adecuaciones datan de 1828, 1836, 1855, 1866, 1907 y 1928. El comienzo de su destrucción definitiva aconteció en noviembre de 1938 a causa de una fuerte crecida

14 AHC: Cabildo, julio 3 de 1698, t. 5, f. 17.

15 AHC: Cabildo, noviembre 13 de 1698, t. 5, f. 21v.

16 AHC: Cabildo, abril 23 de 1718, t. 9, f. 15.

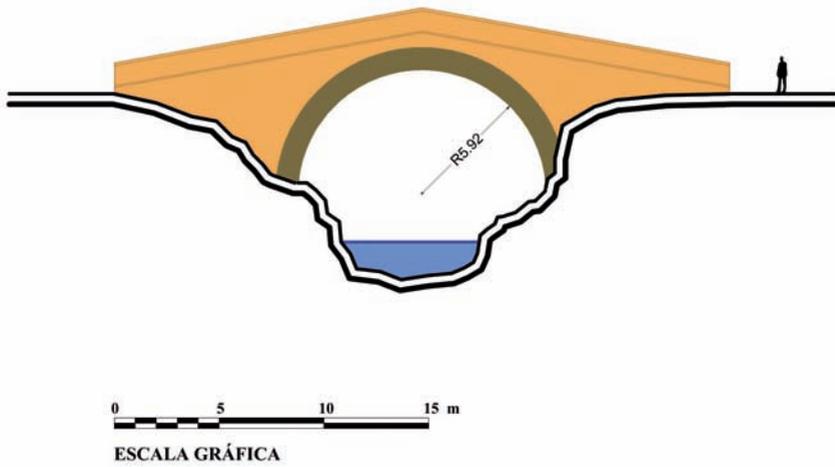


Figura 2.1 Alzada y foto reciente del puente sobre el río Molino en Popayán (1739).

Fuente: Elaboración propia.

del río, lo que dejó la estructura seriamente afectada. Este hecho, sumado al abandono oficial, causó su desplome definitivo el 30 de marzo de 1943. Cinco años más tarde se tomó la iniciativa de construir una réplica, liderada por el ingeniero Edgar Simmonds, entonces gobernador del Cauca, la misma que todavía existe.

El puente sobre el río Cauca es una estructura cuya génesis está contenida en varios documentos dispersos que permiten su reconstrucción parcial. En el Archivo de la Universidad del Cauca y bajo el título *Razón que da el Hermano Simón Schenherr de lo que se podría hacer en las casas del cabildo y cárcel de esta ciudad de Popayán para de algún modo darles gobierno y desahogo*¹⁷, existe un documento fechado en 1753 en el que queda claro que este sacerdote, quien firmaba como miembro de la Compañía de Jesús y *Maestro de Arquitectura*, participó, cuando menos, en la fase de diseño de la obra:

*Para la fabrica de la puente de Cauca ban dos dibujos, uno para puente de tres arcos de cal y canto, y otro para puente de madera con techo y texado. Mas fácil y varato será hacer la puente de cal y canto, y mucho mas durable que la de madera. Y para facilitar los costos se procure hacer el material de ladrillo y cal en el mismo llanito de Cauca haciendo dos galpones para ladrillo, y dos hornos, uno para cocer la cal y otro para el ladrillo... El puente se hará de tres ojos de a diez varas de hueco cada ojo, dos bastiones de a quatro varas para los arranques en medio del río y otros dos a las orillas de a dos varas con que quedan repartidas cuarenta varas que tiene de ancho el puesto donde ahora está la puente. Se tantea que con cien mil ladrillos y seiscientas piedras sillares de cantería, mil fanegas de cal está hecha la puente...*¹⁸

Los dos dibujos que anuncia Schenherr también se conservan, aunque equivocadamente se han clasificado como anteproyectos del puente llamado del Humilladero que data de la segunda mitad del siglo XIX. El primero de los dibujos contiene una alzada de un puente de madera con cubierta, levantado sobre cuatro pilas con tajamares triangulares en cada frente, dos de ellos cimentados dentro del agua. El tablero del puente se

17 AHC: Cabildo, *Razón que da el Hermano Simón Schenherr de lo que se podría hacer en las casas del cabildo y cárcel de esta ciudad de Popayán para de algún modo darles gobierno y desahogo*, Mss anónimo en *Libro de actas del cabildo de Popayán*, 1753, 3 ff., sin numeración, acompañados de 3 planos. Además de su propuesta para la construcción de un puente sobre el río Cauca, el sacerdote propone que para la casa del cabildo se levante una escalera en dos tramos y para la cárcel se abra una puerta y un zaguán reutilizando un local destinado como tienda que daba hacia la calle de Santo Domingo.

18 *Ibid.*, 2.

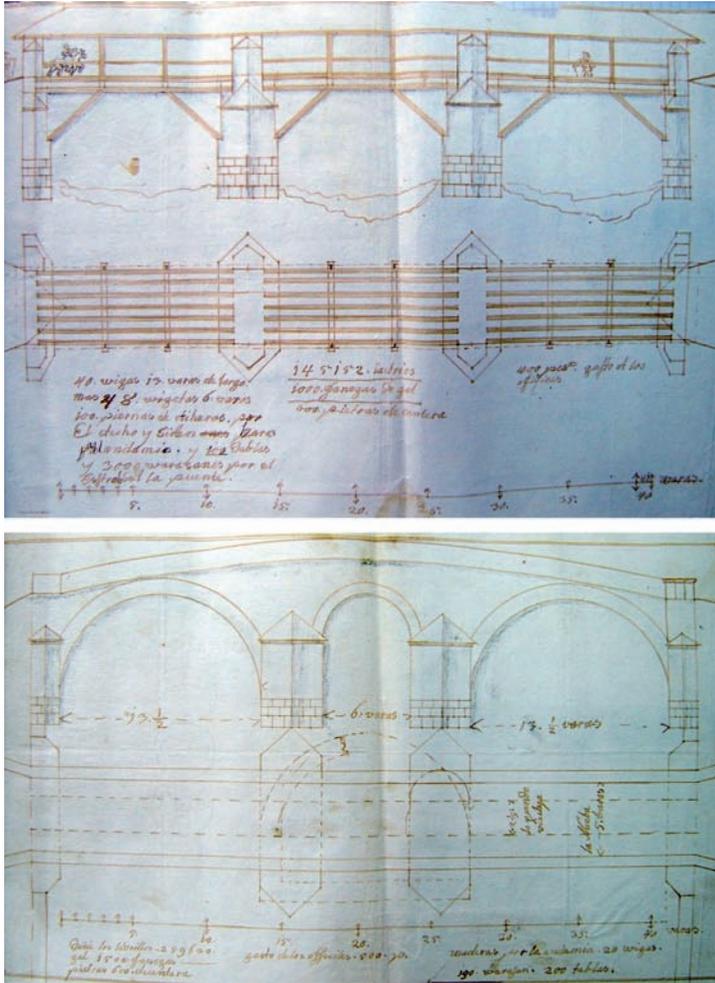


Figura 2.2 Arriba, primer proyecto de fray Simón Schenherr para el puente sobre el río Cauca en Popayán (1753). Abajo, segundo proyecto, mismo año.

Fuente: AHC, Cabildo, 1753.

repartía en tres luces y alcanzaba una longitud total de 40 varas castellanas¹⁹, armado sobre vigas longitudinales soportadas encima de los pilares mediante pie de amigos formando ángulos de 45°. Junto al dibujo se indican además algunas de las cantidades de obra necesarias para su ejecución: 145.152 ladrillos, 1.000 fanegadas de cal, 600 piedras de cantera, 40 vigas y 48 viguetas. El costo de la mano de obra se estimaba entonces en 400 patacones.

19 Una vara castellana podía medir entre 72 y 95 centímetros, dependiendo de la región. Comúnmente se dividía en 2 codos y 4 palmos y se puede asumir como una dimensión que en promedio equivale a 83,6 cm.

El segundo proyecto presentaba un puente de *cal y canto* de tres arcos: los dos extremos de 13,5 varas de diámetro y el central de solo 6 varas, apoyados también en 4 pilas con tajamares de igual geometría, dos de ellas asentadas en el fondo del río. El tablero presentaba una doble pendiente y según nota en el dibujo, tenía 5 varas de ancho. Las cantidades de materiales estaban representadas en 289.630 ladrillos, 1.500 fanegadas de cal y 600 piedras de cantera, además de 20 vigas y 200 tablas para los andamios. El gasto de los oficiales se estimaba ahora en 900 patacones.



Figura 2.3 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Cauca, en Popayán (c.a. 1769).
Fuente: Elaboración propia.

Por razones desconocidas, el puente no pudo hacerse siguiendo los diseños de Schenherr; tampoco se contó con su participación en la dirección de los trabajos. En otro documento de casi cien folios depositados en el Archivo General de la Nación²⁰ aparece el siguiente testimonio que

20 AGN: Fondo Documental Mejoras Materiales, sección Colonia, t. XIV: *Popayán: el cabildo de esta ciudad sobre que se apruebe el contrato de Francisco Torres para la construcción de un puente de cal y canto sobre el río Cauca (1769-1779)*, Mss, ff. 497-595.

evidencia el que en una primera etapa de los trabajos (iniciados en 1769) el puente colapsó en el momento de cerrar uno de los arcos de ladrillo por la falta de dirección técnica:

*...es cierto que en las otras ocasiones en que se ha emprendido hacer el puente ha contribuido voluntariamente el vecindario con muchos miles, y no habiéndolo logrado por la desgracia de haberse caído, por la falta de Artífice para su dirección...*²¹

Lo que se reafirma, folios más adelante, en el testimonio que brinda un tal Sebastián Valencia:

*...se ha considerado siempre preciso un puente sólido y se ha emprendido dos o tres veces a expensas del vecindario, una de las cuales llegó a cerrarse el arco aunque defectuoso, por falta de Director y oficial, y por tanto a pocos días se desgració...*²²

En los días de su terminación, seis años más tarde, se hace una descripción de las características formales de la obra:

*...por lo caudaloso que es el Río y que por su anchura y lo difícil de hacerse el estribo en el medio del Río a sido preciso hacerse el Arco de un solo ojo, el que tiene mas de veinte y una varas de claro y esta vien formado, y al parecer por su solidez permanente, cuia obra es nesessarissima, por ser el transito preciso del comercio de Cartagena, Mompox, Honda, Santafe, Provincia de Antioquia, Buga, Caly, Provincias del Chocó y otros muchísimos lugres anexos, muchísimas Provincias y que siempre que sus vecinos hayan de transitar para esta ciudad, la de Quito y demas partes deste Virreynato, les es indispensable el paso del Rio de Cauca, el que por lo caudaloso de el no permite bado aun quando este bajo, fuera de que frecuentemente esta despidiendo en el verano diarias crecientes por ser su origen de Paramo o Nevado, y tambien despide algunas en el invierno, por cuia necesidad, es como precisa un puente permanente, de cal y ladrillo, que es lo que se ha construido, por que lo que en actual uso se halla es de palos y su barca de maderas...*²³

Y más adelante:

...para su conocimiento, por la una parte del Arco desde donde se enrasa, asta donde va a concluirse la calzada, tiene noventa y tantas varas

21 *Ibid.*, 524b.

22 *Ibid.*, 527b.

23 *Ibid.*, 523 b.

*de largo, lo que lleva por cada lado una vara de grueso de cal y ladrillo y el relleno del medio de piedra, y que al principio del arco, desde donde nace el arranque, tendría de altura cosa de doce varas, desde cuia altura asta donde se remata, se a suavemente quebrantado para que se haga facil su subida...*²⁴

La construcción final habría estado a cargo de Francisco Basilio de Angulo y Josep Hidalgo de Aracena, de acuerdo con documento fechado en 1778²⁵, quienes reclaman el que se les reconozcan contribuciones para recuperar parte de lo invertido. Su financiación se logró gracias a los aportes privados de Jerónimo de Torres (quien donó la cal para el puente a cambio de diez matanzas de ganado por espacio de cuarenta años), José de Caldas y el propio gobernador José Ignacio Ortega. Pocos años después, Diego Arnoldo Nieto se encargaría de las reparaciones que demandaba el camino desde el puente sobre el río Cauca hasta la ciudad:

*La principal entrada de esta ciudad desde el puente de Cauca hasta sus mismas goteras que comprende una legua de terrenos, ha sido siempre de malísimo piso, formándose en los inviernos, que aquí son quasi de todo el año, unos lodazales que con gravísimas dificultades se transitan... La falta de medios ha imposibilitado su compostura, y solo han podido hacerse unos reparos provisionales en aquellos parajes que se hacían intransitables...*²⁶

Ya en servicio y durante décadas, el puente sobre el río Cauca fue siempre apreciado como uno de los mejores de la región y del país; por ejemplo, el coronel J.P. Hamilton lo mencionaba brevemente como parte de su recorrido desde la capital caucana hacia Cartago en 1827²⁷, justo antes de que ocurriese el terremoto que ese año afectó a Popayán causando la destrucción del templo de San Agustín y severos daños en el arco principal del puente, quedando este inutilizado. Se tiene constancia de que al menos en dos ocasiones obreros locales intentarían su reconstrucción pero sin resultado satisfactorio, debido a que en ambos casos, al retirar las

²⁴ *Ibid.*, 524.

²⁵ *Ibid.*, 513-516.

²⁶ AGN: Fondo Documental Mejoras Materiales, sección Colonia, t. XXIV: *Popayán: su regidor, José Marcelino de Mosquera, se hace cargo de la reparación del camino, desde el puente sobre el río Cauca, hasta la ciudad* (1798-1900), Ms, ff. 178-188.

²⁷ Hamilton (1955, 62/2), al salir de Popayán menciona la existencia del puente de ladrillo y a su paso por Mondomo, dice: *Al emprender camino al día siguiente, se nos mostró una posición atrincherada ocupada de tiempo atrás por un destacamento de tropas colombianas. Desde ella se dominaba el paso de un puente tendido sobre un río torrentoso y el acceso a las baterías que la defendían solo podía hacerse escalando rocas abruptas y escabrosas.*

cerchas de madera colocadas bajo la bóveda, los materiales descendieron y fueron arrastrados por el río. Trece años más tarde llegaría al país el ingeniero Estanislao Zawadski quien dirigiría los trabajos definitivos de reconstrucción del puente²⁸.

Zawadski era de origen polaco, había estudiado en París de 1835 a 1840 logrando el diplomado como ingeniero civil, arquitecto y profesor de artes; fue contratado por Manuel María Mosquera en 1841 para el estudio y construcción de varias obras públicas, entre las que siempre se ha destacado la de las vías del Dagua y Anchicayá en busca de comunicar al valle del río Cauca con el océano Pacífico; residió en Popayán y Cali siendo profesor en esta última ciudad del Colegio Santa Librada²⁹.

De otra parte, Tomás Cipriano de Mosquera en su trabajo geográfico impreso de 1866, describirá el puente sobre el río Cauca de la siguiente manera:

Entre los edificios públicos se debe mencionar un magnífico puente, que construyó la ciudad sobre el río Cauca, de una buena arquitectura y quizá el mejor que hai en toda la republica, tiene un solo arco rebajado para que pasen bajo de él las aguas del rio, de algo más de 19 metros de diámetro, y otros tres que solo sirven para igualar el terreno y dar nivel al puente³⁰.

En un testimonio mucho más tardío, Eder (1959) lo menciona anotando sus dimensiones y atribuyendo su carácter a la arquitectura española: *El puente es en realidad una maravilla de arquitectura antigua española, 50 pies (153 M.) de largo por 40 (12 M.) de ancho, sostenido por una serie de arcos³¹.*

Aún en pie y en servicio, el puente de arcos sobre el río Cauca no presenta alteraciones ni modificaciones sustanciales, como tampoco obras de intervención orientadas a mejorar su capacidad resistente. Sobre su tablero de pendiente única transita hoy un tráfico vehicular que alcanza las 50 toneladas mientras que su entorno inmediato se debate entre el abandono y el olvido.

28 La única información al respecto aparece contenida en una nota de prensa titulada "Mis impresiones de Popayán", firmada por Roberto Zawadski –hijo de Estanislao– y publicada en *Relator*, Cali, el 9 de enero de 1929, p. 4. En la misma nota se afirma que hasta el año de 1920 hubo sobre el puente una placa conmemorativa de la reconstrucción efectuada por Zawadski. Igualmente, se comenta que a esa fecha, el paso de vehículos sobre el puente ocasionaba fuertes vibraciones en la estructura y el desprendimiento de polvo de arena desde el intradós de las bóvedas.

29 *Ibid.*

30 Mosquera (1866: 265).

31 Eder (1959: 500).

Los años silenciosos

Durante el periodo comprendido entre los años de la independencia y el inicio del primer gobierno del presidente Tomás Cipriano de Mosquera, en 1845, hubo un estancamiento en la construcción de obras públicas en casi todo el territorio nacional. Los agudos conflictos internos que buscaban el reacomodo de las clases dominantes y la falta de recursos económicos capaces de costear nuevos proyectos de construcción se tradujeron en un periodo de inactividad y, por supuesto, de carencias. En la región del alto Cauca, las cosas no fueron nada distintas, como lo corrobora en 1840 el testimonio del gobernador de Buenaventura en su informe anual a la Cámara Provincial:

Caminos. Hace presente la gran necesidad que hai de abrir el camino de Cali a Buenaventura, como el vehículo para la exportación de los productos agrícolas: pone de manifiesto que la junta directora del camino no ha podido adelantar nada por las renunciaciones de sus principales miembros. Se han levantado varios puentes de cal i ladrillo en algunos puntos intermedios entre la capital i el distrito parroquial de Jamundí, i se habrían construido otros, si los respectivos alcaldes hubieran prestado los correspondientes presupuestos de gastos³².

Más al sur, en la provincia de Pasto, las cosas no eran distintas:

En la provincia no hai puente ninguno permanente i ni puede haberlo, atendiendo el jenio inquieto de los consuetudinarios anarquistas i su tendencia á la destrucción. La cámara ha decretado la construcción de los del Guáitara y Juanambú, obras que por fortuna hasta hoy no han sido ejecutadas, pero que están sus materiales preparados para cuando la paz de garantías de estabilidad³³.

Aunque las necesidades eran muchas, en ocasiones los proyectos se archivaban ante la falta de recursos, como ocurrió a la iniciativa de construir un puente sobre el río Ovejas en el camino entre Cali y Popayán. En otros casos no había interés de los contratistas para celebrar compromisos con el Estado o simplemente se optaba por la solución técnica más barata y de más rápida ejecución (los puentes de madera), aunque esta no fuese del agrado de los gobernantes:

La suerte del Cauca está en que tenga buenos caminos para la provincia del Chocó, para el puerto de Buenaventura i para la provincia de

32 *Gaceta de la Nueva Granada* (a partir de ahora GNG): Bogotá, No. 475, octubre 18 de 1840.

33 GNG, 481, noviembre 29 de 1840.

Cabal... Puentes i algunas calzadas son necesarias, i estas que sean de cal i ladrillo, porque de otros materiales a excepción de la piedra serán insubsistentes³⁴.

Sin embargo, en la primera mitad del siglo XIX se llevará a cabo en la región una obra pública de gran envergadura: el puente sobre el río Cali, construido entre 1835 y 1845 bajo la dirección de fray Ignacio Ortiz, quien había participado antes en la construcción de la iglesia de San Francisco (1827) y en la reconstrucción de la catedral de San Pedro (1835-1842), ambas en Cali³⁵.

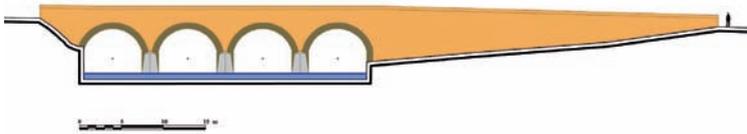


Figura 2.4 Alzada y fotografía reciente del puente Ortiz sobre el río Cali, en Cali (1865).
Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones que rodearon la decisión de construir el puente han sido bien documentadas por Hincapié (2000), quien además encontró documentos nuevos en el Archivo Histórico de Cali que certifican que los aspectos técnico-constructivos quedaron enteramente bajo las decisiones de Ortiz: en primera instancia decidió desviar la mayor parte de las aguas del río Cali por medio de la construcción de un nuevo cauce que se conocería con el nombre de Río Nuevo, para lo cual tuvo que contar con

34 GNG, 1087, noviembre 18 de 1849.

35 Buenventura (1957).

los permisos de los propietarios de los terrenos de la margen izquierda del río. Posteriormente, durante un periodo de siete años interrumpidos por problemas en el flujo de capitales, la obra de cal y canto fue erigiéndose mediante cuatro grandes arcos rebajados de 10 varas de diámetro cada uno, bajo los cuales pasaban las aguas del río. Los arcos se apoyaban en pilas de sección rectangular, dotadas a su vez de tajamares triangulares en cada lado. Complementariamente, cinco arcos de nivelación construidos sobre el costado norte daban al puente la pendiente necesaria para el tránsito de animales, carros y peatones y servían en caso de inundaciones. El ancho del puente era 6 varas. Los trabajos no estuvieron exentos de dificultades: en 1844, en un informe redactado por un tal Francisco Caicedo sobre la marcha de los trabajos, se deja constancia del colapso de uno de los arcos.

Cuando faltaba una tercia para concluir el cuarto arco del puente que se está construyendo en el río que corre a las inmediaciones de esta ciudad, una considerable avenida se llevó los puntales que sostenían las cerchas, cayeron estas i en consecuencia el arco³⁶.

Desde su inauguración, el puente despertó la admiración de muchos, entre ellos la de Holton, un viajero norteamericano del cual ya se hizo mención y que pasó por la ciudad de Cali hacia 1857, quien describió así el estado de la construcción:

En compañía a del señor Triana viajamos de Cali a Vijes para visitar unas minas, y con nosotros fue el administrador de estas. Cruzamos el río Cali por un puente de ladrillo; el más largo, el mejor y también el último que vi en la Nueva Granada. Es lo suficientemente ancho para dar paso a un carruaje, y descansa sobre siete arcos. Al contemplarlo, uno se olvida dónde está, pero al mirar las lavanderas a lo largo de las márgenes del río y los muchachos y muchachas que nadan un poco más abajo, recuerda que todavía está en la Nueva Granada³⁷.

Dos reformas recientes ha tenido el puente: la primera estuvo a cargo del ingeniero Julio Fajardo Herrera en 1918 y consistió en la construcción de andenes en voladizo a cada lado para usar con fines vehiculares la totalidad del ancho del tablero. Según Hincapié (2000), se dispuso para ello *de vigas transversalmente dispuestas en correspondencia con las pilas y los estribos*. Una segunda intervención, en 1945, a cargo del ingeniero Alfonso Garrido, amplió el ancho total del puente construyendo una estructura

36 GNG, 692, julio 18 de 1844.

37 Holton (1981: 551).

idéntica adosada y en hormigón simple que respeta la geometría de los arcos, reforzó los cimientos, construyó nuevos tajamares y amplió otra vez los andenes mediante vigas en voladizo.

En 1986 el puente quedó completamente cerrado al tráfico vehicular como parte de las obras conmemorativas de los 450 años de fundación de la ciudad.

Empresarios, ingenieros y artesanos

Lo más destacado de las leyes sobre caminos y vías de comunicación promulgadas por el Estado Soberano del Cauca en 1874 y 1875, respectivamente, era que, en su conjunto, respondían a una visión de orden territorial y no puramente coyuntural, como había sido la costumbre durante siglos. Sin embargo, en esos años los técnicos cualificados eran escasos en Colombia y aunque ya existía un marco de buenas intenciones, nadie sabía a ciencia cierta qué pasos dar para ponerlas en práctica. No obstante que la región, en particular Popayán, contaba ya con al menos dos buenos ejemplos de puentes de albañilería, los nuevos proyectos demandaban obras más acordes con los tiempos, en especial con la imagen que empezaba a promocionarse a lo largo y ancho del país a través del maravilloso invento del ferrocarril.

Fue entonces cuando apareció en la escena empresarial caucana el ciudadano norteamericano David R. Smith, quien había llegado a Colombia, más específicamente a Cali, en noviembre de 1871 en calidad de socio de Frank. B. Mónica, siendo ambos representantes de una sociedad anónima radicada en Peoria, en el estado de Illinois, Estados Unidos, bautizada con el pomposo nombre de Cauca Valley Mining & Construction Co.³⁸. Su primera misión, cumplida a cabalidad con el auspicio del entonces presidente Manuel Murillo Toro, consistía en comprar las acciones de la empresa del camino carretable entre Cali y Buenaventura y asumir la construcción de una línea férrea de 75 centímetros de ancho que partiendo de Buenaventura llegase a la ribera occidental del río Cauca en un plazo no mayor de cuatro años y medio. A cambio, la empresa recibiría el privilegio de explotar el servicio por espacio de 60 años incluyendo sus anexidades: la construcción y explotación de un muelle en Buenaventura y una línea de vapores en el río Cauca.

Los trabajos del ferrocarril se iniciaron en diciembre de 1872 bajo la dirección del también ingeniero norteamericano Barton C. Smith (quien llevó a cabo los primeros estudios topográficos de la línea, preparó los

38 Eder (1959: 132 y ss).

presupuestos y levantó un plano de la isla de Buenaventura, entre otras cosas). El contrato original se reformó un año después por otro que concedía dos años más de prórroga para la culminación de los trabajos, lo cual inició una serie de prolongadas disputas legales y financieras que culminarían con la caducidad del contrato y la renegociación de la construcción del ferrocarril con el ingeniero Francisco Cisneros en 1878³⁹.

Fácilmente puede encuadrarse a David R. Smith en ese grupo de extranjeros que, amparados en el discurso de la técnica y arropados por el título de ingeniero, April-Gnisset (1991) ha calificado como *empresarios colonialistas*, ya que también participaría en la primera empresa del camino de Barbaças a Túquerres en 1875⁴⁰, que luego seguirían Stiles y Finley, y en el trazado de la ruta entre Ansermanuevo y Nóvita en 1881⁴¹. Casi con toda seguridad, durante los seis años de actividades en torno a obras públicas regionales, Smith tuvo que tratar con autoridades afinadas en Bogotá o en Popayán, llevando a que su olfato empresarial se interesara por nuevos proyectos más prometedores, como el que sugería la ya mencionada ley 25 de 1875 en torno a la construcción de puentes. Probablemente fue así como el Estado Soberano del Cauca llegó a celebrar un contrato con Smith⁴² a fin de que este hiciera un *reconocimiento científico sobre cada uno de los ríos en los cuales se mandan construir puentes*, además de formular las recomendaciones para la mejora de los ya construidos (sobre los ríos Victoria, Palacé, Cofre, Pescador, Ovejas y Jamundí) y entregar detalladamente de cada uno de ellos la siguiente información:

Un croquis del río en sentido longitudinal por un espacio de dos kilómetros arriba y abajo del punto designado, y la sección transversal del punto preciso que escoja para la construcción del puente...

Un presupuesto bastante aproximado del costo de cada puente, expresando si conviene que sea de madera ó de hierro, y en uno y otro caso, fijará la anchura y lo largo del paso del puente;

Fijará las distancias de las variantes que haya que hacer á las vías públicas en el caso de que los puntos designados para la construcción de uno ó más puentes sean arriba ó debajo de los vados hoy conocidos en dichos ríos...

39 Un relato detallado de los acontecimientos que rodearon los contratos de Smith y Modica con el gobierno colombiano puede consultarse en las obras de Eder (1959) y Ortega (1923).

40 ROC, 75, septiembre 25 de 1875.

41 ROC, 149, diciembre 17 de 1881.

42 ROC, 123, octubre 5 de 1875.

...la calidad del terreno sobre el cual habrá de cimentar los estribos é indicará la especie de construcción que haya que hacer en los cimientos; Recojerá todos los datos que pueda sobre el valor de las maderas, piedra, ladrillo, cal y demás materiales, y el costo de la mano de obra... Formará también un presupuesto general aproximado de todos los puentes; indicará cuales convendría hacer por contrata ó por administración; suministrará al Gobierno todos los datos generales que crea oportuno sobre el valor de los puentes de hierro en los Estados Unidos, el gasto de transporte, casas constructoras &; é indicará los medios que crea convenientes para la construcción pronta y económica de todos los puentes mandados a construir por el Estado⁴³.

En efecto, en 1876, y como producto del contrato, Smith entregó⁴⁴ un informe en que se incluía un cuadro con el listado de todos aquellos ríos que, interrumpiendo el camino de Popayán hacia el norte, requerían la construcción de puentes: 17 del tipo metálico colgante en alambre y 10 en madera, que a juicio del norteamericano eran *los más a propósito para los lugares y circunstancias del país*. Los primeros correspondían a luces entre los 18 y los 30 metros y tenían un costo total de \$70.060, de los cuales \$27.000 correspondían a la obra de hierro, incluidos los fletes. Los de madera tenían luces entre los 8 y los 12,5 metros y su costo total ascendía a \$12.795. En el caso de los puentes metálicos de alambre, no es posible encontrar una correspondencia entre el costo de la estructura y su luz, aunque sí se puede obtener un promedio de \$121 por cada metro lineal. Tampoco hay una regla constante para calcular el costo de los estribos, ni de los aproches y sus variantes.

Desde el punto de vista técnico, Smith especificaba:

Los cables de alambre de acero son de igual circunferencia para todos los puentes, la altura de las torres variándose para que todos los puentes puedan sostener el mismo peso en una superficie dada del piso ó sea 300 kilogramos sobre cada metro cuadrado.

Todos los fierros, con excepción de la longitud de las varillas verticales, son del mismo tamaño para todos los puentes de alambre; y en los de madera, todos los tornillos de hierro son exactamente iguales. Un sistema que permite esa uniformidad en sus respectivas partes, ofrece muchas ventajas aparentes para la administración de materiales que

43 *Ibid.*

44 ROC, 142, febrero 3 de 1876.

vienen de tan lejos para distribuirse por una distancia tan grande como del río Risaralda hasta el Carchi⁴⁵.

Pese a la importancia de aspectos como la estandarización de las piezas metálicas, la división técnica del trabajo y la importancia del mantenimiento y la durabilidad, en realidad, Smith obraba más como un comerciante que como un ingeniero⁴⁶, lo que se pone en evidencia por la manera insistente en que recalca la importancia del pago de contado y las ventajas que representaba para el Estado comprar la totalidad de los puentes con el fin de obtener provechosos descuentos. También sobresale el hecho de que defendiera, por encima de otras posibilidades, el uso de los puentes de alambre que bien podían entonces comprarse a las casas fabricantes A.S. Hallidic Esq., en San Francisco, y John A. Roebling's Sons Trenton de New Jersey:

La construcción mecánica de los puentes de alambre es más sencilla que la de ninguna otra clase de puentes, pero también necesita de buenos obreros ... El hierro de los puentes de alambre se puede conservar indefinidamente y la madera del piso y de las torres se puede reponer pieza por pieza así que se va dañando por decadencia; de modo que estos pueden durar siglos con las reparaciones que son fáciles de hacer. Todos los puentes de alambre conformarán a la siguiente descripción general:

Dos cables de alambre de acero paralelos distantes tres metros, anclados en ambas riveras del río y sostenidas por torres de madera sobre los estribos. Cada metro y medio de longitud del puente penden de los cables varillas de fierro que sostienen cuartones transversales de trescientos sesenta centímetros de largo; sobre los cuartones asegurados con tornillos de fierro van dos vigas compuestas de 20 x 30 centímetros.

En el espacio de las dos vigas que es de ciento noventa centímetros, hay tablones longitudinales de cinco centímetros de grueso clavados á los cuartones; encima de estos tablones van tablas transversales del mismo grueso que forman el piso verdadero, ciento noventa centímetros, es suficiente para carros ó carruajes⁴⁷.

45 *Ibid.*

46 Eder (1959: 134) dice de Smith: ...era un ingeniero con 25 años de experiencia profesional y de una alta reputación.

47 ROC, 142, febrero 3 de 1876.



Figura 2.5 Mapa con la ubicación de los puentes propuestos por Smith (1876).
Fuente: Elaboración propia.

No hay que desconocer el grado de detalle de los informes de Smith, que ponen en evidencia un arduo trabajo de reconocimiento geográfico y económico de la región. El documento final presentado a la consideración de las autoridades del Cauca incluía informes específicos para los puentes de Risaralda, El Mico, La Honda, Las Cañas, La Paila, Bugalagrande, Mondomo, Güengüé, Buesaquito, Jamundí, Quilcacé, Carlosama, Carchi, Baño, Capulí, Cofre, Palacé, Pescador y Ovejas⁴⁸. También incorporaba datos acerca de las maderas fáciles de conseguir en cada sitio, así como de la existencia de fabricantes de ladrillos y cal en el entorno más inmediato; así mismo informaba sobre la manera de desecar la laguna de Taula, que ocupaba entonces una banda de terreno entre Quilichao y el río Cauca: un ambicioso proyecto hidráulico que solo tendrá lugar en los comienzos del siglo XX.

Los proyectos de Smith quedarían relegados durante algunos años al papel: sería fácil adjudicar su causa al elevado costo de las estructuras y a las precarias condiciones del fisco caucano, pero ello desconocería el valor de factores como la ausencia de una mano de obra capacitada en cuestiones más propias de la mecánica que de la carpintería. Muestra de lo anterior es que por esos mismos años, mientras Smith gestionaba la compra de estructuras metálicas a casas norteamericanas, un sacerdote de origen italiano retomaba los elementos propios de la tradición constructiva de puentes de arco de ladrillo.

El legado práctico de fray Serafín Barbetti

Los datos biográficos de Serafín Barbetti son escasos y casi todos se apoyan en un artículo firmado por Sergio Arboleda en 1884⁴⁹ según el cual el sacerdote había nacido en Osola, provincia italiana de Novara, en 1800, presentándose a la edad de 24 años al convento de los franciscanos menores de Araceli en Roma y asumiendo casi de inmediato el cargo de practicante en el hospital del convento a la vez que se dedicaba *al estudio de la arquitectura teórica y práctica* con el fin de reparar parte de ese edificio. Habría sido destinado a Jerusalén y luego a Egipto a hacerse cargo de varias obras, entre ellas las catedrales de Alejandría y El Cairo, así como un hospicio en Damietta. Antes de ser enviado a Popayán, regresó brevemente a Italia.

Ya en el Cauca, en 1859, dirigió las obras de la catedral iniciadas por fray Fernando Cuero y continuadas por Pedro Antonio Torres; simultá-

48 Publicados en *ROC*, 146, marzo 4 de 1876; 147, marzo 11 de 1876; 148, marzo 18 de 1876; 150, marzo 31 de 1876; 151, abril 8 de 1876; 152, abril 15 de 1876.

49 *Papel Periódico Ilustrado* (a partir de ahora *PPI*), año III, 60, 1883-1884, pp. 182 y ss.

neamente atiende la reparación de la bóveda de la iglesia de la Compañía de Jesús. Interrumpidas las obras de la catedral, por asuntos financieros Barbetti contrató con el Estado Soberano del Cauca algunas obras, entre las que se destacan el puente de Juanambú, en el camino de Popayán a Pasto, el puente del Humilladero en Popayán, el del río Palo y los de Palacé Alto en la vía a La Plata y Ovejas entre Cali y Popayán.



Figura 2.6 Puente sobre el río Juanambú, dibujo de Riou, tomado del álbum de André (1884). Fuente: Revista Geográfica de Colombia, Bogotá, No. 7, junio de 1939; p. 28.

No ha sido posible contar con fuentes de primera mano que documenten los hechos relativos a la construcción del primero de esos puentes, aunque su geometría ha quedado plasmada en una ilustración que acompaña el texto de André (1884), que lo describe de manera general y confunde el apellido del sacerdote:

Frente a la cañada, en donde el Juanambú se halla a una altura de mil doscientos cincuenta metros, se le atraviesa por un buen puente de piedra y ladrillo de cinco ojos, largo de sesenta metros por quince de altura; que fue construido por Barretti en 1866-1868⁵⁰.

Una búsqueda sobre el terreno, adelantada en el marco de la investigación que soporta este libro, permitió localizar las ruinas de lo que

⁵⁰ André (1884, 256).

podría ser el puente de Barbetti. Efectivamente, pocos metros antes de la desembocadura del río Buesaquito en el río Juanambú, en el fondo del cañón que este forma a lo largo de su curso, se encuentra aún en pie un arco de ladrillo de medio punto que debía ser parte de una estructura mucho más extensa. El uso del material, las características geométricas y el empleo de la doble rosca, la misma que reproduciría Barbetti en los puentes del Humilladero y del río Ovejas, pocos años después, son indicios claros de que tales restos corresponden al puente que reseñara André. Queda aún pendiente un trabajo mucho más riguroso de tipo arqueológico que permita identificar la totalidad de las características de la obra.



Figura 2.7 Vestigios de lo que podría ser el puente de fray Serafín Barbetti sobre el río Juanambú. Foto: J. Galindo (2007).

Según la reseña biográfica de Arboleda, la construcción del puente sobre el río Juanambú presentó, entre otras dificultades, dos muy graves: el no disponer de materiales aptos en el entorno cercano y las malas condiciones del clima. El puente, según el contrato, debía tener 30 m de longitud pero hubo que prolongarlo 29 más, siendo el mayor de sus arcos de 14 m de diámetro. Las observaciones que realizó en 1890 el prefecto de la Provincia, Medardo Bucheli, al asumir junto con Ángel María Pazos los trabajos de reparación en la estructura, quienes se asesoraron de personas que habían trabajado con Barbetti, permiten conocer algunas de sus particularidades técnicas:

...el cimientto de ese arco [el principal] tiene bastante profundidad, y que su base la ocupan piedras enormes convenientemente aseguradas; cuyo cimientto se conserva sin alteración, pues que la parte que han averiado las fuertes avenidas del río se encuentra un poco más alta⁵¹.

En otro informe sobre el estado de conservación del puente, esta vez de 1894, a cargo de Rafael Pazos, se describen algunas de sus características constructivas

[La Comisión] encontró que la oquedad que habían formado las aguas entre los pilones del Norte y centro estaba rellena con piedra partida y embaldosada con piedra de cantera unida con argamasa de arena y cal de la conocida en la Provincia como la mejor y más adecuada para el efecto...⁵²

Cinco años más tarde, el represamiento de la quebrada La Resina, afluente del río Juanambú y su consecuente flujo de lodo a causa de la erupción del volcán Doña Juana, ocasionaría el colapso total y definitivo del puente⁵³. Uno nuevo construido en 1893 sobre el mismo río, esta vez a cargo del sacerdote Filipense Juan Bautista Bucheli, todavía en pie, pocos kilómetros *aguas arriba* del curso del río, y en servicio hasta la primera mitad del siglo XX, haría innecesaria su reconstrucción⁵⁴.

La admiración y el éxito alcanzado por Barbetti en el puente de Juanambú aseguraron su continuidad frente a trabajos de esta naturaleza. Si damos fe al dato suministrado por André, según el cual este puente se concluyó en 1868, de manera casi inmediata el sacerdote se puso al frente de la construcción de uno de los más complejos que viera la geografía caucana: el llamado puente del Humilladero, también sobre el río Molino y a pocos metros de la pequeña estructura levantada en 1718. Se ordenó construirlo por decisión del concejo municipal el 11 de diciembre de 1867, quedando el señor Joaquín Castro comisionado para ello⁵⁵. En

51 ROC, 98, agosto 19 de 1980.

52 ROC, 739, noviembre 5 de 1894.

53 Según informe de Ingeominas, una nueva erupción del volcán en 1936 había hecho colapsar otro puente sobre el Juanambú; sin embargo, no se ha podido encontrar documentación de contraste al respecto. Disponible en:

http://intranet.ingeminas.gov.co/pasto/Actividad_Hist%F3rica_de_Do%Fla_Juana

54 También en 1893 se construyó un puente de arco de ladrillo sobre el río Juanambú entre las poblaciones de Buesaco y El Tablón de Gómez, bajo la dirección del arquitecto payanés José Arará, el mismo que todavía se conserva en pie. Una intervención juiciosa sobre este puente es obra del ingeniero payanés Luis Fernando Velasco. Datos suministrados por el arquitecto William Pasuy del Departamento de Arquitectura de la Universidad de Nariño.

55 AHC: Consejo, diciembre 11 de 1867, t. 83, f. 72.

enero del año siguiente, la Comisión de Obras Públicas presentó a segundo debate el proyecto de la estructura conforme a un plano elaborado por el ingeniero Estanislao Zawadski⁵⁶, fallecido tempranamente a causa de la malaria en 1859⁵⁷. Por esto último, es posible que el proyecto fuese muy anterior a 1867, hecho que confirma Paz (1997), para quien el plano había sido levantado durante la gobernación de Vicente Cárdenas, entre 1846 y 1849.

El ingeniero Zawadski era de origen polaco, estudió en París de 1835 a 1840 logrando el diplomado como ingeniero civil, arquitecto y profesor de artes; fue contratado por Manuel María Mosquera en 1841 para la construcción de varias obras públicas. Llegó ese año a Colombia encargado del estudio de las vías del Dagua y Anchicayá; residió en Popayán y Cali siendo profesor en esta última del Colegio Santa Librada⁵⁸.

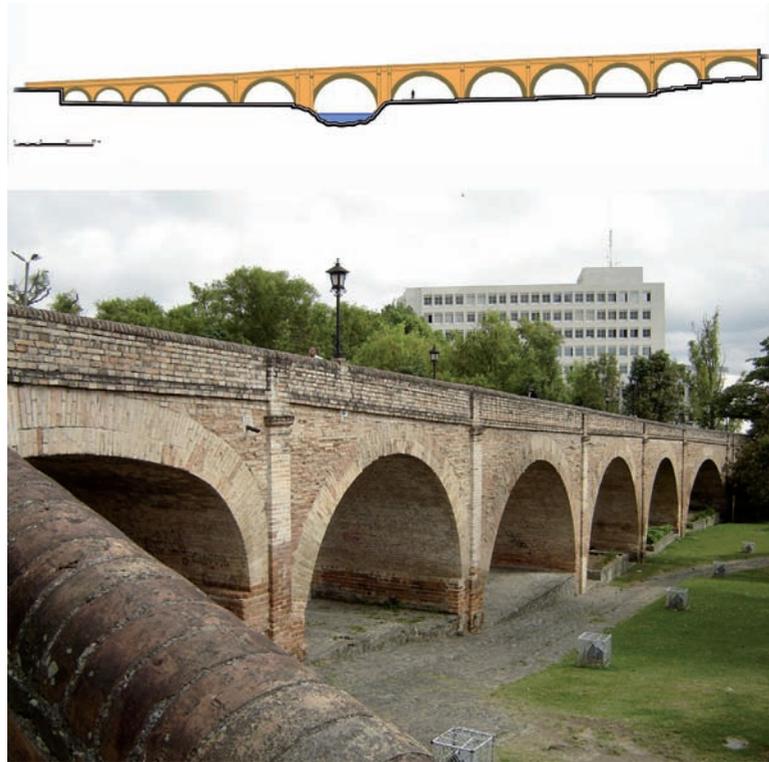


Figura 2.8 Alzada y fotografía reciente del puente del Humilladero sobre el río Molino, en Popayán (1868).
Fuente: Elaboración propia.

56 AHC: Consejo, enero 3, 8 11 de 1868, t. 84, ff.. 70, 75, 79 y 81.

57 Eder (1959, 112).

58 *Ibid.*

La ordenanza 80 del 13 de enero de 1868⁵⁹ dio vía libre a la construcción del proyecto que quedó a cargo de Rafael García Burbano, entonces jefe municipal, quien inició los trabajos el 16 de noviembre de ese año. Se contrató como arquitecto a Barbetti. Acto seguido García presentó relación de los materiales donados por personas de la ciudad: Antonino Olano había obsequiado clavos de alambre, Federico Restrepo regalaba la madera para las cerchas y Aparicio Rebolledo contribuía con la cal, entre otros. Se sabe además que las recuas del municipio transportaban la arena y la piedra, y que Barbetti trabajaba por un salario de un peso diario con una alta participación del personal del presidio, aunque también había peones asalariados que recibían una suma igual a 30 centavos el día⁶⁰.

Es fácil deducir que las obras avanzaban muy lentamente. En una carta de García Burbano, fechada el 6 de octubre de 1871, en la cual hace un recuento de su labor, se lamentaba de los precarios fondos asignados según la ordenanza 80, consistentes en *el valor del solar ...el de la pequeña arca del antiguo cementerio ... y ... el sobrante de las rentas municipales después de sacados los gastos ordinarios*, lo que le obligaba a conseguir dinero hipotecando hasta el 25% de las mismas rentas. El estado financiero era lamentable:

He conseguido algunas contribuciones de los particulares, y obtenido materiales y servicios a precios ínfimos, he procurado a más de esto hacer otras mil economías, como puede verse por las cuentas que lleva el tesorero del ramo⁶¹.

Según el mismo documento, algunos ladrillos usados en el puente provenían de un antiguo edificio, el *cuartel viejo*, cedidos por Emigdio Palau. Acerca del problema muchas veces citado⁶² en torno a la inestabilidad de uno de los arcos, García escribe:

Hasta el día 3 de septiembre se trabajó en el viaducto con el mayor interés; más al cerrarse el 7º arco, recibí una nota del señor Jefe Municipal a la cual me acompaña un informe del señor Mariano Moreno, en que opina que dicho arco está mal construido, y cuya respuesta

59 AHC: Consejo, enero 13 de 1868, t. 84, f. 82.

60 AHC: Índice de Manuscritos, paquete 102, legajo 63 y paquete 104, legajo 69.

61 AHC: Índice de Manuscritos, paquete 115, legajo 75.

62 Paz (1997, 28) recoge la versión según la cual *...en octubre de 1871 las dudas sobre la calidad de uno de los arcos, señalado como el 7º pero sin especificar si el orden de numeración iba de norte a sur o viceversa, obligaron a la suspensión de los trabajos, los que, tras el examen y verificación de la calidad... se autorizaron a continuar a partir del mes siguiente con los recursos y materiales disponibles a cargo del tesorero de la obra*. En igual sentido se expresa Arboleda en su artículo de 1884 lo que hace incluso parte de la tradición oral ligada a la construcción del puente.

inserto a continuación para que os impongais de la causa porque se suspendieron los trabajos, y que desde ese día estoy separado de toda intervención en ellos.

El arco del que se habla hoy, se ha levantado como él lo ordenó; y yo no me atrevo a variar sus planes ni a modificar sus trazados. Que lo verifique él mismo al regresar a esta ciudad...⁶³

Finalmente, y luego de la revisión que hiciera el propio Barbetti:

En corroboración debo agregar que examinado el referido arco por el arquitecto R.P. Serafín Barbetti lo ha encontrado de magnífica y excelente construcción y solidez⁶⁴.

Ese mismo año García Burbano renunció a su cargo, siendo remplazado por Manuel Camacho. Como sobrestante participó también Francisco Olave; existen algunos datos sobre la intervención de Inocencio Hidalgo y Baltazar Cuéllar. El puente se inauguró el 31 de julio de 1873. Tiene una longitud de 180 m y un ancho de 5,26 m, soportados por 12 arcos de los cuales los dos centrales tienen un diámetro de 12 m cada uno y una altura de 9 m sobre el nivel normal de las aguas del río Molino. El último arco en dirección norte-sur tiene forma elíptica, solución que habría adoptado el propio Barbetti.

Desde el punto de vista constructivo, ocho de las doce bóvedas constan de un sistema de doble rosca que se levanta a partir de los riñones. Es probable que esta disposición obedeciera a que desde los arranques y hasta este punto (situado a unos 52° con respecto a la horizontal), las bóvedas se podían levantar con encofrados muy ligeros o sin ellos, pero con una mezcla seca a base de cal y arena. El tramo restante, entre los riñones y la clave, se construía inicialmente con una bóveda ligera que, una vez fraguada, soportaba el peso de una segunda rosca, más gruesa y pesada, completando así la estructura. Luego se terminaban los pretiles, los rellenos y la calzada.

De manera casi simultánea, el Estado Soberano del Cauca contrató con el sacerdote la construcción de dos nuevos puentes, uno terminado en 1874, de arco de ladrillo sobre el río Palacé, y otro de madera, de 20 m de luz sobre el río Palo, en inmediaciones de Santander de Quilichao, que *de haberse hecho de cal y canto hubiese demandado un arco de 22 metros de diámetro.*

63 AHC: Índice de Manuscritos, paquete 115, legajo 75.

64 *Ibid.*

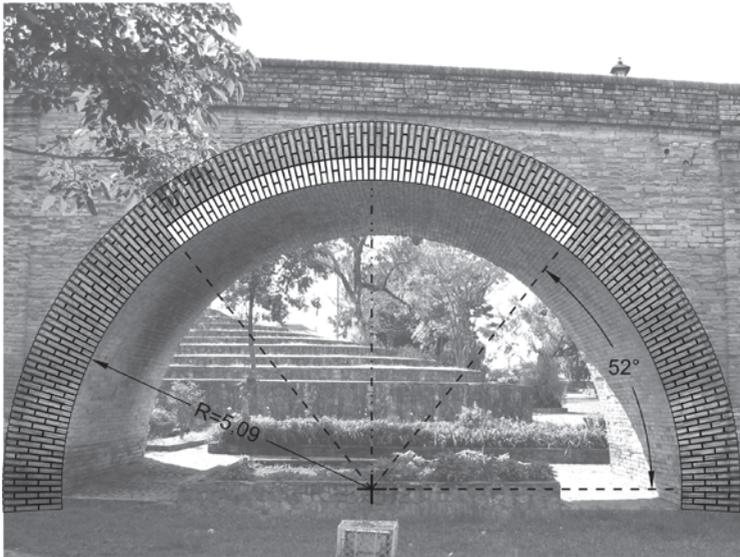


Figura 2.9 Alzada del arco No.8 del puente del Humilladero sobre el río Molino, en Popayán (1868).
Fuente: Elaboración propia.

Del primero es poco lo que se sabe; incluso no se tiene certeza exacta de su ubicación. De acuerdo con el artículo de Arboleda, el puente estaba en el camino de Popayán a La Plata, lo que coincide y no debe confundirse con el hecho de que sobre el río Palacé, pero en el camino *de Popayán al valle* existía en 1878 un puente de madera cuya cubierta se encargó entonces a Pedro Pablo López⁶⁵. Reafirmando esta consideración, en informe firmado por Gregorio Arboleda en 1875, se describen los trabajos de construcción del puente de mampostería, este sí a cargo de Barbetti:

...ya está concluido el arco, que tiene diez metros de longitud, tres de latitud y uno de espesor, sobre un radio de cinco metros, ó mejor dicho, desde su base hasta la parte más culminante del mismo. Los rellenos del arco, que están en su principio, serán como de ocho metros, en dirección de Levante a Poniente, que es la misma del puente, y las dos bases opuestas del arco, descansan sobre las rocas laterales, á una altura tal á la que parece que nunca llegarán las aguas del río en sus mayores crecientes⁶⁶.

De las características del puente de madera sobre el río Palo construido por Barbetti no es mucho lo que se tiene documentado, aunque del

65 ROC, 235, agosto 22 de 1878.

66 ROC, 89, marzo 20 de 1875.

acta de recibo de las reparaciones hechas en 1878 por Clemente Vergara, se pueden conocer algunas:

Verificado el examen del caso, resulta: que la techumbre se encuentra perfectamente a plomo i en ella repuesto parte del encañado, del enmaderado y del entejado.

Que las dos tijeras maestras se restituyeron a su primitivo aplomo, retirando un poco mas las del lado de arriba, en la parte alta, para conseguir la rectitud del hilo con sus bases empantanadas en calicanto.

Que se colocaron cuatro viguetas sobre el piso del puente, con sobresalientes de a un metro en cada lado, para recibir las cuatro riostras de cada lado, una sobre cada saliente, cuyas riostras tiene por objeto impedir la inclinación que el viento pudiera dar a la techumbre.

Que se colocaron dos mordazas por debajo del puente, enlazadas con gznates i aseguradas con lañas curvas de a tercia por cada lado, sobre las que descansan cuatro piezas verticales, que tiene por objeto impedir la inclinación de las tijeras maestras, lo mismo que el que se abran las maderas del piso, dando a la vez la fuerza necesaria a las viguetas salientes ya citadas.

Que todas las viguetas i la parte inferior de las riostras estan cubiertas con planchas de zinc.

Que las pilastras de calicanto fueron refaccionadas en sus bases de las cuales las dos que quedan al extremo del puente del lado derecho del río, han sido cubiertas con piedra i cal para que el trajin no las destruya. I que, por ultimo, en la base del estribo del lado derecho del río, se acuñaaron las piedras salientes que recibe el pilon⁶⁷.

La mala suerte se arrojaría también sobre el puente del río Palo y una tenaz crecida de sus aguas lo arruinaría en 1880. Dos años más tarde, Cenón Caicedo, empresario e ingeniero vallecaucano iniciaría la construcción de un nuevo proyecto, dando cumplimiento al viejo y callado sueño de Smith.

En 1877 Barbetti dará inicio a uno de sus proyectos más complejos: el del puente sobre el río Ovejas, en el camino de Popayán a Cali, en un punto donde no existían playas que facilitaran la cimentación de la obra y en el que las corrientes hacían imposible considerar la posibilidad de apoyar alguna pila sobre el fondo del lecho. Mediante contrato celebrado con el Estado Soberano del Cauca, Barbetti se comprometió a levantar la estructura *observando en su ejecución todas las reglas de la ciencia, y dándole una anchura de tres metros con el grueso de la baranda y la longitud que*

67 ROC, 224, junio 7 de 1878.

*el mismo arquitecto estime conveniente, según los accidentes del terreno en el punto que elija para la construcción...*⁶⁸ El costo estimado ascendía a 6 mil pesos y el plazo llegaba solo hasta el 8 de diciembre de 1878. Firmaba como su fiador el señor Yacundo Nannetti, de quien no ha sido posible encontrar ningún testimonio documental que aclare ni su origen ni el rol que como obrero, socio o empresario asumiría en la construcción de otros puentes a partir de entonces.

Conforme al acta de recibo de obra⁶⁹, el puente de Ovejas se puso en servicio en noviembre de 1878 en presencia de los señores Yacundo Nannetti y Clemente Vergara:

*...se procedió a examinarlo minuciosamente, i habiéndose cerciorado el ciudadano Presidente i demas empleados nombrados, que la obra estaba levantada conforme a las reglas del arte, con buena solidez i con una altura de nueve metros, el primero declaró que era perfecta i que se habían llenado todas las condiciones del contrato celebrado para su construcción*⁷⁰.

El puente, aun en pie, exhibe la misma singularidad constructiva que empleara Barbetti en el puente del Humilladero: como en algunas de sus bóvedas, la del Ovejas consta de un sistema de doble rosca, la primera conformada por una hilada única de ladrillo que arranca a la altura de los riñones y sobre la cual descansa una segunda rosca de doble aparejo, toda en ladrillo. El estribo del costado norte, hoy en malas condiciones, permite apreciar los materiales usados en la cimentación: piedras de canto rodado y ladrillos, probablemente sobre un pilotaje de madera. Los pretiles ya no existen y el pavimento de piedra que una vez tuvo solo se conserva en los caminos de acceso.

Una vez Barbetti y Nannetti concluyeron los trabajos del puente sobre el río Ovejas asumieron la fracasada empresa de hacer uno nuevo sobre el río Amaime, entre las poblaciones de Palmira y Buga. Ambos personajes figuraban en el contrato firmado el 4 de noviembre de 1878⁷¹, que se modificará de la siguiente manera un año después:

El Gobierno del Estado se compromete a dar a los contratistas, poniéndolos en el lugar en que se ha de construir el puente, ochenta mil ladrillos dobles de cuarenta centímetros de largo, veinte de ancho y diez de grueso...

68 ROC, 198, diciembre 17 de 1877.

69 ROC, 250, noviembre 9 de 1878.

70 *Ibid.*

71 ROC, 29, octubre 9 de 1879.

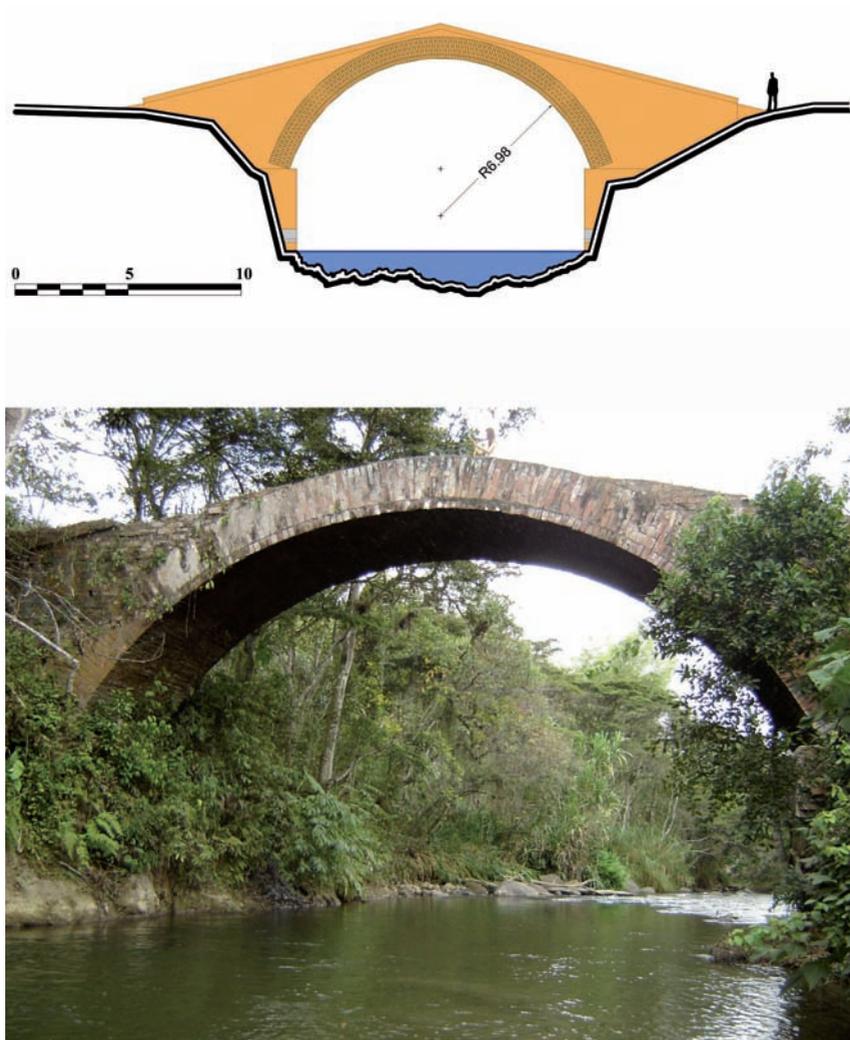


Figura 2.10 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Ovejas, entre Popayán y Cali (1877).
Fuente: Elaboración propia.

*También es de cargo del Gobierno entregar libre de toda cuestion la faja de terreno necesaria para poder construir el puente dos o tres cuerdas arriba del camino público, en el punto en que hai una isla que facilita la obra*⁷².

Y en cuanto a las especificaciones técnicas del puente, se dejaba en claro que:

*Barbetti en su calidad de ingeniero, en unión de Nannetti, se comprometen a construir el puente de mampostería, observando las reglas de la ciencia; dándole tres metros de ancho, incluso el grueso de las barandillas i la longitud i número de arcos que el arquitecto crea conveniente, i construyendo de calicanto al Norte i al Sur la parte que el mismo arquitecto crea necesaria para dar a los arcos la solidez i resistencia indispensables, dejando la salida i entrada del puente arreglados para el servicio público en uno i otro lado...*⁷³

Pero a orillas del Amaime las cosas serían complejas. Gracias a un extenso expediente que reposa en el Archivo Histórico de la Universidad del Cauca⁷⁴ es posible conocer que aunque las obras se iniciaron según la práctica tradicional, serias dificultades se presentarían con relación a la adquisición de los materiales y las condiciones climáticas. Una vez escogido el lugar, Barbetti y Nannetti contrataron personal de obra, compraron algunos materiales y construyeron una casa destinada a servir de campamento, la cual dotaron de utensilios de cocina y dos sirvientes. Sin embargo:

*...cuando el contratista Sr. Nannetti partió a Palmira con el objeto de practicar los trabajos preparatorios y el Gobierno había impartido sus órdenes para completar el pago del primer contado, se difundió en el Valle el alarma proveniente de la venida a este Estado del ex Gobernador de Antioquia General Tomás Rengifo. Hubo pues necesidad de hacer gastos extraordinarios en aquellos meses para la conservación del orden público, y en seguida ocurrieron las inundaciones que tantos males causaron en el centro y norte del Estado y que destruyeron los puentes de “Piendamó” y el “Palo”*⁷⁵.

72 *Ibid.*

73 *Ibid.*

74 AHC: Índice de Manuscritos, paquete 162, legajo 8, 1883.

75 *Ibid.* Carta de la Secretaría de Hacienda, firmada por F. Mantilla y fechada en Popayán el 14 de julio de 1883.

Además de la incertidumbre política, los 20 mil ladrillos necesarios para el puente, que debían ser entregados por las autoridades del Estado, no llegaron a tiempo, lo cual generó un alto sobre costo a los contratistas, quienes exigieron en 1880 la rescisión del contrato. Como peritos evaluadores fueron nombrados Clemente Vergara, de parte de Barbetti y Nannetti, y Manuel José Rincón, a nombre del Estado Soberano del Cauca.

Una vez liquidado el contrato del puente sobre el Amaime en 1884, casi ciego y con la amarga experiencia de su último proyecto, a Barbetti se le concedió permiso para que su cadáver pudiera depositarse en una de las bóvedas de la iglesia de San Francisco de Popayán en virtud de la ley 23 del 24 de septiembre de 1883⁷⁶, en la cual se reconocen además los importantes trabajos hechos por el italiano. Fray Serafín Barbetti murió en 1886.

La explosión de la técnica

Puesto en servicio el puente del Humilladero en Popayán, bautizado con el nombre de Puente Bolívar, en toda la región del alto Cauca se dio inicio a un singular proceso de construcción de puentes de arco de ladrillo a causa no solo de la imagen de progreso que la obra imprimía en el imaginario de los caucanos, sino también, de manera especial, gracias a la asimilación de las técnicas que lo hacían posible y que no se diferenciaban en mucho del quehacer cotidiano que durante décadas habían desarrollado maestros de obra, albañiles, artesanos, carpinteros y obreros rasos. Sin ellos, no es posible explicar la manera en que en un lapso de 30 años, contados a partir de 1873, se edificaron no menos de 20 puentes de naturaleza similar en un medio habitado por muy pocos ingenieros y arquitectos formados en el oficio de construir.

También estaban las materias primas: maderas resistentes para las cimbras, cortadas de los bosques nativos, como el arrayán y el chucuro; ladrillos cocidos en hornos sencillos, pero hechos de buenas arcillas; y piedras duras y cales fuertes que se extraían de las tierras de Vijes, Mulaló y García Abajo, como lo señaló Smith en su informe de 1876.

El primero de esa nueva generación de puentes se construyó en Buga, sobre el río Guadalajara, bajo la dirección del ingeniero colombiano Modesto Garcés, egresado de la Universidad Nacional, quien años más tarde sería el primer Ministro de Obras Públicas del país. La obra, iniciada en 1874 gracias a un contrato celebrado entre Garcés y el Estado Soberano

76 ROC, 265, septiembre 28 de 1883.

del Cauca en diciembre del año anterior, contaba con una Junta⁷⁷ encargada de administrar los recursos y coordinar además los trabajos de canalización del río. El puente debía construirse mediante tres arcos *levantados sobre estribos de piedra labrada por el exterior desde flor de tierra hasta el arranque de los arcos*. El viaducto llevaría cinco arcos y, como los del puente, serían de mampostería de ladrillo, dándole a la calzada una inclinación que no podría exceder el 5%, suficiente para subir y bajar cómodamente a caballo⁷⁸.

Es interesante que en el contrato se estipulase que la construcción de las bóvedas *deben sujetarse a las reglas que la ciencia aconseja, sopor-tando su propio peso, el de los terraplenes, calzada y demás accesorios, y llevando sobre sí una sobrecarga de 12,500 kilogramos*. El plazo fijado era de cuatro años, periodo durante el cual el propio Garcés quedaba con el carácter de recaudador de las contribuciones impuestas en el municipio para las obras del puente y canalización del río. Así mismo, este último quedaba como responsable del déficit de las contribuciones. Además, Garcés recibía en pago la mano de obra de los presidiarios, algunos materiales disponibles (ladrillos y maderas principalmente), el producto de la contribución sobre mortuorias, las donaciones voluntarias, las limosnas que la iglesia recogiera para tal fin y 4 mil pesos que la Legislatura del Estado había aprobado en calidad de auxilio, todo ello hasta sumar los \$28.000 que costarían las obras.

Dos años después de haber iniciado los trabajos de este puente, Garcés rendía un informe acerca del avance y estado de las obras. En su descripción del puente, dice lo siguiente:

El puente de Buga ... es una obra mixta que comprende tres partes principales: el puente propiamente dicho que abarca con tres grandes arcos de á 10 metros de luz cada uno y el grosor de sus pilares y estribos un espacio de 41 metros; la segunda parte consta de los terraplenes indispensables para el descenso de la altura del puente en un espacio de 50 metros; y la tercera parte la forma un viaducto de cinco arcos espaciosos á distancias proporcionadas, adecuándolos á los accidentes del terreno en un espacio de 50 metros⁷⁹.

77 La Junta directiva del puente y canalización del río Buga estaba conformada por por Antonio María Soto (Jefe Municipal), Eliseo Payán (Presidente de la Municipalidad), Ricardo Quintero, Rómulo Durán, José Vicente Rengifo y Ramón Azcárate. ROC, 33, marzo 21 de 1874.

78 *Ibid.*

79 ROC, 94, abril 17 de 1875.

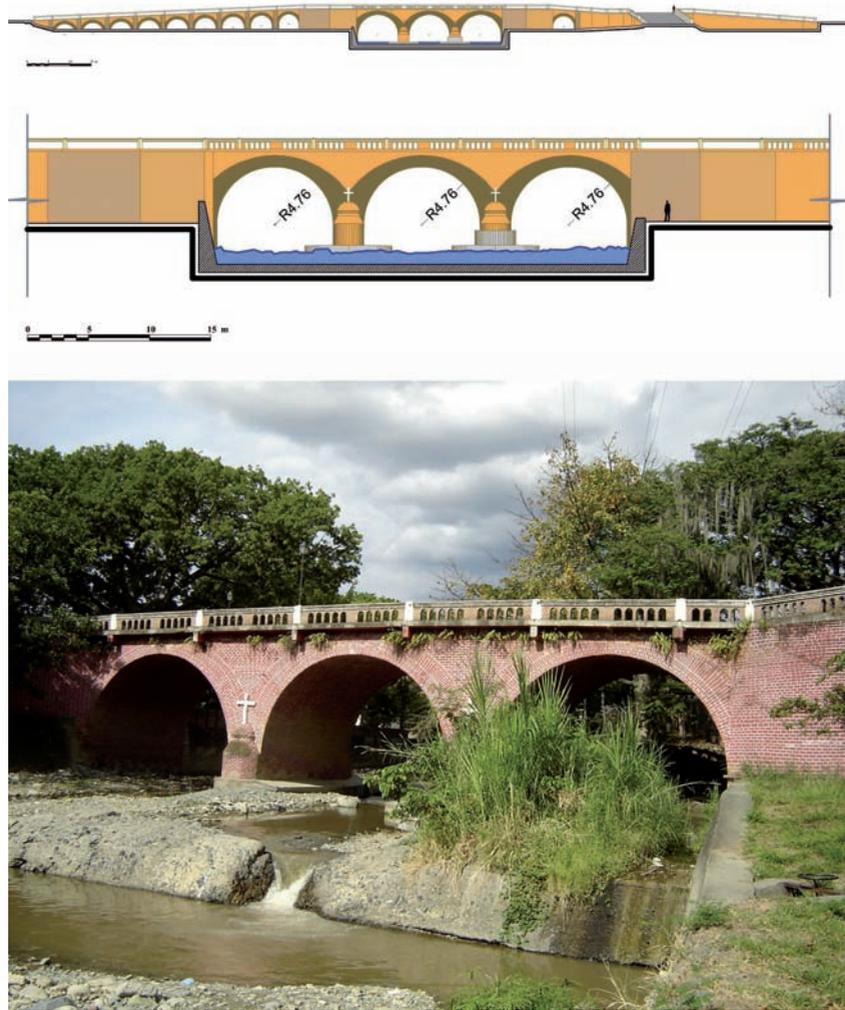


Figura 2.11 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Guadálajara, en Buga (1874-1900).
Fuente: Elaboración propia.

Es decir, reutilizaba las potentes cimbras empleadas en la construcción de los arcos, los cuales se hacían con parte de los 18 mil ladrillos ya cocidos y los 20 mil en cocción que decía tener, los cuales a su vez se fabricaban en un galpón contratado para tal fin. Dice además que el ancho del puente debía ser de 10 varas y todos los arcos de medio punto:

Omito todos los detalles de construcción y cálculo de volumen, presión & por considerarlos innecesarios y no adecuados a la naturaleza de este informe ... su valor excederá en mucho a la suma del contrato⁸⁰.

Finalmente, menciona la necesidad de corregir el curso del río que actuaba oblicuamente sobre los estribos del puente e invitaba al Secretario de Hacienda a hacerle llegar el dinero prometido pues de no continuar con las obras... *una grande avenida del río se arrastraría las cimbras, desnivelaría y tal vez destruiría cuanto hay hecho, no dejando la esperanza de volverlo a levantar⁸¹*. Como en otros proyectos, la falta de dinero y la inestabilidad política harían del puente una labor de muchos años: solo en 1900 la obra estará completa y en servicio.

Al puente de Buga le sucedieron, entre 1881 y 1903 los de Cofre, Palacé, Güengüé, Aguasucia, Fraile, Mondomo, Nima, Pescador, Río Blanco, Zabaletas, Popurrinas, La Paila, Piendamó, El Tablón de Gómez, Juanambú (segundo puente), Paso de La Bruja, Sonso, El Cerrito y Caloto. Y pese a que la centralización de la administración en la ciudad de Popayán dificultó enormemente la aplicación de una verdadera política de obras públicas, la creación del cargo de Inspector General de Caminos, en cabeza de un ingeniero encargado de vigilar la construcción de las carreteras y los puentes que la administración solía contratar con particulares, agilizó el inicio de varios frentes de trabajo, como consta en un informe presentado por el funcionario de turno en 1891⁸², en el que se hace una

80 *Ibid.*

81 *Ibid.*

82 ROC, 305, diciembre 17 de 1891. El cargo de Inspector General de Caminos fue ocupado entre 1891 y 1893 por Manuel Santos Moreno y Robert White, este último ingeniero contratado por Santiago Eder para el trazado de la carretera Cali-Palmira en 1867, y quien había llegado al país en 1866 en compañía de su hermano Franklin. De acuerdo con los datos contenidos en el libro de Eder (1959: 141 y ss.), White era nieto de Sir Thomas White, oficial de la armada y graduado en Queenswood College, luego de pasar por España. Su obra principal quizás fue la re-explotación de la mina de Frontino & Bolivia que fue salvada de la bancarrota en 1873... White fue nombrado superintendente y permaneció en ese puesto hasta 1885. En 1887 fue contratado por el gobierno para explorar e informar sobre los yacimientos minerales en el Departamento del Tolima. También es relevante el hecho de que White escribiese *Notes on the Central Provinces of Colombia* (Proceedings Royal Geographical Society, mayo de 1883) y *Notes on the Aboriginal Races of the Northwest Provinces of South America* (13 Journal Anthropological of Great Britain, junio de 1883).

descripción detallada de las obras situadas en la ruta que comunicaba las ciudades de Popayán y Cartago.

De cualquier manera, la lentitud de los trabajos, la falta de materiales adecuados, las dificultades en conseguir una mano de obra calificada y la lucha contra los inviernos eran la constante: por ejemplo, en cuatro largos meses en la vía de Cali a Puente Palma que se construía durante ese año, se había avanzado tan solo 275 metros de camellón con una altura que variaba entre los 40 y los 180 centímetros, sobre una base de 12 metros⁸³. Cuando la vía demandaba la construcción de algún puente, las obras en conjunto podían demorar años.

A lo largo del camino entre Cali y la capital del Estado Soberano del Cauca, el citado informe de 1891 mencionaba los siguientes puentes de mampostería:

El de Rioblanco, entre Popayán y Santander ... de un solo arco, fue contratado por el finado Manuel J. Rincón, quien falleció dejando la obra casi concluida, tocándole terminarla á su consocio, el señor Pedro López...

*El de Pescador, entre Tunía y Pescador. Aun no se ha dado principio á la construcción de este puente, y el contratista se ocupa actualmente en almacenar los materiales necesarios en una casa pajiza que ha construido en la orilla derecha del río. Este puente, como el anterior, constará de un solo arco, y el lugar más á propósito para situarlo es el que ocupa el de madera...*⁸⁴

El arco del puente de Pescador se proyectaba hacer de 8 metros de luz y sus estribos se construirían en seco gracias a las rocas sedimentarias situadas bajo los arranques. Con detalle sorprendente, el inspector de caminos describe de la siguiente manera las características formales y tecnológicas de la obra:

Altura del plano de arranque del arco sobre la superficie del agua, tres metros.

Ancho de los estribos, cuatro metros.

Espesor de los id, dos metros cincuenta centímetros.

Perfil de la curva del intradós; arco escarzano de ciento veinte grados.

Radio de la curva de intradós, cuatro metros sesenta y dos centímetros.

Flecha, dos metros treinta y un centímetros.

Espesor de la bóveda, setenta y dos centímetros.

83 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

84 *Ibid.*

Id. del terraplén sobre la clave, veinte centímetros.

Altura de los guardalados, un metro.

Espesor de los id., cuarenta centímetros.

Longitud de los id., la que sea necesaria para contener los terraplenes laterales del puente.

Ancho de la calzada, tres metros.

Inclinación de la id., el siete por ciento⁸⁵.

Aún en pie, el puente de Pescador, marginado de la carretera Panamericana, sirve de testigo mudo a un camino en desuso.

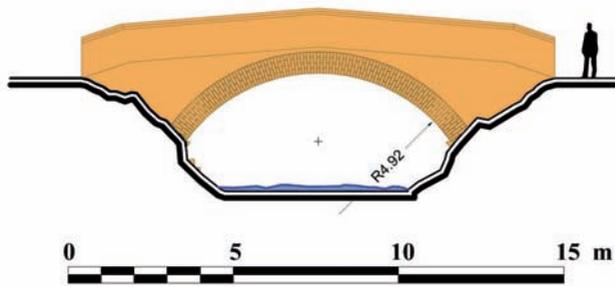


Figura 2.12 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Pescador, entre Popayán y Cali (1891).
Fuente: Elaboración propia.

85 *Ibid.*

El mismo inspector general de caminos también hacía referencia del puente de Mondomo, *que a la fecha debe estar cerrando el segundo arco* y que había revelado problemas en la cimentación ya que el *terreno cascajoso* se extendía en una superficie mayor de la prevista, lo cual demandó del contratista la colocación de piedras grandes como apoyo de las pilas. Este procedimiento fue cuestionado por el inspector, quien consideraba que la escasa fricción de las piedras amenazaba la estabilidad del conjunto. Se mencionaba también al puente de Aguasucia, en Santander de Quilichao, proyectado mediante un arco central y dos laterales, pero construido con apenas uno de ellos; además, se describen los de La Paila y Güengüé, entre Corinto y Florida, cuya construcción *tardará todavía algunos meses, pues el contratista de ellos se ocupa actualmente en construir otros que tienen principados...* El del Güengüé remplazaría a uno hecho de guaduas que ocupaba entonces el mismo sitio donde se construiría el puente de mampostería, ubicado sobre la vía que une a las poblaciones caucanas de Miranda y Corinto. Hoy en pie, exhibe sus 71 metros de luz, con un ancho total de 5 metros, de los cuales 4,15 son libres. Actualmente presenta las bases de las pilas reforzadas en concreto y el tablero está formado por un terraplén sobre arcos con rodadura en asfalto.

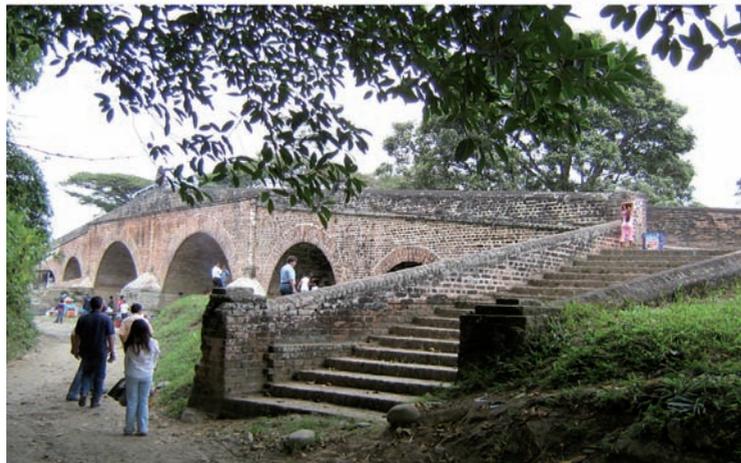
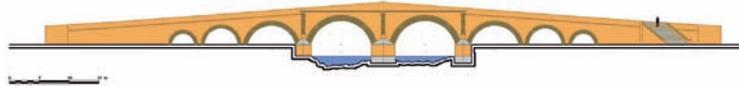


Figura 2.13 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Güengüé, entre Popayán y Cali (1890).
Fuente. Elaboración propia.

El informe también incluía las siguientes obras: el puente sobre el río Desbaratado, entonces todavía en proyecto⁸⁶; el del río Fraile, cerca de Florida, que para la fecha está terminado: *la luz del puente es de diez y seis metros y el perfil de la curva del intradós es una semielipse ...* y que fue objetado por el inspector debido a que por la magnitud del arco el puente había quedado muy elevado y, como el terreno de la orilla izquierda era tan bajo, el río alcanzaba a bañarlo durante sus avenidas; el del Nima, entre Palmira y el río Amaime, compuesto de cinco arcos distribuidos simétricamente a partir del arco principal (de mayor luz y con un perfil generado por una curva de tres centros); y los de Zabaletas y Popurrinas, entre el Cerrito y Guacará, contratados con el señor Toribio Vivas,

...quien para aprovechar el buen tiempo comenzó por levantar á un mismo tiempo los estribos de ambos puentes y luégo se ha dedicado á concluir el de Zabaletas, para después continuar con el otro ... La luz del de Zabaletas es de 12 metros, y para evitar que fuera á quedar el puente muy elevado, convine con el contratista, que es un albañil inteligente, que hiciera un arco rebajado, con lo cual es fácil dar á la calzada del puente, el 7% de inclinación, sin prolongar mucho los terraplenes laterales ... Los puentes contratados por el señor Vivas, puedo asegurar que quedarán buenos, pues tuve ocasión de ver y examinar los planos de dichos puentes, trabajados por el mismo Vivas, quien personalmente los está ejecutando⁸⁷.

Tres meses más tarde, en la misma publicación aparecía un nuevo informe sobre el estado de la vía que llevaba de la ciudad de Buga a la población de Amaime, el cual permite apreciar el desarrollo de los trabajos:

Hay en construcción dos puentes: uno en Popurrinas y otro en Zabaletas. El primero, que lleva un solo arco, está al terminarse, teniendo ya cerrada la bóveda que lo forma; el segundo tendrá sobre el nivel del agua, ó sea del arranque del arco, una altura de un metro cincuenta centímetros; y sé, por informes del contratista, que en estos días va á armar las cerchas que tiene ya preparadas con este fin⁸⁸.

86 El puente, que comunicaba las poblaciones de Florida y Miranda entre sí, sería arrasado por una feroz creciente del río en la noche del 28 de octubre de 1929. Así lo confirman las notas de prensa publicadas en *Relator* en los días posteriores al desastre. Solo sobreviviría el estribo correspondiente al municipio de Florida.

87 *Ibid.*

88 *ROC*, 358, marzo 23 de 1892.

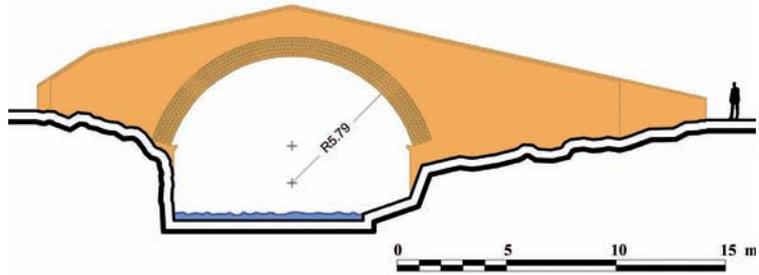


Figura 2.14 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Cofre, entre Popayán y Cali (1889).
Fuente. Elaboración propia.

También en el informe se daba cuenta de los puentes de Guabas, entre el río Popurrinas y Guacarí, donde se presentaron serios problemas de canalización que aplazaron la construcción del puente proyectado mediante un arco único de 6 metros de luz; los de Las Cañas y el Naranjo, entre Bugalagrande y Cartago, para los cuales no se contaba con los materiales; y el ya reseñado puente de Buga, o puente de La Libertad, que una vez terminado quedaría con tres arcos principales y nueve del lado de la ciudad, separados por un macizo de mampostería de unos 12 metros de largo.

En el mismo documento se tenía noticia de puentes construidos en otras tipologías: puentes colgantes, puentes de madera y puentes rígidos. Entre los últimos se mencionaban los de El Bolo (entre Palmira y Candelaria, cimentado mediante pilotes); el de Bugalagrande, hecho por el

sistema americano; el de La Paila (entre Bugalagrande y Cartago) a cargo del señor Valentín Cadavid, *constructor de puentes al estilo antioqueño*; el de La Honda, *construido por el señor Cadavid hace poco tiempo y por la calidad de la construcción se puede asegurar que durará más de 60 años*; el del Mico y el del Guanábano (también de Cadavid); y el puente rígido de Jamundí, en la carretera que la comunicaba con Cali.

La dirección técnica de los trabajos de construcción en la región, a cargo de un ingeniero titulado, se vio rápidamente retribuida en una mayor calidad de las obras, a lo que también colaboró la iniciativa privada de hacendados y ganaderos interesados en el buen mantenimiento de las vías de comunicación; prueba de ello eran las palabras contenidas en una carta enviada por Fortunato Pereira Gamba⁸⁹ a Enrique Morales en 1905, presidente de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y publicada en los *Anales de Ingeniería*, referidas al estado de los caminos del valle del río Cauca:

*El camino debía ser una carretera espléndida, pero le falta mucho. Lo único que hay con profusión son los buenos puentes, y tanto que casi desde Manizales hasta Cali no hay que vadear ningún curso de agua ... Habiendo visitado el ingenio de La Manuelita, cerca á Palmira, he quedado sorprendido de lo que puede llegar a ser el Valle del Cauca cuando se desarrolle un poco la industria. Ningún país en Sur América podrá llegar a una producción tan grande de productos tropicales. Cuando logren una salida fácil hacia Cundinamarca, Boyacá y Santander, nos libramos de la vergüenza de ver el camino de Honda atestado de cargamento extranjero de artículos alimenticios precisamente tropicales... Tal vez ninguno de los Departamentos posee tan buenos puentes como éste y construidos con tanta profusión. En su mayoría son de cal y canto y de hechura muy esmerada...*⁹⁰

Y un año más tarde, en otra carta manuscrita firmada por el ingeniero Aquilino Aparicio y fechada en Cali el 4 de marzo de 1906⁹¹, se explicaba al Ministro de Obras Públicas el estado de las vías en la región del Cauca:

La vía que de Popayán conduce hasta el río Chinchiná, en la frontera del Departamento de Caldas, se encuentra en buen estado y se atiende así: De Popayán al puente del Cauca, por una sección del presidio y una compañía del batallón que hace la guarnición en la capital del Departamento; una segunda sección del presidio, situada en El Espejuelo,

89 Quien fue director de la Facultad de Matemáticas de la ciudad de Pasto.

90 *Anales de Ingeniería* (a partir de ahora *AI*), vol. XVII, 153, noviembre de 1905; p. 138.

91 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1178, ff. 100-116.

ha hecho la composición del puente del Güengüñe y ahora se ocupa en reparar la vía en el paso del río Desbaratado; y una tercera sección, repara el camino en inmediaciones de la ciudad de Buga...

Parece que tomando la vía conocida con el nombre de "Camino de Occidente" que es la verdaderamente científica para unir a Popayán con Cali, se encuentra el río Inguitó; remontando este se llega fácilmente a las vertientes del San Joaquín, por cuyas riberas se llega al Micay, el que desde allí es navegable hasta su desembocadura en el mar Pacífico.

La de Popayán a La Plata se reforma actualmente por esta administración, haciendo una variante en el páramo de Las Delicias con cuyo trabajo quedará perfectamente transitable ese paso de la Cordillera Central⁹².

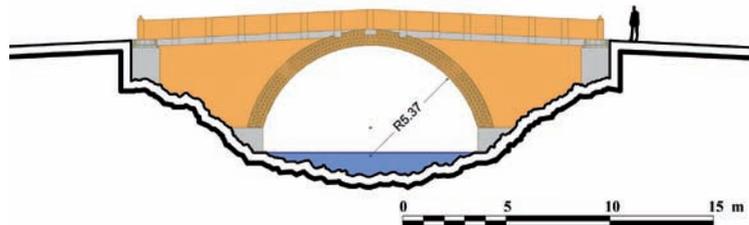


Figura 2.15 Alzada y fotografía reciente del puente sobre la quebrada Popurrinas, entre Cali y Buga (1891).
Fuente. Elaboración propia.

92 *Ibid.*

Es del caso hacer presente que *la vía científica entre Popayán y Cali* correspondía al llamado Camino de Occidente, trazado y adelantado entre 1886 a 1887, aunque suspendido desde entonces sin razón alguna. Sobre los puentes, contenía la siguiente y completa relación:

Puentes de Popayán hacia el norte:

Sobre el Molino: en Popayán, de mampostería, varios arcos y buena construcción.

Sobre el río Cauca: grande arco central sobre el río y varios en el viaducto.

Rioblanco: pequeño arco de mampostería. Regular construcción.

Palacé: un arco de mampostería muy elevado y sin rellenos para suavizar el ascenso.

Cofre: la misma forma del anterior.

Victoria: pequeño arco de mampostería.

Piendamó: un arco sólido de mampostería, aunque de poca luz relativamente del caudal del río.

Ovejas: un arco de mampostería de poca solidez.

Mondomo: de mampostería con un arco sobre el río y dos en el viaducto. Es de reciente construcción y se halla retirado del paso.

Caloto: se construye de mampostería con cinco arcos.

Palo: colgante de cadenas de fierro y piso de madera.

La Paila: de mampostería con tres arcos.

Güengüé: de mampostería con seis arcos; de estos, dos al centro, y dos en los viaductos de cada lado.

Desbaratado: de mampostería, un arco pequeño, insuficiente aun para ligeras avenidas.

Bolo: colgante de cadenas de fierro a inmediaciones de La Pradera. Está inutilizado.

Amaime arriba: colgante de cadenas de fierro y piso de maderas.

Cerrito: pequeño de mampostería.

Zabaletas: de mampostería; un arco sobre el río y otro pequeño en el viaducto.

Popurrina: de mampostería, un arco sobre el río.

Guabas: de mampostería, un arco sobre el río.

Sonso: iniciado.

Buga: elegante puente de mampostería, de tres arcos sobre el río, un viaducto al lado de la ciudad y prolongación hacia el sur.

Tuluá: colgante de cadenas de fierro y piso de maderas.

Morales: de mampostería en construcción.

Bugalagrande: de madera sobre estribos de cal y ladrillos.

La Paila: un arco pequeño de mampostería.

La Vieja: en inmediaciones de Cartago. Colgante de alambre y piso de madera.

Otún: puente de madera sobre estribos de cal y ladrillo.

Santa Rosa: de madera sobre estribos de cal y ladrillos.

Chinchiná: colgante de cadenas de fierro, piso de madera⁹³.

Además, en la vía de Popayán hacia la frontera con el departamento del Huila, pasando por Silvia, Inzá, Pedregal y La Plata, Aparicio señalaba la existencia de puentes sobre el Palacé (*un arco de mampostería; construcción antigua*)⁹⁴, Piendamó (*uno de mampostería cerca a la población de Silvia y varios pequeños de madera en el ascenso a la cordillera*), Uyucos y La Plata.

Un año antes de que se escribiera esta carta, en 1905, se había creado el Ministerio de Obras Públicas durante el gobierno del general Rafael Reyes con el fin de hacer más operativa y eficiente la construcción de caminos, carreteras, ferrocarriles y edificios, dando así cumplimiento al sueño del mandatario para quien era urgente la reestructuración del Estado y de su economía en un país devastado por la guerra civil y parcialmente desmembrado luego de la separación de Panamá⁹⁵. De inmediato se organizó el ramo de carreteras y caminos mediante la ley 60 expedida por el Congreso, en la que se clasificaban las vías del país en nacionales, departamentales y municipales. Las primeras quedaron a cargo de los ingenieros nacionales que laboraban en la Sección de Obras Públicas del Ministerio; las municipales quedaron al cuidado de las juntas municipales. Las departamentales serían dirigidas por los ingenieros departamentales que bien podrían pertenecer a juntas departamentales o a la misma Sección de Obras Públicas.

En 1910 la ley fue modificada, desapareciendo con ella tanto los ingenieros nacionales como las vías nacionales a su cargo. Una nueva organización se produjo en 1916, que dejó las vías municipales y departamentales exclusivamente a cargo de los Departamentos a través de juntas municipales y departamentales, las cuales debían contar desde entonces con una sección propia de obras públicas. El Ministerio, a través de la Dirección General de Caminos y nuevamente con la colaboración de los

93 *Ibid.*

94 Probablemente el de Serafín Barbetti.

95 Durante el gobierno de Reyes (1904-1910) se reorganizó la administración pública mediante la creación de los departamentos, se creó el Ministerio de Instrucción Pública, se abrieron varias escuelas de Artes y Oficios y se impulsó el desarrollo industrial. Como parte de las tareas de reorganización de la administración, el Ministerio de Fomento fue remplazado por el de Obras Públicas.

ingenieros nacionales, se ocuparía de las vías más importantes del país. Amparándose en esta organización, en los 14 años siguientes se expedieron 20 leyes que declaraban vías nacionales, 9 que ordenaban estudios de nuevas vías, 36 que ordenaban a la Nación a construir carreteras, 15 que autorizaban nuevos contratos, 12 que creaban nuevos impuestos y otras 12 que autorizaban a los Departamentos a la construcción de nuevas vías⁹⁶. Para citar solo un ejemplo del caótico estado de las cosas, la vía entre la población huilense de La Plata y la ciudad de Cali fue inicialmente declarada vía nacional en virtud de la ley 70 de 1916; tres años más tarde la ley 39 autorizaba al Gobierno contratar su construcción con las gobernaciones de Huila y Valle; y 10 años después, en 1929, la ley 28 de ese año la consideraba parte integrante de la carretera de Cali al mar, dándole los mismos beneficios que favorecían al proyecto de comunicar la capital vallecaucana con el puerto de Buenaventura⁹⁷. Fue tal el *maremágnum* de leyes expedidas por el Gobierno Nacional en materia de obras públicas durante los primeros años del siglo XX que en 1930 el propio Ministro del ramo, en su informe al Congreso, declaraba con relación a ellas:

*Quizá lo más conveniente para el país sería borrarlas todas y principiar de nuevo a legislar con orden y, sobre todo, con espíritu nacional y patriótico*⁹⁸.

Tiempos de renovación

En el alto Cauca, aún en 1903 se llevaba a cabo la construcción de un puente de arco de gran envergadura, situado sobre el río Grande, en la población de Caloto:

El puente de "Río-grande", en Caloto, se principió a construir por administración según decreto número [ilegible] de 1903. Se han construido ya los estribos que deben sostener 2 arcos y están hechas las excavaciones para los dos estribos restantes. Este puente tendrá 5 arcos de 10 metros de luz cada uno de los centrales y 5 metros 92 centímetros los dos laterales. Las pilas tienen todas 3 metros de espesor cada una y de largo 5 metros 92 centímetros. Estas pilas fueron levantadas sobre terreno firme e incompresible el que se encontró a alguna profundidad. La altura de los estribos desde el nivel ordinario de las aguas, al arran-

96 Uribe (1931).

97 *Ibid.*

98 Ministerio de Obras Públicas (1930: 10).

que de los arcos es de 1 metro 50 centímetros. La flecha de los 3 arcos centrales es de 8 metros 80 centímetros y 3 metros 80 centímetros por su orden. Los dos arcos laterales son de medio punto⁹⁹.

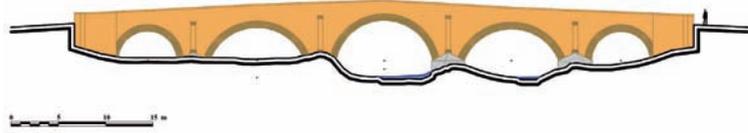


Figura 2.16 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Grande en la población de Caloto (1903).
Fuente. Elaboración propia.

También en inmediaciones de Popayán se construyeron en 1907 tres puentes de arco sobre el río Cauca: el primero, en la población de Julumito; el segundo, en la vía a la población indígena de Coconuco; y el tercero, en el desvío del camino hacia La Plata. El primero, de 18 m de largo y 5 m de ancho, con un solo arco rebajado de 2,10 m de flecha y luz de 11 m¹⁰⁰, desapareció algunos años más tarde, remplazado por una estructura metálica. Es probable que el segundo ocupara el mismo sitio en donde años antes se ubicaba un puente mencionado por Boussingault cuando narra su ascensión al Puracé en 1830:

⁹⁹ ROC, 243, enero 20 de 1905.

¹⁰⁰ AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1178, ff. 148 – 150b, en carta firmada por Miguel Arroyo, Prefecto Provincial de Popayán y dirigida al Ministro de Obras Públicas informado sobre el estado de las vías el 14 de mayo de 1907.

Al bajar cerca de 600 metros desde el alto de la Poblazón, se llega al río Cauca que corre por un valle estrecho, habitado por indios que cultivan maíz y papa. Se sube enseguida por un sendero hasta el alto de los Pesares, para bajar hasta el río que se cruza por un puente, caminando sobre una roca terrosa, con cristales de feldespato, fragmentos de cuarzo vidrioso y de cuarzo de lidita, de un bello color negro. Entonces se entra en una garganta, sitio de Coconuco, atravesada por un torrente que sale de las nieves del volcán y desemboca en el río Cauca¹⁰¹.

El tercer puente, en el desvío hacia la población huilense de La Plata, consta de un arco único y hasta 2004 sus paredes laterales estaban recubiertas con mortero a manera de revoque; probablemente se trate de una estructura mucho más reciente pero en pie y en servicio.

En casi todo el mundo, el uso de puentes colgantes adquirió notoriedad en las últimas décadas del siglo XIX gracias al advenimiento de las estructuras metálicas, no sin antes presenciar el debate entre quienes aferrados a la tradición decimonónica soñaban con grandes estructuras en forma de arco salvando las aguas de anchos ríos y aquellos que veían en los elementos de hierro –con su alta capacidad de resistencia a los esfuerzos de tracción– la llave mágica que les permitiría cruzar los ríos con audaces estructuras, bien de celosía, bien colgantes.

Aunque Andrea Palladio había incluido en su libro de 1570¹⁰² una variada gama de puentes en celosía, su uso fue limitado a estructuras de luces cortas mediante vigas de madera. Solo a mediados del siglo XIX, cuando las técnicas de fundición permitieron la aparición del hierro dulce y el acero¹⁰³ y fue posible la unión de tramos por roblonado, aumentándose además la relación entre capacidad resistente y peso propio, después de que el ingeniero norteamericano Squire Whipple¹⁰⁴ idease el primer método para deducir los esfuerzos en las barras, las estructuras en celosía se extendieron por el mundo occidental haciendo posible salvar grandes luces mediante estructuras rígidas trianguladas. El ferrocarril fue desde entonces uno de los grandes beneficiados: los puentes así diseñados podían construirse sin necesidad de realizar enormes obras falsas, colocan-

101 Boussingault (1992: 289/III).

102 Palladio (1570).

103 El primer puente metálico en la historia de la ingeniería –el puente fundido Coalbrookdale– fue construido con forma de arco de medio punto sobre el río Severn bajo la dirección de Abraham Darby entre 1777 y 1781, usando principios constructivos derivados de la construcción con madera.

104 Whipple (1804-1888) fue autor de dos libros en los que expone sus técnicas para calcular las tensiones en las barras de una estructura en celosía: *Work on bridge building* (1854) y *An elementary and practical treatise on bridge building* (1869).

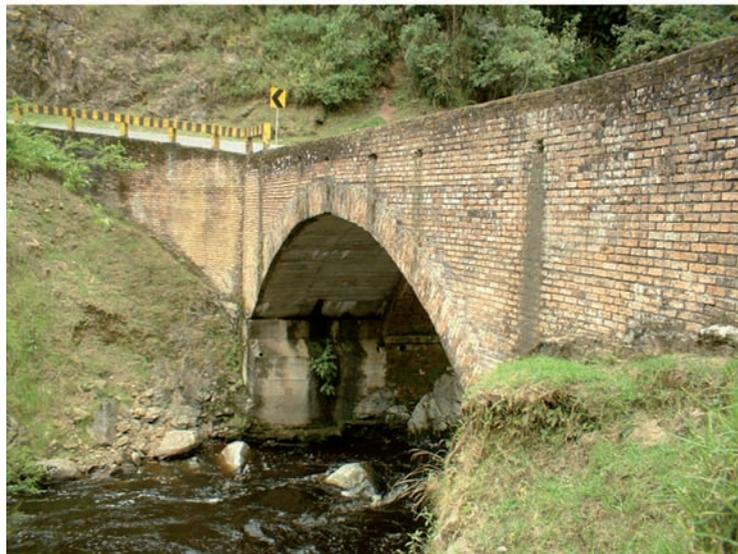
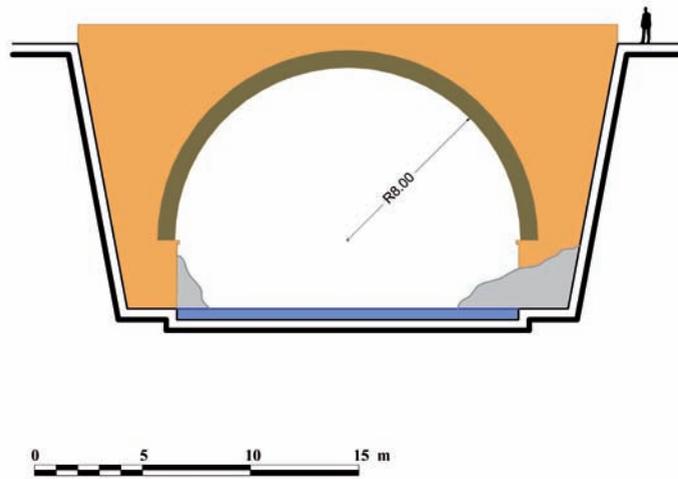


Figura 2.17 Alzada y fotografía reciente del puente sobre el río Cauca en inmediaciones de Coconuco (1907).
Fuente. Elaboración propia.

do los tramos con ayuda de grúas o lanzando las vigas desde los extremos del puente.

Pero en Colombia el hierro era un material escaso y caro, aun en la segunda mitad del siglo XIX. La ferrería de La Pradera, la más grande y desarrollada por aquel entonces en el país¹⁰⁵, producía desde 1882 rieles

105 Poveda (1993: 129).

para ferrocarril y pese a que la modernización tecnológica y la reorganización administrativa lograda entre 1891 y 1893 *la situaron ya como una típica fábrica de hierro (ironworks) muy moderna según los parámetros de la época, aunque sin llegar a ser una acería (steelworks), casi totalmente mecanizada, con cerca de 600 trabajadores distribuidos en nueve departamentos en la jefatura de los cuales se hallaban ingenieros y técnicos, tanto ingleses como colombianos*¹⁰⁶, en 1905 cerró su producción luego del fallecimiento del empresario y gerente, Julio Barriga. No obstante que otros propietarios intentaron mantenerla en funcionamiento intermitente, la ferrería cerró sus puertas de manera definitiva en 1916. En consecuencia, los puentes metálicos que tanto interés despertaban entre los académicos y el gremio de los ingenieros debían ser comprados casi por entero a las casas fabricantes de Londres, Nueva York o Bremen: ejemplo de ello es que en 1930 el Estado colombiano compró estructuras metálicas por un valor mayor de 7 millones de pesos, de los cuales solo \$16.722 se quedaban entre las casas comerciales de Bogotá¹⁰⁷.

En el ámbito académico propio de los ingenieros colombianos –dominado desde la segunda mitad del siglo XIX por dos grandes instituciones, la Universidad Nacional¹⁰⁸ y la Sociedad Colombiana de Ingenieros¹⁰⁹– era evidente el interés por cualificar el conocimiento técnico

106 Mayor (2003:100).

107 Ministerio de Obras Públicas (1930: 12).

108 La ley 66 del 22 de septiembre de ese mismo año constituyó la Universidad Nacional de los Estados Unidos de Colombia y dentro de ella la Facultad de Ingeniería, con lo cual se puso fin al Colegio Militar. A comienzos de 1868 la Universidad abrió sus puertas con cuatro facultades: medicina, ciencias naturales, literatura y filosofía e ingeniería, añadiéndose luego la de derecho y un año más tarde, mediante Decreto Orgánico fechado el 13 de enero de 1868, la Escuela de Ingeniería, que distribuyó sus enseñanzas en cuatro cursos, a cada uno de los cuales correspondía una sola clase para el respectivo año escolar; en 1872 el Decreto Ejecutivo del 3 de agosto redistribuyó los cuatro años de enseñanza en 12 cursos que recogían las materias del anterior plan y añadían otras nuevas como la química. Entre 1881 y 1884 la Escuela de Ingeniería funcionó como dependencia del Ministerio de Guerra debido a que una ley de 1880 había suprimido la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional dando paso al Instituto Central de Matemáticas e Ingeniería; solo en 1885 la Facultad quedó definitivamente organizada.

109 La Sociedad Colombiana de Ingenieros se organizó de manera definitiva el 28 de mayo de 1887 gracias a los esfuerzos de los ingenieros Diódoro Sánchez y Abelardo Ramos, como parte del movimiento científicista del periodo radical y en un momento en que se había incrementado notablemente el número de ingenieros en el país, vinculándose una buena parte de ellos al naciente fenómeno de las obras públicas y muy especialmente de aquellas relacionadas con la construcción de líneas férreas y carreteras. Como medio fundamental para la expresión de sus ideas, crearon la publicación *Anales de Ingeniería*, cuyo primer número apareció a los pocos meses de haber sido conformada la asociación y que todavía hoy continúa circulando. Como lo señala Obregón (1992: 105-141), *desde la instalación formal de la Sociedad, los ingenieros establecieron relaciones cordiales con el Estado; de hecho, nombraron como presidente honorario al ministro de Fomento y ofrecieron la entidad para que sirviese como órgano consultivo, en cuestiones técnicas.*

acerca de los puentes metálicos de celosía, aunque sin abandonar las teorías relacionadas con los puentes de albañilería. En 1891 Julio Garavito y Delio Cifuentes Porras, *inteligentes jóvenes que acaban de terminar sus estudios en la Facultad de Matemáticas e Ingeniería de la Universidad Nacional* publicaron sendos artículos en la revista *Anales de Ingeniería*¹¹⁰, relacionados con la construcción de puentes: el primero, de Garavito¹¹¹, titulado “Método general para el estudio de las armaduras triangulares, aplicado al estudio de la armadura Warren”¹¹², era producto de la tesis que él mismo había presentado para optar el título de ingeniero civil¹¹³ bajo la dirección de Abelardo Ramos¹¹⁴. Estaba dividido en tres partes: la primera explicaba el método general de análisis de barras y nudos partiendo de la cuantificación del valor de las reacciones en los puntos de apoyo, la segunda exponía las consecuencias de dicho análisis y la tercera se concentraba en determinar el esfuerzo máximo en una barra diagonal cualquiera. A manera de colofón, se hacía mención de las aplicaciones del método de análisis referidas exclusivamente al cálculo de puentes a partir de su peso muerto y de la carga viva que transitara sobre él.

El segundo artículo, escrito por Cifuentes, explicaba la llamada *fórmula de Boix*, por la cual se intentaba determinar el espesor que se debía asignar a las bóvedas: *un problema extraño al riguroso análisis matemático, por cuanto depende de un gran número de condiciones, variables en la mayor parte de los casos, y muchas de ellas imprevistas y difícilmente apreciables con certeza*¹¹⁵. Mientras Garavito hacía gala de la abstracción matemática y de un conocimiento bastante riguroso del comportamiento estático de las armaduras, Cifuentes se valía de una introducción breve en

110 *AI*, vol. IV, 45, abril de 1891, pp. 258-260 y 277-288.

111 Garavito sería con el paso de los años protagonista de la ingeniería colombiana: presidente de la Sociedad Colombiana de Ingenieros entre 1916 y 1917, director del Observatorio Astronómico Nacional, profesor y consultor técnico del Estado Mayor, general del Ejército. También fue miembro de varias academias científicas extranjeras, dedicando sus últimos años a la astronomía y las matemáticas.

112 El propio Garavito definía así la armadura Warren: se denomina armadura triangular a la compuesta de triángulos que cubren todo el espacio ocupado por ella. Los lados oblicuos de estos triángulos están conexiados para resistir indiferentemente extensión y compresión; los horizontales resisten únicamente una sola clase de esfuerzo: compresión los superiores y extensión los inferiores. En *AI*, vol. IV, 45, abril de 1891, p. 277.

113 Para ser profesor en Ciencias –título otorgado por la Universidad Nacional–, Garavito elaboraría la tesis titulada *Sección meridiana de un manómetro de aire comprimido, para que la graduación sea constante*. Para ser profesor en Matemáticas la tesis fue *Demostración del juego de la aguja*.

114 Ramos había construido en Bogotá el primer puente de hierro en 1881, sobre el río San Francisco, así como puentes sobre los ríos Coello y Luisa; también estuvo a su cargo la construcción del puente de Útica, de 60 metros de luz, en 1896. Abelardo Ramos falleció en 1906 en el sitio Papagayeros, siendo interventor del Ferrocarril del Pacífico. Ver Bateman (1972).

115 *AI*, vol. IV, 45, abril de 1891, p. 287.

la que explicaba la manera en que varios constructores habían cuestionado la fórmula de Perronet, mediante la cual era posible calcular el espesor de las bóvedas, pasando luego a exponer la nueva ecuación de Boix¹¹⁶, en la que dicho espesor entraba a depender únicamente del valor de la distancia libre entre los apoyos. La *fórmula de Boix* se amparaba además en comprobaciones hechas en puentes existentes. El texto, dirigido a la formación de ingenieros en España, explicaba la estabilidad de construcciones en mampostería haciendo uso de las teorías y fórmulas de Coulomb, de manera clara y asimilable a como las explicaron contemporáneos del matemático francés.

El trabajo de Cifuentes estaba precedido de un extenso comentario firmado con las iniciales A.R. (posiblemente Abelardo Ramos, director de la publicación y director de las tesis de los graduandos) en el que se hacía un recuento de las determinantes a tener en cuenta en el problema: la abertura del arco, el perfil de la curva del intradós, la resistencia de los materiales, la repartición de la carga móvil y el sistema de construcción del arco. Ramos demostraba tener un conocimiento profundo del tema: recogía las consideraciones de Trautwinw, Lévy y Résal¹¹⁷ y hacía un listado con las principales fórmulas dadas por Perronet, Gauthey, Lesguillier, Leveillé, Dejardin y Dupuit¹¹⁸, pero lo más importante era el hecho de que concedía al sistema de construcción del arco una importancia igual a la de los factores geométricos, materiales y vectoriales.

Mientras el dimensionado de los arcos de fábrica se debatía entre una gama amplia de posibles ecuaciones¹¹⁹, el conocimiento del comportamiento estático de las armaduras metálicas empezaba a gozar en Colombia de un alto nivel de precisión. Dejando de lado el peso de la tradición constructiva, el desarrollo de los puentes de hierro en Colom-

116 El libro que cita Cifuentes se titula *Estabilidad de construcciones de mampostería*; fue escrito en castellano y publicado en 1892 en Madrid por la Tipografía de Gregorio Juste. Una breve nota sobre este texto se encuentra en Galindo (2000).

117 Del primero no hemos logrado obtener información alguna. Maurice Levy escribió *La Statique graphique et ses applications* (París, 1886/88), en tanto que Jean Resal fue uno de los más destacados ingenieros franceses de la segunda mitad del siglo XIX, reconocido por tener bajo su dirección la construcción de importantes puentes metálicos. Además escribió *Emplacements, débouchés, fondations pont en maçonnerie: tours de ponts de l'Ecole des Ponts et Chaussées* (París, 1906).

118 Perronet, J. R. (1834), Gauthey, E. M. (1819), Dejardin, M. (1845), Dupuit, J. (1870). No tenemos noticia de la obra de Lesguillier y Leveillé.

119 Otro problema común en la construcción de puentes de arco de mampostería tenía que ver con la determinación del radio de curvatura y el ángulo al centro, conociendo solamente la longitud de la cuerda y la altura de la flecha (luz a cubrir y altura). Y aunque se trataba de un asunto puramente geométrico, inquietaba a los arquitectos e ingenieros decimonónicos. También en *Anales de Ingeniería* se publicó un método capaz de resolver el problema en traducción hecha por Joaquín Pontón Espinosa del artículo escrito por el ingeniero civil E. Sergent: *Anales de Ingeniería*, Bogotá, vol. V, 58, mayo de 1892, pp. 302-303.

bia fue rápido y a gran escala: en 1908 aparecería en Medellín la Casa Horman, propiedad de los señores Horacio Martínez y Manfredo Mejía, quienes se anunciaban como fabricantes de puentes metálicos *a un precio económico (el 40 por 100 menos que los extranjeros) con garantías de solidez y duración, ya sean rígidos o articulados, colgantes de cadenas ó de cables, ya combinados*¹²⁰. Los fabricantes se comprometían a realizar los diseños y ejecutar la obra metálica hasta entregarla empacada y con las instrucciones de montaje; incluso podían entregar la obra terminada. Los datos requeridos para el diseño eran la forma de la construcción, la luz, el ancho, la carga viva, las condiciones del terreno, la relación de la vía con el puente y los materiales disponibles. En nota introductoria de los redactores de *Anales de Ingeniería*¹²¹ se recomendaba a los elogiados fabricantes el que *no consientan que ningún puente salga de sus talleres sin haber sufrido antes las pruebas necesarias de resistencia*.

Sin embargo, y en medio de tanto optimismo, no todas las referencias a la construcción de los nuevos puentes eran exitosas; también hubo tiempo y espacio para los fracasos técnicos, como se registra en el desastre ocurrido al término de la construcción de un *puente rígido de hierro* en el río de La Plata por efecto de la carga aplicada sobre él durante las pruebas de recibo de la obra¹²². Para otros era preocupante el problema de la corrosión de armaduras, y no fueron pocas las voces que advertían de sus peligros, como se registra en el artículo “Duración del Fierro” de T.G. Jackson, publicado en Colombia en 1906:

*La constitución del hierro, muy fuerte desde ciertos puntos de vista, es delicada en otros. La humedad que no ataca el ladrillo ó la piedra, y que apenas destruye muy lentamente las buenas maderas, descompone el hierro muy rápidamente ... En un edificio de hierro, todas sus partes se traban unas con otras, porque se componen recíprocamente de miembros en mutua tensión y compresión que recíprocamente se estiran y se oprimen, de tal manera que la ruptura de un miembro trae consigo la de todo el edificio ... Se dice que un ingeniero ha profetizado que dentro de treinta años no habrá quien emplee el hierro ó el acero en sus edificaciones, y pienso que los arquitectos que deseen que perduren sus construcciones los abandonarán dentro de poco tiempo*¹²³.

120 *Al*, vol. XVI, 187, septiembre de 1908, pp. 72-73.

121 *Ibid*.

122 *Al*, vol. III, 13, agosto de 1888, pp. 1 y ss.

123 *Al*, vol. XIII, 156, febrero de 1906, pp. 252-253.

A lo cual se respondía con soluciones que minimizaban el problema, como lo exponía F. Bicheroux, también en un artículo de ese mismo año:

Por más cuidado que se tenga en el momento de su recepción definitiva, una obra metálica de arte no puede permanecer expuesta indefinidamente á la intemperie, sin malograrse y arruinarse. La visita periódica es necesaria y el reemplazo del revestimiento protector, esto es, la pintura, es indispensable de tiempo en tiempo.

La visita debe hacerse por un técnico, provisto de las herramientas necesarias para sondear los remaches y pernos de la juntura y examinar las uniones. Debe hacerse bajo su dirección el raspado de la pintura y de las partes dudosas, que se sospeche hayan sido atacadas por el moho. Debe cerciorarse que antes de la pintura, las manchas de moho han sido martilladas, enlucidas de aceite y raspadas; que las fallas han sido masilladas, que la pintura es espesa, no diluida y libre de impurezas, muy especialmente de sales minerales que se descomponen y provocan la oxidación.

Realizado este programa elemental, la duración y seguridad de las construcciones metálicas están aseguradas y su conservación no es ya sino un juego¹²⁴.

Las inquietudes también se referían a las dudas que arrojaba la durabilidad de los puentes metálicos. Notas como la siguiente intentaban sembrar el escepticismo en ingenieros y arquitectos sobre el nuevo material, cuando a raíz de la inauguración de un enorme puente de arcos de fábrica en Sajonia, se expresaba: *Verdad es que los puentes de piedra duran siglos y más siglos, mientras nadie puede asegurar cuántos años tienen de vida los económicos puentes de hierro¹²⁵.*

El interés por los puentes metálicos se extendería también a publicaciones no especializadas como el *Papel Periódico Ilustrado*, que llegaría a incluir en sus páginas algunos grabados de ellos con el fin de reafirmar entre sus lectores un aire de progreso nacional: láminas especiales merecieron los puentes metálicos de Honda –sobre el río Gualí–, y de Colón –en Bogotá–, así como el bello puente colgante sobre el río Suaza, en Tolima, a la altura del paso de La Jagua, obra de 87.78 metros de luz a cargo del ingeniero norteamericano E.G. Barney, quien lo hizo posible empleando 30 hilos de 7 alambres cada uno de 427 cienmilímetros de espesor¹²⁶.

124 *AI*, vol. XIV, 161, julio de 1906, pp. 17-22.

125 *AI*, vol. XIV, 162, agosto de 1906, p. 64.

126 *PPI*, vol. 4, 84, febrero 5 de 1885, p. 190.

Pero no solo era importante el material: también lo era la tipología. Lentamente y usando las páginas de la publicación oficial de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, los *Anales de Ingeniería* empezaron a pregonar las ventajas de los puentes colgantes: por ejemplo, el artículo de 1899 titulado “Puentes”, firmado por el ingeniero Timoteo Gutiérrez, recomendaba la construcción de puentes colgantes en todo el país amparándose tanto en razones dadas por la experiencia como en ejemplos concretos. Para ello citaba el caso de los *puentes baratos* empleados por el vallecaucano Cenón Caicedo en el paso de Aganche, sobre el río Ovejas, en la ruta de Popayán hacia Cali:

Con frecuencia ocurre el caso de consultar la conveniencia que haya comparativamente, al construir un puente, sobre si sea más económico construirlo en madera rígido, ó colgantes en cables de hierro ó alambre galvanizado. Hoy que el Gobierno tiene necesidad de construir varios puentes, creemos hacer un servicio poniendo en conocimiento del público nuestros pequeños conocimientos y práctica adquiridos con la experiencia en este ramo ...

Si se trata de un puente de 12 á 16 metros de longitud, donde los montes están inmediatos y fácilmente se consiguen vigas que tendidas de uno á otro lado dan el largo suficiente, y además son maderas durables, es claro que esto es lo más económico y sencillo, formando el piso con varas y rama cubierto con un terraplén de tierra, como eran y aun existen varios puentes ... Si se quiere mejorar prolongando su duración, hay necesidad de ponerle cubierta, y en lugar de tierra y rama hacer el piso de tablonas ... Cuando el trayecto ó ancho del río excede de 20 á 25 metros, consultando la economía relativamente con su mayor duración, la experiencia ha demostrado que, debido á la gran resistencia del alambre galvanizado de acero, en la mayor parte de los casos es más económico y conveniente el sistema de puentes suspendidos...¹²⁷

El discurso de Gutiérrez tenía un claro fin: defender el sistema de puentes suspendidos en clara contraposición a los rígidos de madera apelando a los criterios de durabilidad, peso propio, costos de mantenimiento y accesibilidad a los materiales, haciendo incluso alusión de experiencias internacionales y nacionales:

En nuestro país, uno de los primeros puentes suspendidos fueron: en Santander, sobre el río Sube, por el inteligente norteamericano D. David Macormik, el cual, con 37 metros 60 centímetros de luz, cuenta

127 *Al*, vol. XI, 132 y 133, agosto y septiembre de 1899, pp. 230-237.

*yá con treinta años; y en Cundinamarca, el construido por nosotros por primera vez, y por consiguiente, todavía sin los conocimientos ni práctica adquiridos en ocho que hemos construido posteriormente suspendidos...*¹²⁸

Y en el campo específicamente técnico, relativo al tensado de los cables, Gutiérrez anotaba:

*Los cables más comúnmente empleados en los puentes suspendidos, son sin torcer, sino sencillamente unidos con líos de alambre más delgado, de 10 á 15 centímetros de largo la extensión de cada lío, y á cortas distancias de 30 á 40 centímetros entre uno y otro lío, siendo, sí, circunstancia importante que los alambres del cable sean igualmente largos, para que la tensión y resistencia sea uniforme, y que los líos queden fuertemente apretados, lo que contribuye á la mayor igualdad de los alambres. Tanto para la igualdad de los alambres como para hacer los líos con mayor presión y perfección posibles, se puede emplear un sistema y aparatos sencillos y fáciles de construir, para hacer los cables inmediatos al puente por partes, y luego terminarlos en el mismo punto de su colocación, uniendo varios haces en uno solo con los líos*¹²⁹.

En la parte final de su artículo, el autor pedía excusas por no expresarse en *términos técnico-científicos*, sino en unos más *conocidos y usuales* debido a que su formación era más práctica que teórica¹³⁰. Paralelamente, desde el gremio de los ingenieros salían continuas voces de protesta en contra de aquellas obras que se hacían siguiendo técnicas convencionales, como se registró en el artículo “Puente sobre el río Bugalagrande”:

Del informe que rindió el Ingeniero oficial para dar por recibido el puente sobre el río Bugalagrande, publicado en el Diario Oficial, número 10 910, tomamos lo siguiente: “Antes de concluir, séame lícito lamentar que en la construcción del puente se haya cambiado el sistema norteamericano de Tewn por el antioqueño; pues aparte del servil tributo á la rutina que entraña, esta última clase de puentes lleva, con el exceso de materiales, inevitablemente impreso el tatuaje de la tosqueidad, mal que se observa también en los techos y las paredes de nuestras habitaciones. El puente que construyó en 1890 el Sr. Haman conforme á planos del inolvidable ingeniero Dr. Rómulo Durán, puede por su ele-

¹²⁸ *Ibid.*, p. 234.

¹²⁹ *Ibid.*, p. 237.

¹³⁰ Sabemos que Timoteo Gutiérrez era miembro de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, pero no tenemos datos de su formación académica.

gancia y solidez servir de modelo para las necesidades futuras del país en esta clase de fábricas. Ciertamente que el Tesoro departamental no está en capacidad de adoptar generalmente sobre nuestros ríos puentes de material ni de mampostería; empero, sin preconizar para los de madera un patrón exclusivo, veo llegada la hora de construir tramos que satisfagan la conocida fórmula de la que la belleza de una obra depende de la perfecta adaptación de los medios al objeto, consultando la topografía regional, las sumas disponibles y la calidad de los materiales¹³¹.

Terminaba el autor su exposición afirmando que el Gobierno debía *crear escuelas objetivas que enseñen a hacerlas* (construcciones por el sistema norteamericano) *a todos los carpinteros del país, para vulgarizarlas y abaratarlas, y ofrecer medios nuevos a este importante gremio de artesanos.*

Hay incluso ejemplos registrados en los cuales un puente rígido fue reemplazado por uno colgante. El puente Próspero Pinzón, sobre el río Chicamocha, aparentemente construido sobre terreno poco sólido, experimentó el socavamiento del terreno bajo uno de sus estribos por el caudal mismo del río, haciendo que este girase sobre su base, causando el colapso de la estructura en diciembre de 1901; en su remplazo, los ingenieros Jacinto Caicedo y Olimpo Gallo diseñaron un puente suspendido de *doble cadena rígida*, en el cual emplearían buena parte de las piezas del puente anterior:

De acuerdo con los planos aprobados, es un puente suspendido de 58 metros de luz por 2-60 de anchura, una longitud total de 90 metros y una resistencia de 400 kilogramos por metro cuadrado.

Dos torres ó portadas de forma rectangular de 6 metros de altura, construidas con vigas maestras del antiguo puente y elegantemente decoradas con arabescos de hierro plano, soportan cuatro enormes cadenas, colocadas en pares superpuestos unidos por diagonales y solidamente aseguradas por los extremos en galerías de anclaje, á 12 metros de las torres y á 2 ½ de profundidad. Cada una de estas cadenas tiene una longitud de 89 metros y pesa 200 arrobas, ó sean, 2500 kilogramos. Sus eslabones están formados por grandes planchas de hierro articuladas con pernos, de cuyas cabezas se desprenden los pendolones, cada uno compuesto por dos trozos de varilla conectados con tubos de doble rosca, espiral inversa, que permiten nivelar el piso del puente fácilmente. Este está construido con durmientes de tobo y mangle. El barandaje, sólidamente atornillado al piso, es de mangle, con cruces de San Andrés

131 *Al*, vol. XI, 128, abril de 1899, pp. 127-128.

*entre cada par de pendolones. La altura del tablero o piso sobre el nivel ordinario de las aguas es de 6 metros*¹³².

Una de las obras más impactantes para la ingeniería colombiana de fines del siglo XIX fue el Puente de Occidente, obra colgante construida entre los municipios de Sopetrán y Antioquia salvando el río Cauca mediante una estructura suspendida de 995 pies de luz, dirigida por José María Villa¹³³. Una excelente descripción de la obra se encuentra en las páginas de *Anales de Ingeniería*, de la pluma de Antonio Duque, quien visitó el lugar en el momento justo en que se estaba adelantando la construcción¹³⁴:

Sobre una roca gnésica, que el Cauca en su acción secular ha relabrado para formar un lecho, se levantan á la enorme distancia de 955 pies ingleses (cerca de 300 metros) las bases del puente, hasta alcanzar una altura de 45 pies próximamente sobre el bajo nivel de las aguas del río. Sobre estas bases descansan los pedestales de las torres, constituidos cada uno de ellos por cuatro muros de mampostería como las bases, encerrando un área de 16 x 16 pies hasta la altura de 12 pies, donde remata en una severa corniza. Este sólido pabellón tiene cuatro ventanas, dos al río y dos al camino, y soporta la torre, que consiste en una elegante y sólida construcción de hierro y madera, de 25 pies de altura, y de forma cónica ingeniosamente combinada para que, resistiendo el gran peso del tablero, se puedan cambiar sus piezas constitutivas, caso de que se debiliten por el deterioro... El anclaje del lado de Sopetrán consiste en dos muros de 30 x 12 pies de base y 11 de altura sobre la calzada; la cual está sostenida en su flanco derecho por un muro inclinado y que conexiona el anclaje con las bases de las torres. Por dos bóvedas inclinadas y de suficientes dimensiones para transitar por ellas, pasarán los cables para amarrarse en las anclas, las cuales son accesibles por una bóveda cuya entrada está del lado del muro de retención y cuyo

132 *AI*, vol. XIII, 150 y 151, agosto y septiembre de 1905, pp. 39-42.

133 Villa había obtenido su formación como ingeniero mecánico en el instituto Stevens de Hoboken (Estado de New Jersey) luego de sustentar su tesis de grado sobre la máquina de vapor y de colaborar en el diseño del puente de Brooklyn y en la traducción de la *Mecánica Celeste* de Laplace. A su llegada al país, habría dirigido la construcción de un puente colgante sobre el río Cauca en el camino de Ituango a Yarumal en el sitio denominado Pescadero; posteriormente la de otro en el camino de Jericó, y la de un tercero en La Pintada. Ver Bateman (1972: 566-569).

134 Según la nota titulada "El puente de Occidente", firmada con las iniciales J. M. J. Mtz y publicada en *Colombia. Revista semanal* (Medellín, No. 55, junio 13 de 1917, p. 47), el tomo V del tratado de puentes metálicos titulado *Higher Structures*, escrito por Merriman & Jacoby, incluía al puente colombiano como el séptimo en el mundo por su longitud, el cual había sido construido por Villa en compañía del ingeniero consultor del Ferrocarril de Antioquia, Fabriciano Botero.

*eje es perpendicular á la dirección de los cables ... 4 cables, compuesto cada uno de 840 alambres paralelos del número 12 (Birmingham gauge), cargarán la plataforma ó tablero. Cada cable tendrá 4 pulgadas de diámetro ... Dadas las buenas cualidades de este alambre, podemos, sin que sea exagerado, estimar su última resistencia en 80 toneladas... Por sus extraordinarias dimensiones, será el Puente de Occidente uno de los primeros de Sur-América, si no el primero. Es más largo que el colgante del Niágara entre Estados Unidos y Canadá, el cual mide solamente 821 pies, y la mayor luz, entre las varias del de Brooklyn, le excede 600 pies solamente...*¹³⁵



Figura 2.18 Puente de Occidente, del ingeniero José María Villa, en Santa Fe de Antioquia (1891). Foto: J. Galindo (2002).

Pocos años después, sobre el río Magdalena, en la población de Honda y bajo la iniciativa privada de Bernardo Navarro¹³⁶, se dio inicio a la construcción del puente metálico en cantiliver más largo de Colombia: bautizado con el apellido de su promotor, las obras comenzaron por la colocación de la primera piedra el 13 de junio de 1894, un hecho registrado de la siguiente manera por *Anales de Ingeniería*:

Por consecuencia de la revolución se suspendieron los trabajos durante siete meses y después, con motivo de un juicio de policía intentado por

¹³⁵ *AI*, vol. V, 51, octubre de 1891, pp. 93-96.

¹³⁶ Navarro había recibido autorización del Gobierno Nacional para la construcción del puente mediante un contrato de concesión que le permitía el cobro de derechos de pontazgo durante un lapso de 99 años; dicha autorización había sido otorgada por el Congreso de la República a través de la Ley 6 de 1892.

el Ferrocarril de La Dorada, tuvo que suspenderse nuevamente como por cinco meses. En el tiempo transcurrido del 13 de junio de 1894 a Enero de 1895, y de octubre a diciembre de este mismo año, y de mayo de 1896 a junio de 1898, se construyeron los estribos de piedra, cemento Pórtland y cal. En este último mes comenzaron los operarios americanos enviados por la San Francisco y en número de cinco, cuyo jefe es Mr. Geo W. Jones, la superconstrucción, y el Sr. Navarro los anclajes, que como los estribos, son de piedra, cemento y cal¹³⁷.

La estructura, adquirida directamente con la casa americana San Francisco Bridge Company, tenía una longitud total de 550 pies y estaba dividida en cinco secciones: dos tramos extremos a cada lado tenían una longitud de 100 pies y 5 pulgadas, en tanto que el tramo único central llegaba a 148 pies y 4 pulgadas; el ancho total era de 17 pies (12 de ellos libres) y la altura media sobre el nivel de las aguas llegaba a 60 pies, lo que permitía una libre navegación por el río; el peso se estimaba en 330 mil libras y tuvo un costo de \$100.000 oro americano. En la construcción de los estribos participó también el ingeniero José María Villa, contratado por Navarro hasta la inauguración de la obra, el 16 de enero de 1899.

Así, al término del primer lustro del siglo XX el territorio colombiano se había ido poblando de estructuras metálicas: solo en la publicación oficial de la Sociedad Colombiana de Ingenieros se daba cuenta de algunas de las más importantes estructuras de este género, entre las que se destacaban el puente sobre el río Neiva en el punto denominado Las Lucrecias (de 81.50 metros de luz, a cargo del ingeniero Benjamín Dussán¹³⁸); un puente de hierro contratado por el gobierno del Tolima con el señor Mirtiliano Sicard (*quien partió para los Estados Unidos con el fin de comprar la obra*¹³⁹); un puente de hierro sobre el río Suárez, entre Zapatoca y Santander (de 50 metros de luz, a cargo del ingeniero Daniel Martínez); un puente sobre el río Negro en el paso de Quetame (entre Bogotá y Villavicencio, que contaba con 30 metros de luz, a cargo del ingeniero Abelardo Ramos¹⁴⁰); y el puente de Alcantuz, sobre el río Suárez, en Santander (que procedente de Liverpool, llegó a Barranquilla en el vapor *Barbadian* el 17 de febrero de 1898 para ser conducido desde allí a la población de Puente Nacional, luego de pasar por Honda y Bogotá), el cual mereció una publicación propia a cargo de la imprenta de La Luz, en Bogotá¹⁴¹.

137 *AI*, vol. X, 122-124, octubre a diciembre de 1898, pp. 302-305.

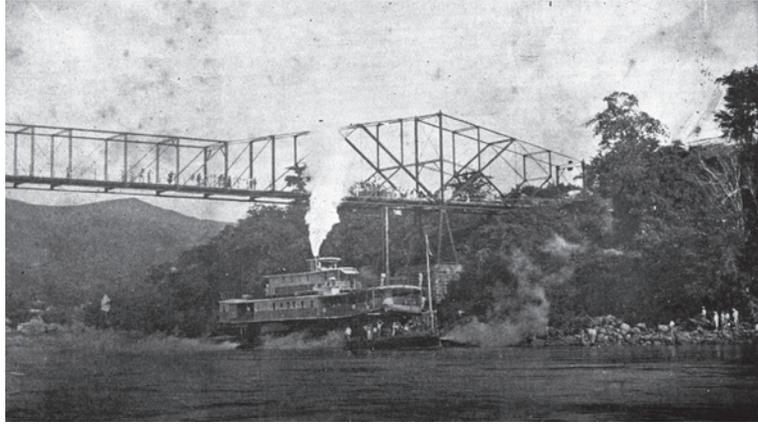
138 *AI*, vol. XV, 184, junio de 1908.

139 *AI*, vol. III, 26, septiembre de 1889.

140 *Ibid.*

141 Anónimo (1899).

Figura 2.19 Puente de Navarro, de la San Francisco Bridge Co. y el ingeniero José María Villa, en Honda, sobre el río Magdalena (1899).
Fuente. Ortega (1923).



En un lapso de pocos años y marginados de la discusión académica, los espacios para la práctica de la ingeniería colombiana habían aceptado las estructuras metálicas, en especial las colgantes, con un inusual aire de optimismo e imagen de progreso: en 1908 el gobernador del Departamento de Quesada, M. Brigard, enviaba carta al director de la Sociedad Colombiana de Ingenieros solicitando profesionales con conocimientos en el montaje de puentes suspendidos:

Necesito ingeniero que dirija puentes colgantes sobre ríos Gachetá y Guavio. Suplico a usted se sirva indicarme candidato de Ingeniero en quien por sus conocimientos y práctica en obras de tal clase, puedan encomendársele dirección de trabajos lo más pronto posible. Sueldo mensual de cien pesos¹⁴².

Todo ello no hacía más que abrir de par en par las puertas de la Nación para que una vieja técnica, con aires de novedad y expresada en un nuevo y poderoso material, se afincara en su centenaria tradición constructiva. En la región del valle del río Cauca no se harían excepciones.

¹⁴² *AI*, vol. XIV, 164, octubre de 1906, p. 98.

CAPÍTULO 3

Cómo edificar un puente de arco

Tal vez por lo obvio de su función, los puentes son artefactos pocas veces definidos a lo largo de la historia de la teoría de la arquitectura. Vitruvio, el primigenio autor romano no los menciona de manera explícita a lo largo de sus *Diez Libros de Arquitectura*¹, aunque del capítulo XII del libro V, titulado *De los puertos de mar y otros edificios en el agua*, bien podrían extraerse algunas lecciones constructivas útiles, en especial las referidas a la cimentación de las obras bajo el agua. En cualquier caso, Vitruvio no llega a formular una teoría específica para el proyecto de arcos de cantería o albañilería, tema de vital importancia para los constructores de puentes que ya entonces ejercían su oficio².

La obra de León Battista Alberti, *De Re Aedificatoria*³, solo se detiene a hablar de los puentes en el capítulo VI del libro IV titulado *Sobre las obras de uso público*, el cual se inicia con una reiteración acerca de la importancia de ellos como parte de la calzada. Trata además de la necesidad de escoger un buen sitio en aras de su utilidad, su construcción y su durabilidad. Alberti instaaura allí una clasificación bastante elemental para este tipo de obras, pero que ha de seguir siendo válida por muchos siglos: los divide en puentes *de piedra y de madera*, afirmando que los segundos son

1 Vitruvio (1787).

2 Según Huerta (2004, 135), en la época helenística sí se escribieron al menos, tratados sobre bóvedas, uno de ellos atribuido a Herón de Alejandría (ca 60 dC), hoy extraviado.

3 Alberti (1991).

de más fácil ejecución, aunque en cualquier caso deben ser *sumamente firmes*. En los de piedra distingue sus partes principales: *los apoyos en las orillas* (también llamados cepas o estribos), *los pilares, los arcos y el pavimento*; y claramente diferencia las características de los dos primeros:

Entre los estribos y los pilares existe la siguiente diferencia, que los estribos es preciso que estén firmemente asentados, con vistas no sólo a soportar la carga de la arcada, como hacen también los pilares, sino también, y en un sentido más amplio, para resistir el empuje de las cabezas del puente, de los arcos para evitar que se rajen⁴.

Las pautas constructivas y las reglas geométricas dictadas por Alberti serán las más copiadas en buena parte de la literatura técnica y probablemente las más usadas en casos prácticos, al menos hasta los albores del siglo XVIII. Ejemplo de lo primero es Palladio (1570), quien desarrolla el tema en su tratado afirmando como premisa que los puentes deben cumplir los requerimientos de la tríada vitruviana, aunque adaptados a las necesidades de su tiempo:

Como muchos ríos, por su anchura, profundidad y velocidad, no se pueden vadear, pronto se pensó en la utilización de los puentes. Se puede, pues, decir que ellos son parte principal del camino y que no son otra cosa que una carretera hecha sobre el agua. Deben tener las mismas cualidades que las que hemos dicho se deben exigir en todas las construcciones. Esto es, que sean cómodos, bellos y duraderos⁵.

Además de presentar algunos puentes de madera de su invención, especialmente diseñados para evitar colocar apoyos dentro del río durante su construcción, Palladio dibuja y explica varios modelos de puentes de arcos (el de Riminí y el de Vicenza entre ellos) estableciendo algunas de sus relaciones geométricas fundamentales, las cuales, según Huerta (1998), no son muy distintas de las recomendadas antes por Alberti.

Otros autores tan reconocidos en el ámbito de la arquitectura civil, como Serlio (1566), Scamozzi (1615), San Nicolás (1639? y 1664) o Milizia (1781), dedicarán algunas páginas al tema de los puentes y su construcción. El primero hará breves referencias al trazado geométrico de los arcos, el segundo antepondrá su definición estructural a los criterios de belleza y utilidad con especial interés en la buena cimentación como garantía de la solidez, el tercero tratará de algunas reglas y observaciones

4 *Ibid.*, 186.

5 Palladio (1988: 275).

sobre el diseño y construcción de arcos, bóvedas y cúpulas⁶, y el último retomará los principios gráficos para resolver el problema del dimensionado de las pilas. También obras manuscritas como las de Francesco di Giorgio (Mss, s. XV) y Antonio Averlino, *El Filarete* (Mss, s. XV), se mostraron interesadas en el tema de los puentes de arcos, en especial en lo referente a los cimientos. En el contexto ibérico hay que destacar las apreciaciones tardo-medievales de Juanelo Turriano (Mss, s. XVI), quien muestra ser un buen conocedor de Alberti y de Simón García (Mss, 1681), quien a su vez retoma las enseñanzas de fray Lorenzo de San Nicolás, principalmente.

Para comienzos del siglo XVIII la disciplina de la mecánica contaba con un desarrollo suficiente capaz de dar explicaciones científicas a los procesos técnicos⁷. Un paso importante en el ámbito de las estructuras abovedadas lo constituyen dos trabajos de Philippe De la Hire⁸, quien en el primero de ellos, su libro de 1695, logró exponer el mecanismo que mantiene en su sitio cada una de las dovelas del arco, en tanto que en la *Memoria* de 1712 desarrolló una explicación para establecer el tamaño de los estribos encargados de soportar el peso de las mismas. Las conclusiones de ambos escritos fueron rápidamente retomadas por Bernard Forest de Belidor e integradas en las explicaciones de sus obras publicadas pocos años después⁹, pero su mayor influencia práctica sería notable en el primer tratado específico sobre la construcción de puentes, publicado en 1716, escrito por Hubert Gautier y titulado *Traité des ponts*, del que se hicieron varias ediciones en los años siguientes¹⁰. Su autor se presentaba ya en la portada del texto como *Arquitecto, ingeniero e inspector de puentes y caminos*, cuyos principios *resumen algunas de las teorías más en boga en su época*, a la vez que ofrecía una metodología propia que ponía en evidencia el estado de las diferencias entre la práctica constructiva y los métodos matemáticos.

6 Una descripción bastante detallada de los conocimientos de fray Lorenzo de San Nicolás en los temas relacionados con arcos, bóvedas, cúpulas y puentes, puede consultarse en Huerta (2004, 240-256).

7 Huerta & De la Cuerda (1998).

8 De la Hire (1695) y De la Hire (1712).

9 Belidor (1725), (1729), (1737-39) y (1750).

10 La primera edición es de 1716; se ha consultado, además de la primera, la edición de 1727, que se encuentra en la biblioteca pública Arús de Barcelona, y la de 1765 que se encuentra en la biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Las citas incorporadas al texto corresponden a la de 1765. No existen mayores diferencias de contenido entre ellas: la de 1716 tiene 37 capítulos, los mismos de la de 1765. En las de 1727 y 1765 se incluye una *Dissertation* con alusiones directas a los problemas de dimensionado de arcos y estribos, principalmente.

El *Traité des ponts*, en la edición de 1716, está dividido en 37 capítulos que van de lo general (historia, nomenclatura, terminología) a lo particular (uso de maderas, pilotes, obras de cimentación y aspectos legales), respaldándose en la autoridad de personajes como Alberti o Palladio. Singular importancia adquiere su *Dissertation*, incluida ya en las ediciones de 1727 y 1765¹¹, en la que Gautier discute problemas relacionados con la estática y la resistencia de materiales con la clara intención de aplicar sus principios a la comprensión de los problemas estructurales y constructivos. En el preámbulo de tales disertaciones, define la arquitectura de su tiempo como *un arte que requiere del conocimiento de las leyes de la mecánica*, pero *imperfecta* ante la falta de acuerdo acerca de los principios que en ella puedan ser válidos:

*Las Artes no son fundamentadas sino en la Mecánica, y la Mecánica es una parte de las Matemáticas, que son Ciencias que se demuestran ... La arquitectura es un Arte que depende en parte de estas Ciencias, especialmente de la mecánica y sobre todo de la física ...Las artes son todavía imperfectas, y especialmente la Arquitectura, donde se ve como las cosas cambian dos y tres veces cada siglo...*¹²

Gautier considera que en la arquitectura, cualquiera que ella sea, tanto la preocupación por las correctas proporciones como el comportamiento mecánico de las edificaciones, constituyen sus mayores dificultades:

*La proporción en todas las Obras de Arquitectura, de cualquier especie, y el Mecanismo de sus esfuerzos, son los aspectos en donde ni los más hábiles Arquitectos han podido ponerse de acuerdo y son ahora los más difíciles de este Arte*¹³.

A partir de la obra de Gautier, ningún tratado impreso podrá prescindir de argumentaciones matemáticas para explicar el comportamiento de puentes de arco y, a partir de allí, desarrollar aspectos relativos a su construcción. De ese extenso conjunto de obras impresas se destacarán,

11 Según Huerta (2004, 314), la *Dissertation* fue publicada en 1717 y a partir de la tercera edición del *Traité ...* se incorpora definitivamente a manera de apéndice.

12 Gautier (1765: 341-342): *Les Arts no son fondez que sur les Méchaniques, & les Méchaniques sont partie des Mathematiques, qui sont des Sciences qui se démontrent ... L'Architecture est un Art qui dépend en partie de ces Sciences & surtout des Méchaniques, mais encore de la Phisique... Les arts sont encore fort imparfaits, & surtout l'Architecture, où l'on voit que les choses y changent des deux à trois fois differement dans chaque Siècle...*

13 Gautier (1765: 342): *La proportion dans tous les Ouvrages d'Architecture de quelque espèce qu'ils puissent être, & le Méchanisme de leurs efforts, dons les plus habiles Architectes ne sont point convenus a été jusqu'à present le plus difficile de cet art.*

entre otras, las de Müller (1769), Bails (1796), Dejardin (1845), Dupuit (1870), Debaube (1875), Croizette (1885), Degrand y Résal (1887-1889). La influencia de muchos de estos autores europeos –desde clásicos como Vitruvio y Alberti hasta los contemporáneos a los ingenieros decimonónicos– sobre los profesionales y prácticos de la construcción que desarrollarán su trabajo en tierras americanas es un hecho demostrado y documentado en las investigaciones realizadas por Gutiérrez (1972) y Galindo (2000), especialmente.

Es necesario pasar revista a los aspectos más relevantes de la construcción de puentes de arco de ladrillo estableciendo, por una parte, las recomendaciones planteadas por los tratadistas clásicos y, por la otra, las respuestas locales que se daban a los problemas operativos, conformando así una tradición constructiva coherente y capaz por sí misma de legar un patrimonio edificado numeroso, notable y duradero.

Elección del sitio y cimentación

En muchos de los tratados clásicos de arquitectura e ingeniería, como parte de las observaciones relativas a la construcción de un puente, casi siempre se pone de manifiesto, en primer lugar, el principio relativo al emplazamiento de la obra. Alberti (1485), por ejemplo, lo expresa de la siguiente manera:

El puente es una parte importantísima de la calzada. No cualquier lugar es el adecuado para instalar un puente. En efecto, aparte de que no debe estar apartado ni arrinconado para disfrute de unos pocos, sino en medio de la región para uso comunitario, debe ser emplazado en donde resulte fácil su construcción, no ocasione un gasto exorbitante y haya perspectivas de que vaya a mantenerse en pie de por vida¹⁴.

Goce público, fácil ejecución, economía de medios y durabilidad eran pues las premisas albertianas que sugerían, además, empezar las obras en otoño, cuando el nivel de las aguas estaría en su punto más bajo, con la colocación de una doble hilera de estacas a la manera de un cerramiento que permitiese achicar el agua y limpiar la superficie donde se hincarían los pilotes de madera; sobre ellos se levantaban las pilas del puente que a su vez soportaban los arcos de fábrica cuyas piezas debían unirse mediante grapas o crampones de latón. Sin entrar en detalle, Alberti afirmaba también que el espesor de los pilares debía ser la cuarta parte de

14 Alberti (1485: 184-185).

la altura del puente. Como último punto, trataba de la construcción del pavimento, el cual debía ser bastante resistente para soportar el peso de las personas y los carros tirados por caballos.

Más específico en torno al tema de las cimentaciones era su antecesor Vitruvio (1787), quien explicaba en detalle los procedimientos necesarios para hacer unas buenas bases sobre el fondo de lechos pantanosos, lo cual constituía un sentido problema en la construcción de puentes, en especial en aquellos donde una o varias de las pilas se asentaban en el medio del curso del río:

En estando bien calçado y bien denso el material, se sacará el agua del caxon interno, agotandola con cócleas, ruedas ó tímpanos; y despues se abrirán zanjas en aquel espacio. Si el suelo fuere de tierra, se profundizaran hasta lo firme, y siempre mas anchas de lo que ha de ser la fabrica fuera de la tierra. Luego vaciadas de la tierra y agua, se llenarán de estructura compuesta de piedra menuda y mortero de cal y arena. Pero no hallando suelo firme, se hará empalizada de estacas chamuscadas de chopo, olivo ó roble; llenando de carbon los intervalos ...Sobre este suelo se levantará en rededor una pared de piedras esquadradas, lo mas largas que se pueda, para que haya menos juntas, y traven mejor á las piedras de encima. El vacío que queda se llenará de cascote, ó bien de estructura: y en esta forma se podrá levantar aunque sea una torre encima¹⁵.

Durante el Renacimiento, *El Filarete* (Mss, s. XV) desarrolló los conceptos de Vitruvio acerca de la construcción de cajones de madera colocados sobre el río con ayuda de barcas que luego debían rellenarse con cascotes. En su obra manuscrita, redactada a manera de diálogo, se lee al respecto lo siguiente:

*–Pero dime, ¿cómo vas a hacer que los cimientos sean fuertes y duraderos de modo que no se deterioren por avenida ni por otro accidente?
–Os diré, señor, cómo lo haré. Voy a encargar algunas cajas de madera que serán así. Cada una tendrá por un lado catorce brazos y por el otro veinticinco. Y es menester que sean de buena madera, que esté bien aserrada y no se hinche con el agua. Y para que no se muevan para nada, les pondré en varios sitios puntas de hierro, como se hace en una sarracena, para que se claven en el fondo del río¹⁶.*

15 Vitruvio (1787: 134).

16 Filarete (Mss, s. XV: 218).

Reiterando lo anterior y conforme a lo expuesto por Scamozzi (1615), era habitual que los cajones, hechos de buenas maderas, bien calafateados y con las juntas selladas, se colocaran sobre el lecho del río para luego proceder a extraer el agua con la ayuda de baldes o, en casos más sofisticados, con un tornillo de Arquímedes y así disponer de una superficie sobre la cual cimentar, bien con piedra, bien con pilotes enterrados a profundidad media. El italiano también incluye explicaciones referidas a la manera de cimentar mediante emparrillados de madera que se mantenían sobre la superficie del agua con la ayuda de cables o máquinas y sobre los cuales se vaciaban grandes cantidades de piedra; también comenta el recurso puesto en práctica por los antiguos, consistente en desviar provisionalmente el curso del río mientras se levantaba el puente –como se hará en la construcción del puente Ortiz en la ciudad de Cali, concluido en 1845– e incluso una opción más arriesgada consistente en construir el puente en seco y luego, una vez a término, llevar hasta él la corriente del río mediante complejas obras de excavación.

Autores del siglo XVIII como Gautier (1765), Belidor (1737-39 y 1750) y Müller (1769) logran ser más precisos e incluyen cuidadas láminas que ilustran sus explicaciones acerca de las obras de cimentación. El primero de ellos, por ejemplo, empieza por organizar y clasificar las operaciones proyectuales y constructivas: levantar el plano del sitio, determinar la cantidad de arcos, hacer un perfil con la profundidad del río, establecer el nivel de las aguas, estudiar la consistencia del suelo tanto en el fondo del río como en las orillas, fijar una dimensión para los pilotes, consultar a los vecinos del lugar para saber el nivel máximo de las aguas y, por último, definir los materiales que se emplearán. Posteriormente, retoma las posibilidades ya expuestas por Scamozzi y explica algunas experiencias prácticas en las que él mismo ha tenido que intervenir, como las de los puentes de Coursan, en el Languedoc, y el Nuevo de Toulouse.

Belidor (1750), en los capítulos XI y XII, desarrolla el tema de la construcción de puentes de mampostería y las cimentaciones dentro del agua, respectivamente. Su exposición tiene un carácter didáctico, en especial cuando explica el orden y la secuencia de los trabajos, como se ilustra en la plancha LVII de su tratado.

Las figuras describen paso a paso la colocación de los pilotes, del emparrillado de madera que deberá ponerse sobre ellos, de las hiladas de piedra y la geometría de las pilas, todo a partir del ejemplo del nuevo puente de Compiègne, en cuya construcción Belidor habría participado. Páginas más adelante, se explica un método de cimentación sin el uso de cajones o ataguías (en francés *batardeaux*), piezas incómodas y de elevado costo, haciendo uso de máquinas simples que a la manera de grúas dispuestas

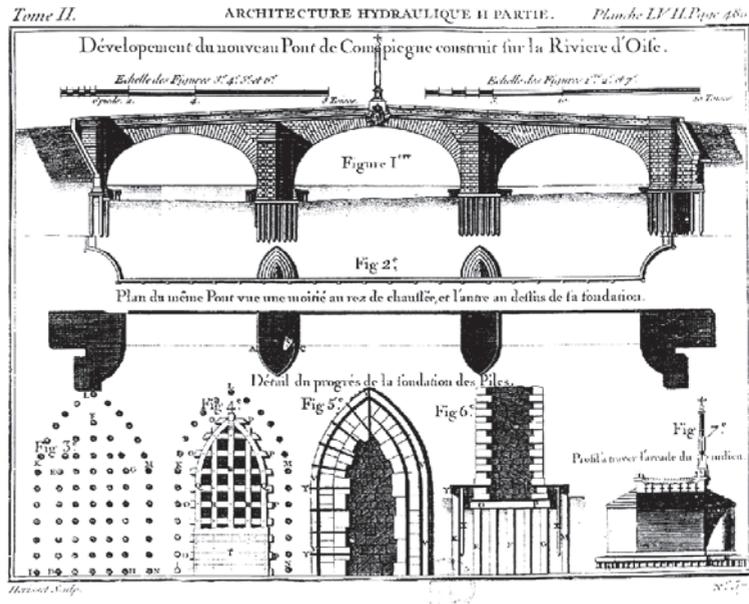


Figura 3.1
Explicación acerca de la cimentación de puentes y geometría de los tajamares.
Fuente: Belidor (1750, plancha LVII).

sobre rieles por encima del nivel de las aguas facilitaban el hincado de pilotes, el montaje de los emparrillados y los tendidos de piedra.

La versión del tratado del inglés John Müller (1769), traducida al castellano por el español Miguel Sánchez Taramas y usada en las academias de ingenieros españoles como texto importantísimo de su formación¹⁷, recoge buena parte de las instrucciones de sus predecesores contrastadas con casos de puentes peninsulares. Acerca de la ubicación de estas obras, escribe:

La situación de los puentes es tan fácil de discernir, que casi no necesita explicación: lo único à que se debe atender, consiste en disponerlos de forma que crucen la corriente en ángulos rectos... y evitar que opongan mucho objeto al continuo choque de la misma corriente, la qual en el discurso de tiempo puede maltratar, y aun destruir las cepas o pilares¹⁸.

A la manera de Belidor, encuentra en las obras de cimentación las mayores dificultades que el arquitecto o ingeniero debía afrontar haciendo uso de ataguías, pilotes o emparrillados de madera, o todos juntos:

¹⁷ Galindo (2000).
¹⁸ Müller (1769: 2).

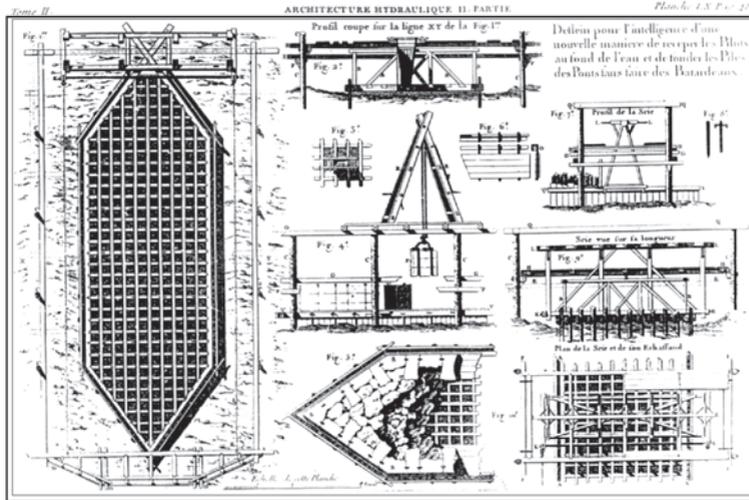


Figura 3.2 Cimentación de puentes.
Fuente: Belidor (1750, plancha LX).

Habiendo preparado el suelo para establecer los fundamentos, y teniendo acopiadas todas las cosas necesarias para principiar la Obra, se asienta una hilada de sillares à soga y tizón, y de competente magnitud, por todo el circuito de los cimientos, macizando el interior con una mampostería bien unida y trabando el todo con mezcla de puzzolana ó terrasa, o con algún betún de mucha tenacidad¹⁹.

Se destaca en la traducción de Sánchez a la obra de Müller (1769) la precisa explicación de varios puentes españoles, entre los que se cuentan el de Martorell sobre el Llobregat, el de Alcántara y el de Mérida. Precisamente el primero de ellos, que constaba de 15 arcos y más de 1200 pies de longitud, mereció una imagen que hace recordar inevitablemente la ya citada de Belidor acerca del puente de Compiègne.

En el ámbito de las prácticas locales americanas, como lo recomendaban los tratadistas, el estudio de las márgenes y del lecho del río era tarea imprescindible a través de la cual se buscaba la existencia de cualquier tipo de roca para una mejor y más segura fundación del puente de modo que se pudiese evitar el costo de excavaciones y pilotaje. Entre los puentes caucanos, este es el caso de los construidos sobre los ríos Quilcacé y Piendamó.

¹⁹ *Ibid.*, 33.



Figura 3.4 Cimiento natural de uno de los estribos del puente sobre el río Quilcacé (s.f.).

Foto: J. A. Paredes (2007).

también de madera, a cargo esta vez de Rogelio Concha, quien un año más tarde entregaba la obra de las siguientes características:

Tiene dos estribos, así: uno a la izquierda, que es una piedra fina de gran volumen, que presenta una mesa que tiene seis varas de largo i seis de ancho; sobre esta mesa se han levantado hiladas de ladrillo con mezcla de cal i arena... El otro estribo está a la derecha: es el que se ha construido con su respectivo cimiento. La base de este estribo es un trapecio formado con piedras de cantera, labradas, unidas con mezcla de cal i arena i mide cinco i media varas de frente; por detrás once, i por cada lado cinco; la altura de esta mesa tiene doce pulgadas, sobre ella sigue otra de ladrillo doble unida con igual mezcla, i lleva una recojida que forma el chaflan, i es de igual figura a la anterior, sobre esta, otra de piedras de cantera, labradas, después otra de ladrillo i en ése orden sigue hasta formar el estribo en su altura un cuadrado de cinco i media varas...²¹

Esta descripción coincide en mucho con lo que hoy en día se puede apreciar en las bases del puente de albañilería sobre el mismo río, construido por los maestros de obras Telésforo Pedraza y Pedro López un año

²¹ ROC, 109, marzo 5 de 1881.

más tarde²². La estructura de ladrillo posee un arco único rebajado de 11 metros de luz y un espesor de bóveda que alcanza los 75 centímetros; habría sido diseñada por un arquitecto de nombre Adolfo Dueñas. En el informe del ingeniero Adriano Paz, escrito en 1895, se daba cuenta de las bondades del proyecto una vez puesto en servicio.

He pasado últimamente por el puente de Piendamó, cuyo arco mayor verdaderamente atrevido, puesto que es un arco de círculo que mide apenas [ilegible] grados, he admirado la elegancia de la curva y la magnitud de la cuerda, sin suponer ni remotamente que pueda caerse, y asegura que muchas generaciones alcanzarán á admirarlo y á elogiar al señor Adolfo Dueñas, arquitecto que calculó la curva²³.

En 1926 fue necesario ampliar la calzada mediante un arco paralelo, pero esta vez en hormigón. Hoy la estructura aún está en pie, destinada solo al tráfico peatonal.



Figura 3.5 Cimiento natural en el estribo izquierdo del puente sobre el río Piendamó (1892).
Foto: J. Galindo (2007).

En cuanto a la manera de desarrollar las labores de apertura de los cimientos y el achique del agua para trabajar en seco, las fuentes documentales no son muy explícitas, aunque se destacaba siempre, como una

²² ROC, 473, diciembre 5 de 1892.

²³ ROC, 895, noviembre 22 de 1895.

de las primeras condiciones en los contratos de los proyectos, el que se profundizaran las excavaciones hasta encontrar suelo firme. Así ocurre en el contrato suscrito en 1894 entre la Gobernación del Cauca²⁴ y los señores José María Domínguez y Toribio Vivas para la construcción del puente sobre el río Sonso en el camino entre Buga y Palmira:

*Los cimientos de los estribos se construirán con la profundidad necesaria para que la obra repose sobre terreno firme, á fin de que el basamento no sea desquiciado por las aguas...*²⁵

Sin embargo, tal condición no siempre se presentaba, como ocurrió durante la construcción del puente sobre el río Guadalajara, del cual habla Miguel Ángel Losada, *inspector ad-honorem de las obras públicas de la provincia de Buga* en 1905, explicando sobre uno de sus terraplenes:

*La grande altura de ese terraplén y la mucha flojedad de las tierras que lo forman, ha hecho que el terreno firme para base de los cimientos no se haya encontrado sino a una profundidad media de 6 metros... Fue principiada la obra en el costado occidental de terraplén. La zanja abierta mide 28 metros 30 centímetros de longitud, por una profundidad media de 6 metros una anchura de hasta 1 metro, 50 centímetros en la parte más profunda. En esta parte se está ejecutando ya la parte del cimiento y mide lo hecho en muro de ladrillo y piedra con mortero de cal y arena, 7 metros, 60 centímetros de longitud por 90 centímetros de altura y 1 metro, 50 centímetros de ancho*²⁶.

El cambio de lecho de los ríos ocasionaba problemas de mantenimiento en los puentes, mucho más en una región donde los cauces suelen todavía ser tormentosos en los períodos invernales y donde la geografía es cambiante. La necesidad de mover el curso de las aguas para obligar al río a dirigirse hacia los arcos del puente, además de requerir la construcción de muros de canalización, también motivó obras de encauzamiento más complejas, como en el caso del puente de Buga, a cargo del ingeniero Modesto Garcés, quien en 1874 contrató, junto a la construcción del puente, la canalización del río en la parte *que él mismo considerase necesaria a fin*

24 Políticamente, el Estado Soberano del Cauca existió hasta 1886, cuando la Constitución de ese año le dio el nombre de Gobernación del Cauca; sin embargo, las estructuras administrativas y territoriales se conservaron casi intactas hasta el primer lustro del siglo XX.

25 ROC, 752, noviembre 20 de 1894.

26 ROC, 258, marzo 8 de 1905.

de asegurar el curso de las aguas por el sitio en donde se levantarían los arcos centrales de la estructura²⁷.

En el caso del puente sobre el río Fraile, hoy desaparecido, Rafael González Concha describía de la siguiente manera la situación presentada por las variantes del cauce del río en 1895:

Es á saber que el río del Fraile tiene una tendencia muy marcada á abandonar su lecho desde un poco arriba del puente, cargándose sobre la ribera sur y amenazando cortar el viaducto. Hoy es tiempo todavía de contener el daño mediante la construcción de un dique de piedra desde el estribo Sur para arriba hasta unos cien metros más o menos, y canalizando convenientemente el río. De lo contrario, muy bien podría suceder que en una de aquellas formidables avenidas á que este río está sujeto, causara un daño irreparable... El mal que acabo de apuntar empezó a manifestarse mucho después de estar construido y en servicio el puente y fue causado por un desvío que los habitantes de Florida hicieron en el curso del río bastante arriba del puente²⁸.

También hay que señalar que la inadecuada selección del sitio y la mala calidad de los cimientos podrían ser la explicación para que algunas obras terminasen condenadas al abandono o al fracaso. Así ocurrió al puente sobre el río Sonso, iniciado en 1894 pero todavía inconcluso en 1904, puesto que, según informe pericial de los señores Carlos Rengifo y Rogelio Méndez:

...las condiciones en que está colocado el puente con respecto a las aguas del río son tan pésimas que no hay para qué pensar en su terminación, si este no se canaliza primero... Los arcos que existen, parte de los cuales vendrían a ser los más importantes una vez canalizado el río, están sobre cimientos tan sumamente bajos que hecha la canalización, esos arcos quedarían en el aire²⁹.

Aun en 1921, es decir, 47 años después de iniciadas las obras del puente, se hacía alusión a los problemas causados por errores técnicos. Víctor Estrada, ingeniero oficial del departamento del Valle del Cauca³⁰, afirmaba entonces:

27 ROC, 23, marzo 21 de 1874.

28 ROC, 895, noviembre 22 de 1895.

29 ROC, 179, agosto 18 de 1904.

30 El Departamento del Valle del Cauca resultaría de la división del otrora Estado Soberano del Cauca, llamado luego Departamento del Cauca, en 1910.

...me consta que el proyecto de cimentación no se acabó de llevar a término y quedaron por tanto indefensas contra la socavación de las aguas, las últimas pilas viejas, y especialmente la que ocupaba el cauce viejo del río, por donde hoy está corriendo en parte. Es de saberse que en esta pila había un charco de poco menos de dos metros de hondo y la pila estaba vencida hacia el norte lo que se corrigió con el equilibrio de los arcos, y llenando de piedra el charco³¹.

El puente de Sonso, bautizado puente Ulloa el día de su inauguración, efectivamente, tendría una vida corta. Reconstruido y puesto en servicio en 1925, al cabo de pocos años sería remplazado por otro de hormigón, el mismo que aun hoy se levanta en pie.

Otro aspecto estrechamente relacionado al tema de los cimientos, era el de los tajamares, sólidos refuerzos en el punto donde estos reciben las bases de las pilas, los mismos que Alberti (1485) en cuanto a su naturaleza constructiva describía de la siguiente manera:

...construye una base sencilla para cada uno de los pilares, de forma que sean alargadas a semejanza de una nave, con proa y popa bien marcadas en ángulo, y orientalas en línea recta en el sentido de la corriente, de forma que atenúen, partiéndola, la violencia de las aguas³².

No cambiarán mucho los criterios renacentistas con el paso de los años. Belidor (1750), por ejemplo, se limitaba a repetir, con ligeras modificaciones, lo dicho por Alberti:

Las pilas que tienen como base un rectángulo son apenas usadas por los puentes situados sobre riveras pequeñas: aunque es mejor hacerlas puntiagudas por delante y por detrás; en lugar de hacer su base triangular como en el Pont Royal, se deben hacer sus costados con dos porciones de círculo AB & BC teniendo por radio el espesor AC de la pila, y por centro los puntos extremos A, C de sus costados, como lo han hecho en el Pont de Compiègne; esto que ha sido imitado en todos los otros que se han construido después ya que el agua discurre mejor y causa menos cataratas y torbellinos³³.

31 Relator, Cali, julio 24 de 1921.

32 Alberti (1485: 187).

33 Belidor (1750: 444): *Les piles qui ont base un rectangle, ne sont guère d'usage que pour les Ponts situés sur des petites Rivières: encore vatu-il mieux leur faire des avant & arrière-becs; mais au lieu de faire leur base triangulaire comme au Pont Royal, il faut les former par deux portions de cercle ayant pour rayon l'épaisseur AC de la pile, & pour centre les points extrêmes A, C de ses flancs, comme on la fait au Pont de Compiègne; ce qui a été imité à tous les autres que l'on a construit depuis, parce que l'eau s'y écoule mieux, & cause moins de cataractes & d'affouillemens.*

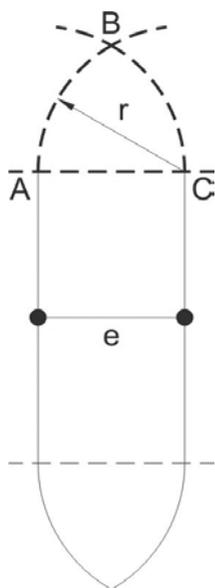


Figura 3.6 Construcción geométrica de la planta de un tamar, según Belidor (1750).
Dibujo: E. Sotelo (2007).

Para Müller (1769), el uso de tajamares angulares no era el más apropiado, sino que debían hacerse de planta rectangular puesto que dada su geometría acumulaban arena suficiente para servir de abrigo a los propios cimientos, de la misma manera en que lo había argumentado Alberti. Incluso en obras muy posteriores, como la de Clémencet (1891), la mención a los tajamares se limitaba a indicaciones sobre su forma, en tanto que en el tratado de Dupuit (1870), solo merecieron una pequeña valoración sobre su función:

Un estrechamiento brusco produce una perturbación considerable en el curso del agua, pero este inconveniente puede ser reducido por medio de ajustes o ensanchamientos; es ara evitar esto que las pilas presentan una saliente río arriba que le llamamos avant-bec, la saliente río arriba o arrière-bec disminuye los remolinos. Los avant-bec garantizan igualmente a las pilas del choque de los hielos y otros cuerpos flotantes³⁴.

En los puentes de la región del alto Cauca, la forma y geometría de los tajamares al parecer solo era relevante, como afirmaba Belidor, en los que esaban conformados por varios arcos, como ocurre en el de Buga, cuyos potentes arcos centrales descansan sobre dos pilas que se apoyan directamente sobre el río y están dotados con tajamares de planta semicircular. También se destacan los del puente sobre el río Grande, en Caloto, construido a partir de 1905, con punta de forma triangular casi idénticos a los del puente sobre el río Güengüé, levantado una década atrás, y los del puente sobre el río Timbío, de fecha sin precisar. Como el primero de los citados, tenían forma circular.

34 Dupuit (1870: 306): *Un étranglement brusque produit une perturbation considerable dans l'écoulement de l'eau, mais cet inconvénient peut être réduit au moyen d'ajustages ou évasements; c'est pour rempaler ce but que les piles présentent une saillie à l'amont que l'on nomme avant-bec, la saillie d'aval ou arrière-bec diminue en outre les tournoiments. Les avant-becs garantissent également les piles du choc des glaces et des corps flottants.*

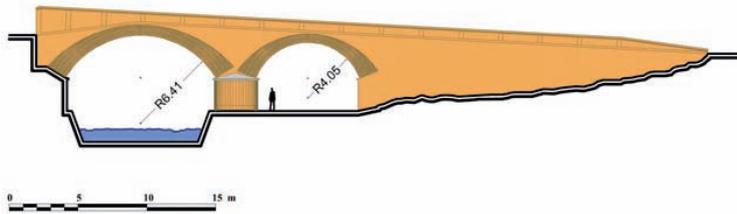


Figura 3.7 Puente sobre el río Timbío en la población del mismo nombre (s.f.).
Foto: J.C. Guzmán (2007).

En otro ejemplo, esta vez relacionado con el puente sobre el paso de La Bruja, en inmediaciones de Palmira, el ingeniero Rafael González Concha explicaba de la siguiente manera las características de los tajamares y estribos de la obra a su cargo:

A la parte de arriba de los estribos construirán dos tajamares, uno á cada lado, á la misma altura de los estribos. Los atraques de los extremos del puente, destinados á contener el relleno de los camellones, terminarán en pilastras cuadradas en cuyo remate colocarán los constructores algún adorno³⁵.

Que los criterios clásicos relativos a la geometría de los tajamares estaban presentes en los constructores caucanos lo muestra el informe que redactó Rómulo Durán acerca de los trabajos de reparación del puente

³⁵ ROC, 643, febrero 7 de 1894.

sobre el río Juanambú, construido por Barbetti, a cargo de Ángel María Ordóñez en 1887:

Si los tajamares hacia delante, que en el contrato llaman punta de diamante, se deben reponer, su forma no debe ser nunca de prisma triangular, cuyas débiles aristas quedan amenazadas de degradaciones por el choque de los cuerpos flotantes sino de forma semielíptica que es la que rechaza tangencialmente estos cuerpos flotantes y la que menos consiente remolinos que socavan los cimientos... La altura de estos tajamares debe llegar un poco más arriba de los arranques de los arcos, que es lo que, en el contrato, según creo, se llama altura del radio del arco. Los bastiones que de allí se trata, que son los baluartes de apoyo hacia el lado opuesto de la corriente y presión de las aguas, deben también ser consolidados por su base hasta el asiento firme³⁶.

Aun en el siglo XIX, los tratados técnicos de ingeniería explicaban los mismos sistemas de cimentación usados desde la antigüedad y desarrollados por los ingenieros del siglo XVIII, aunque dotados ahora de una fuerte carga matemática. Serán por entonces de enorme difusión los trabajos del ya citado Dupuit (1870), Degrand & Résal (1887) y Morandière (1888), especialmente, aunque se destacaría el primero de ellos, poseedor de un marcado carácter enciclopédico, que contenía un volumen de texto acompañado de un atlas de ilustraciones, una de las cuales enseña el sistema de cajones de cimentación que, una vez secos, se rellenan con piedras en forma de cascotes.

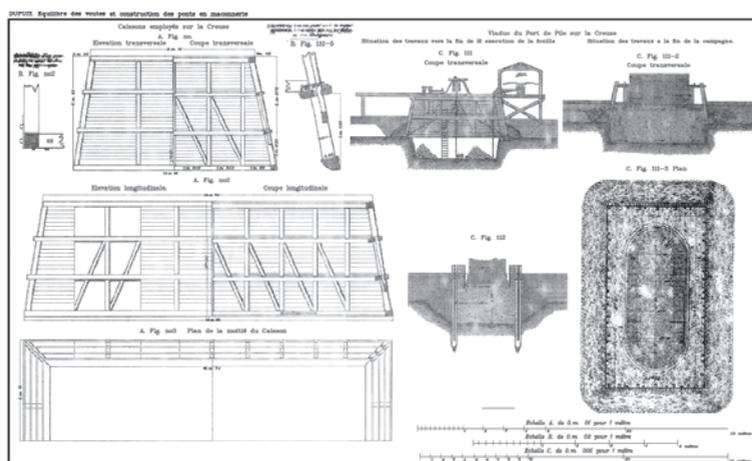


Figura 3.8
Cimentación de puentes por el método de cajones.
Fuente: Dupuit (1870).

36 ROC, 28, febrero 17 de 1890.

No se puede desconocer que, paulatinamente, en los tratados del siglo XIX irán tomando fuerza conceptos nuevos aplicados a la construcción de puentes, como en el de Croizette (1885), también de carácter enciclopédico, quien vincula la ciencia de la hidrodinámica a los problemas de cimentación; o en el de Collignon (1885), quien aplica las teorías de la mecánica de materiales a las construcciones civiles; y varios otros preocupados por los temas pertinentes a la resistencia de los arcos, los estribos y las cimbras, en buena parte motivados por nuevos puentes de luces mayores y cargas vivas que poco a poco iban en aumento y en fuerte competencia con los del tipo suspendido de cables o cadenas.

La forma y el tamaño de las pilas y los arcos

De acuerdo con Gautier (1716), las cinco mayores dificultades que se debían resolver durante la construcción de un puente eran las siguientes: 1. determinar el espesor de los estribos y cuantificar el peso que debían soportar; 2. fijar el tamaño de las pilas en relación a la luz de los arcos; 3. calcular el espesor de las roscas; 4. establecer la figura geométrica ideal de los arcos frente a unas condiciones de carga dadas; 5. trazar el perfil adecuado de los muros de sostenimiento de los suelos³⁷. Huerta y De la Cuerda (1998) las resumen acertadamente en solo dos preguntas que consideran claves: *¿qué forma debe tener un arco o una bóveda? y ¿cuánto deben medir sus pilares?* A ellas respondía Alberti (1485) de la siguiente manera:

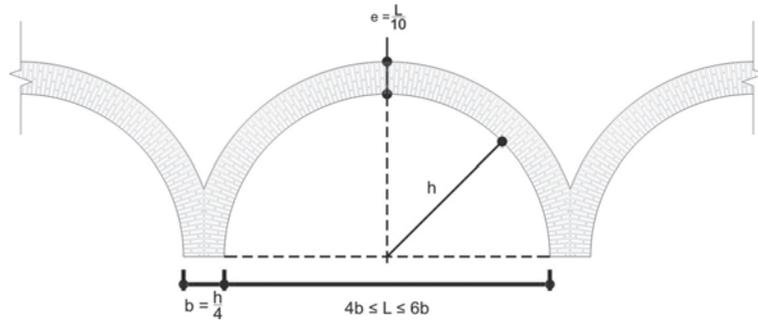
...el arco que servirá de frente a esa bóveda, sea de la clase que fuere, se construirá con esa misma piedra, muy dura y de gran tamaño, que hubieres destinado a la construcción de pilares. Y en el arco las piedras no tendrán un espesor menor a la décima parte de la cuerda del arco en cuestión. La cuerda no tendrá una longitud mayor que la sexta parte del espesor del pilar, ni menor que la cuarta parte de dicho espesor³⁸.

Alberti establece criterios dimensionales entre los elementos más significativos del arco: grueso de la rosca, diámetro de la semicircunferencia generatriz y ancho de los pilares de apoyo. El arco, preferiblemente *a tutto sesto*, es decir, de medio punto, debía tener un espesor igual a la décima parte de su luz, la cual a su vez podía alcanzar una longitud máxima equivalente a seis veces el espesor de las pilas; se desconoce si tales afirmaciones eran producto de su propia experiencia u obedecían a la tradición oral transmitida durante los siglos de la Edad Media.

37 Gautier (1716: 189).

38 Alberti (1485: 189).

Figura 3.9 Relaciones dimensionales en un puente de arco según Alberti.
 Dibujo: E. Sotelo (2007).
 Se ha tomado como referencia el dibujo de Straub (1949) reproducido en Huerta (2004, 189).



Para Alberti, además, la cantidad de arcos debía ser siempre en número impar, tanto por razones estéticas como técnicas:

*Los arcos impares no sólo resultan agradables a la vista sino que sobre todo procuran solidez: en efecto, la parte central del río, cuanto más lejos esté de la contención que ejercen las orillas, tanto más sin obstáculos discurre, y cuanto más sin obstáculos, tanto más rápida y con más fuerza; en consecuencia, ese punto debe dejarse libre, para evitar que la corriente afecte la solidez de los pilares al luchar contra ellos...*³⁹

Palladio (1988) tomará partido por el arco *a tutto sesto* como el más adecuado para la geometría de los puentes y repetirá la consideración dimensional formulada por Alberti:

*Las pilas no deben ser más delgadas de un sexto de la anchura del arco, ni normalmente más gruesas de un cuarto...*⁴⁰

También otros autores continuarán los preceptos de Alberti: *El Filarete* (Mss, s. XV), por ejemplo, defenderá el arco de medio punto con pilas de espesor igual a los $\frac{3}{4}$ de la luz del arco; Scamozzi (1615) se decantará por los arcos rebajados sin formular criterios para su dimensionado ni el de las pilas; y hasta el manuscrito atribuido a Turriano (Mss, s. XVI) intentará dar respuesta a las preguntas que se han citado como premisa. Este último se mostraba partidario del uso de arcos de medio punto y establecía su propia idea acerca del espesor de las pilas:

No se haga pues mas ancha la cuerda del arco de la puente que quanto es seis veces gruessa su pila, y esto todo quanto se les puede quitar á las

³⁹ *Ibid.*, 186.

⁴⁰ Palladio (1570: 294).

*pilas, ni en alguna manera se çufre hazer las pilas mas delgadas de una sesena parte de la cuerda del arco, ni tampoco mas gruesas de la quarta parte de lo largo de la cuerda, que ha de cargar encima de ella*⁴¹.

La geometría de los arcos será también un tema de preocupación en tierras americanas. Una rápida mirada sobre los casos locales permite concluir que la mayor parte de obras pertenecientes al repertorio de puentes de ladrillo en el alto Cauca se construyeron a partir de arcos de medio punto con algunas contadas excepciones entre las que se destaca el último de los que conforman el puente del Humilladero, en Popayán, de fray Serafín Barbetti, cuya geometría carpanel contribuía a la estabilidad de toda la estructura.



Figura 3.10 Arco carpanel en el puente del Humilladero sobre el río Chiquito, en Popayán (1868).

Foto: J. C. Guzmán (2006).

Otro caso excepcional, aunque muy poco conocido –a causa de que el puente fue destruido por una corriente del río en fecha incierta–, corresponde al arco principal del puente sobre el río Fraile, construido en 1891, cuya traza se justificaba en el hecho de que de esa manera el tablero podía hacerse con una pendiente baja, el 10% en este caso.

41 Turriano (Mss, s. XVI: 504-505).

...la luz del puente es de diez y seis metros y el perfil de la curva del intradós es una semielipse... [pero] debido a la magnitud del arco, el puente ha quedado muy elevado; y como el terreno de la orilla izquierda es tan bajo, que el río alcanza á bañarlo en sus grandes avenidas, ha quedado el ascenso al puente de ese lado sumamente fuerte⁴².

También el puente de Imbí, sobre el camino del sur, construido por Ignacio Muñoz en 1894, constaba de un arco rebajado de 10,20 metros de luz y un espesor de 50 centímetros⁴³; así como el puente de Piendamó, de 11,00 metros de luz y 75 centímetros de espesor en la bóveda; y el de Pescador, cuyo radio estaba apenas por debajo de los 5,00 metros.

Pero de todos, el puente sobre el río Nima, entre las ciudades de Palmira y Amaime, construido por Rogelio González Concha en 1891, era uno de los más apreciados en la región en virtud de sus características geométricas:

...entre los puentes que últimamente se han construido, es éste uno de los más hermosos, pues se compone de cinco arcos distribuidos simétricamente á partir del arco principal, que es de mayor luz y cuyo perfil es una curva de tres centros. Los demás arcos son de medio punto y la luz de los arcos extremos es menor que la de los intermedios⁴⁴.

Entre los arcos de medio punto, se destaca el bello puente sobre el río Ovejas, de fray Serafín Barbetti, que data de 1877 y cuenta con 14,00 metros de luz; también eran bien apreciados los puentes sobre el río Cauca, en la vía entre Popayán y Coconuco, de 16,00 metros de abertura en su arco único; y el del río Cofre, de 10,60 metros de diámetro, también de arco único.

Pocos de los puentes caucanos de arcos múltiples respetaron el principio albertiano según el cual debían estar en número impar: el de Caloto, construido a partir de 1905 (5 arcos, todos de medio punto) y el de Aguasu-
cia en Santander (3 arcos de geometría no especificada), por ejemplo, respetaron el precepto. Entre los de número par se registran el de Popayán, sobre el río Cauca (4 arcos, todos de medio punto aunque de luces variables), el de Sonso (16 arcos, todos rebajados y de luz constante), el de Güengüé (8 arcos de medio punto, luces variables pero dispuestos simétricamente), el del Humilladero en Popayán (12 arcos, 11 de medio punto y uno carpanel) y el puente Ortiz, en la ciudad de Cali (4 arcos rebajados sobre el río).

42 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

43 ROC, 753, noviembre 23 de 1894.

44 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.



Figura 3.11 Puente sobre el río Pescador, en la población del mismo nombre (1891?).
Foto: J. C. Guzmán (2006).

Además de las consideraciones de la forma, también importaban las dimensiones de las pilas a la luz de criterios relacionados con la estabilidad estructural. Es posible que los conceptos de Alberti y sus sucedáneos tuviesen un componente de esta naturaleza, pero será solo a mediados del siglo XVII cuando se cuente con un principio orientado hacia razones más afines a la mecánica que a la estética. En 1643 el jesuita François Derand publicó su tratado de cantería que contenía una simple regla geométrica, la misma que durante años habría de regir el dimensionado de las pilas de los puentes: se dividía el arco en tres partes iguales (AB, BC y CD) y con centro en D y radio CD se describía una semicircunferencia. El punto E, resultado de la intersección de esta circunferencia con la vertical, determinaba el espesor de la pila⁴⁵.

45 Benvenuto (1981: 323).

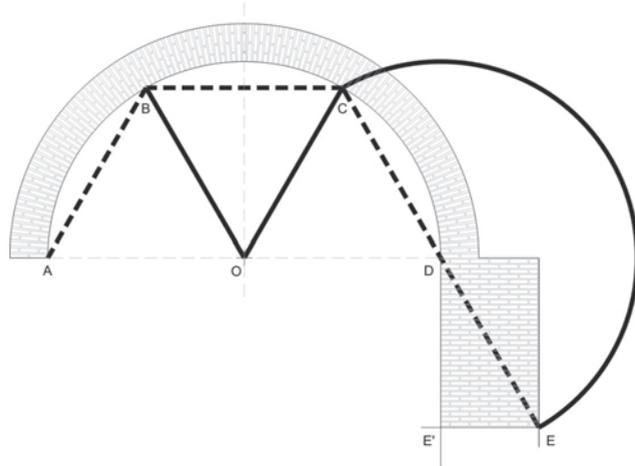


Figura 3.12 Regla del tercio de la cuerda del arco, según varios autores.
Dibujo: E. Sotelo (2007).

Este principio geométrico, de uso extendido en Europa, será replicado incluso por los ingenieros del siglo XVIII, quienes como Gautier (1765) valoraban el uso del álgebra como herramienta para el análisis estático de las estructuras abovedadas:

Esta Operación no se ha demostrado para saber si ella es precisa o veraz. Nada podemos decir, sólo que es más producto del azar que de la comprensión⁴⁶.

Llevando estas afirmaciones al análisis del puente construido en la ciudad de Buga, sobre el río Guadalajara, entre 1874 y 1900 por Modesto Garcés, se muestra con claridad el uso de los sistemas de proporción expuestos por los tratadistas: no solo se aplicó la llamada *regla del tercio* en el dimensionado del espesor de las pilas, sino que también se tuvo en cuenta la relación 1/10 para estimar el espesor del arco en su clave, en relación con la luz de cada uno de los tres arcos centrales que conforman la estructura.

⁴⁶ Gautier (1765; 354).

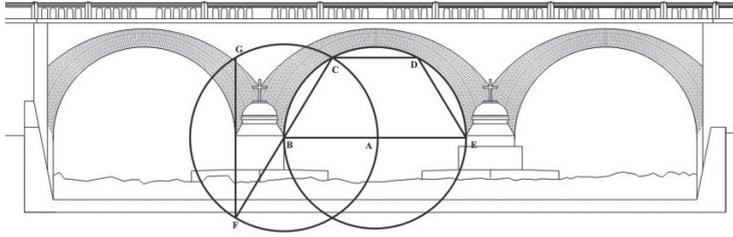


Figura 3.13
Dimensionado de las pilas del puente sobre el río Guadalajara en Buga (1874-1900)
Dibujo: J. C. Guzmán (2007).

Sin embargo, también eran varios los autores que ponían en duda la validez de la regla, entre ellos Bails (1769), quien luego de explicarla aseguraba que:

...esta regla no tiene fundamento alguno, pues prescinden sus autores del grueso de la bóveda, y de la altura de los machones. Es constante que segun fuere esta altura mayor ó menor, será también mayor ó menor el empujo de la bóveda, porque obrará con un brazo de palanca de mayor ó menor longitud. Lo propio sucede respecto del mayor grueso de la bóveda, pues entonces por razon de ser mayor su peso, es forzoso sea mayor su carga y empujo contra los machones⁴⁷.

Para entonces, a mediados del siglo XVIII, ya era de uso cada vez mayor el empleo de herramientas matemáticas para dimensionar tanto el espesor de las rosas de los arcos como el grosor de los pilares. A partir de los trabajos de De la Hire (1695 y 1712)⁴⁸, ingenieros como Belidor (1729) llevaban sus conclusiones al campo de la práctica constructiva.

Dice con acierto Vérin (1993: 31) que es en ese siglo *cuando se ponen en su sitio explícitamente las características del ingeniero moderno...* se exigirá particularmente de sus trabajos la prontitud, la solidez, la economía. La ciencia del ingeniero buscará controlar matemáticamente la concepción y la puesta en obra desplazando la figura del artesano medieval que fusiona idea y realización material, e incluso la del hombre renacentista que buscaba en la geometría el camino hacia las formas perfectas. Eso ha quedado atrás. Como explica Picon (1989), se produce entonces la disociación de dos profesiones que hasta entonces estaban bastante próximas: arquitectura e ingeniería, pero entendiendo tal separación más como maneras distintas de relación con el entorno: la diferencia es de actitud más que de competencias particulares. La teoría se asume ahora distintamente para ingenieros y arquitectos; si para los primeros ella nace

47 Bails (1769: 529).

48 Una explicación detallada de las teorías de De la Hire se halla en Huerta y De la Cuerda (1998).

de las ciencias y se apoya en el cálculo numérico, para los segundos su comprensión se mantiene más próxima a los ideales formales presentes en los tratados del siglo XVII e iniciará un recorrido distinto que aquí no vamos a considerar.

La publicación del libro de Belidor, *La Science des Ingénieurs*, en 1729, se considera en ese proceso un hito en la historia del desarrollo técnico y, más aún, del desarrollo de las ideas del siglo XVIII. En tanto que Collins (1979) lo considera *el primer tratado sistemático sobre la construcción de edificios, basado en métodos algebraicos*, J. L. González (1993) atenúa su importancia y la relativiza a los problemas específicos del dimensionado de muros de contención y de estribos de arcos y bóvedas, aunque también reconoce su trascendencia en el plano de la arquitectura civil.

Y en lo relacionado con sus contenidos, mientras Gautier menospreciaba por su dificultad de comprensión las propuestas matemáticas de De la Hire, a Belidor se le puede considerar un sucesor de este último. Su tratado, que adquiere rápidamente gran popularidad entre arquitectos militares y constructores civiles, se caracteriza por ser ambicioso e intentar sistematizar la ejecución de edificios usando métodos algebraicos y modelos matemáticos, a la vez que comparte una preocupación por los procesos técnicos de la edificación. La obra consta de dos volúmenes que contienen seis libros; acompaña al texto un conjunto de 52 ilustraciones. El libro I está consagrado por entero a la manera *de servirse de los principios de la mecánica para obtener las dimensiones convenientes a los revestimientos de las obras de fortificación para estar en equilibrio con el empuje de las tierras que han de sostener*. Dividido en seis capítulos, se vale de ejercicios, teoremas, lemas y corolarios para explicar el dimensionado de muros de contención: trata de la determinación del centro de gravedad de diversas figuras, el cálculo del espesor de muros y la magnitud de los empujes del terreno. El libro II tiene cuatro capítulos, que tratan de la mecánica de las bóvedas, *para mostrar la manera de determinar el espesor de los estribos*.

Una vez expuestos los métodos de resolución a tales problemas, los libros III y IV tratan aspectos relacionados con la construcción misma de los edificios: combina conceptos teóricos y empíricos. El libro III *comprende el conocimiento de los materiales, sus propiedades, sus detalles y la puesta en obra*; el libro IV *trata de la construcción de edificios civiles y militares*. En 14 capítulos expone las distintas tipologías de puertas, garitas, almacenes, arsenales y otros edificios que se construían en el interior de las fortificaciones, precedidas por algunas explicaciones acerca de las calidades de la madera y del hierro. El libro V, dedicado a la decoración de los edificios, expone la teoría de los órdenes arquitectónicos a través

de 12 capítulos, tema que se justifica en el uso que de ellos se hacía en la traza y construcción de las portadas de las fortificaciones, así como en la ampliación del repertorio programático que ponía a los ingenieros militares al frente de edificios con carácter civil. El libro VI y último *comprende la manera de hacer los Devis*⁴⁹ *para la construcción de las fortificaciones y de las construcciones civiles.*

El orden en que los libros se disponen dentro del tratado guarda una clara intencionalidad: primero se presentan teorías abstractas sobre problemas concretos nacidas del conocimiento de las leyes de la mecánica; luego se expone un conjunto de conocimientos teóricos y empíricos acerca de la materia; finalmente se trata de la manera de resolver tipológicamente una edificación y las estimaciones necesarias para su puesta en obra. El segundo volumen, con los libros III y IV, se ocupa fundamentalmente de asuntos relacionados con la respuesta formal de los edificios y su decoración; su intención pareciera ser la de establecer modelos visuales: se vale de plantas y secciones que ejemplifican la manera de responder a casos, como si se tratase de un catálogo de figuras de las que se puede echar mano cuando sea necesario.

Desde el discurso preliminar que antecede al primero de sus libros, Belidor expone su particular visión del conocimiento, tanto del que se adquiere a través del contacto con la experiencia como del que es producto de la especulación teórica, y explícitamente del que hace uso del lenguaje matemático:

*Desde que se han buscado en las Matemáticas los medios de perfeccionar las Artes, se han hecho progresos que nadie antes podía esperar... la opinión de algunos de que es sólo la práctica lo que les puede llevar a su fin, es todavía un obstáculo no menos difícil de vencer; es bien cierto que la experiencia contribuye mucho a dar conocimientos nuevos, y que ella suministra permanentemente a las más hábiles personas ideas de reflexión...*⁵⁰

Belidor no cuestiona la contribución de la experiencia, pero piensa que los saberes que resultan de la práctica se transmiten de una generación a otra *con los mismos defectos*, permaneciendo así en un estado de

49 No existe en castellano una palabra equivalente a *Devis*, en la manera que Belidor la emplea; la más próxima sería *contrato*.

50 Belidor (1729: 2/l): *Depuis qu'on a cherché dans les Mathématiques les moyens de perfectionner les Arts, on y a fait des progrès qu'on n'eût osé esperer auparavant... l'opinion qu'il n'y a que la seule pratique qui peut les mener au but, est encore un obstacle qui n'est pas le moins difficile à vaincre; il est bien vrai que l'expérience contribüë beaucoup à donner des connoissances nouvelles, & qu'elle fournit tous les jours aux plus habiles gens des sujets de reflexion...*

imperfección, *como ocurre en la arquitectura*, a la que considera incapaz de resolver analíticamente problemas que requieren el conocimiento matemático:

Todo ello es sin duda, porque la mayoría de los hombres no consultan suficientemente la razón; esclavos de los prejuicios, es apenas el uso lo que les determina, y por no hablar de la Arquitectura ... ningún arquitecto ha establecido los principios para hallar el punto de equilibrio entre las fuerzas actuantes y resistentes... sobre el espesor que ha de dar a los revestimientos de los terraplenes... a los pies derechos de los arcos o a los pilares de los puentes ...⁵¹

Su crítica es contundente. Por encima de la conveniencia y el gusto, defiende el álgebra y la mecánica como el lenguaje en el que se debe expresar el conocimiento del arquitecto. Tal es el propósito explícito de su libro: reconducir los métodos de los que él aprende, *sustituir la experiencia por un nuevo sistema teórico* como vía para alcanzar el conocimiento.

Para desarrollar su teoría de los arcos, Belidor reduce el problema analítico al de una máquina simple, en este caso, la palanca, cuyo punto de apoyo es P, el vértice exterior del pie derecho, y sobre el que actúa una fuerza en dirección LQ que trata de producir su vuelco, siendo L el centro de gravedad del semiarco EBDG. El desarrollo del problema se concentra en la determinación del esfuerzo que intenta producir dicho giro y en establecer la magnitud del brazo de palanca⁵². Hace además dos simplificaciones importantes: establece que la junta de rotura FC se produce en la mitad del semiarco y que en su punto medio L se apoya el empuje LQ. Retomando algunas de las formulaciones de De la Hire, variando el tipo de palanca que asume para su demostración y formulando una serie de problemas de dificultades progresivas, hace *moderna* su forma de razonamiento. Más que sobre el álgebra, Belidor se apoya en la modelización de los hechos.

51 *Ibid.*, 2/1: *Cela vient sans doute, de ce que la plupart des hommes ne consultent point assés la raison; esclaves du préjugé, c'est presque toujours l'usage qui les détermine, & pour ne parler que de l'Architecture... aucun Architecte n'a donné des principes pour trouver le point d'équilibre entre les forces agissantes & celles qui doivent résister... quelle épaisseur il faut donner aux revêtemens des Terrasse... aux piés-droits des Voûtes, aux Culées des Ponts.*

52 Explicado con detalle también en Benvenuto (1981: 326-334).

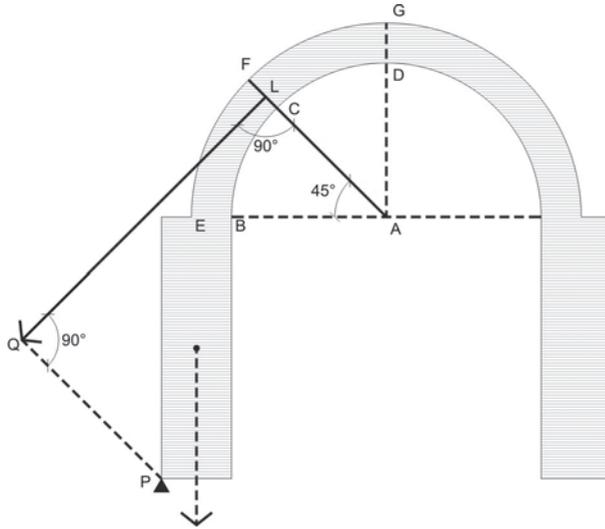


Figura 3.14 Fuerzas que actúan sobre un arco de fábrica, según Belidor (1729).
Dibujo: E. Sotelo (2007).

Sin embargo, Belidor, más preocupado por las obras de fortificación (y entre ellas, las bóvedas que cubrían los almacenes de pólvora), solo abordará de manera directa el tema de los puentes en su libro de 1750 recomendando una serie de reglas empíricas para el dimensionado de las pilas y los estribos⁵³. Le corresponderá a Perronet⁵⁴ perfeccionar la propuesta de Belidor, *favoreciendo el empleo del arco carpanel de varios centros, restándole espesor a las pilas y desarrollando el proyecto de los encofrados*⁵⁵. Los resultados de sus análisis se condensaron en tablas con el fin de facilitar su aplicación por parte de ingenieros y constructores de obras públicas, las mismas que incluirá Pierre Patte en el curso de arquitectura de J. F. Blondel (1771-1777).

Los tratados de Müller (1769) y Bails (1796), tan influyentes en la órbita castellana, recogerán las lecciones de los ingenieros franceses. El primero sigue fielmente a Belidor y parte de considerar la dovela MN cuyo centro de gravedad es x , que ejerce un momento sobre el pilar ABCD. En su demostración, la fuerza vertical xa de la dovela M se elimina por la resistencia de la mezcla, considerando sólo la fuerza xb , cuya componente db trata de producir un momento de vuelco en el pie derecho. Por tanto, el momento de presión del arco contra el pie derecho es igual al producto

53 Explicadas muy acertadamente por Huerta (2004, 352-356).

54 Jean Rodolphe Perronet ocuparía el cargo de director de la École des Ponts et Chaussées entre 1747 y 1794. Construyó cerca de 12 puentes entre los que se destacan el de Neuilly y Concorde.

55 Huerta & De la Cuerda (1998, 241).

de la distancia CI multiplicada por la sumatoria de todos los pesos en dirección db . Además, L es el centro de gravedad del semiarco $AEEFG$. En últimas, el problema se reduce a la manera de encontrar tal punto.

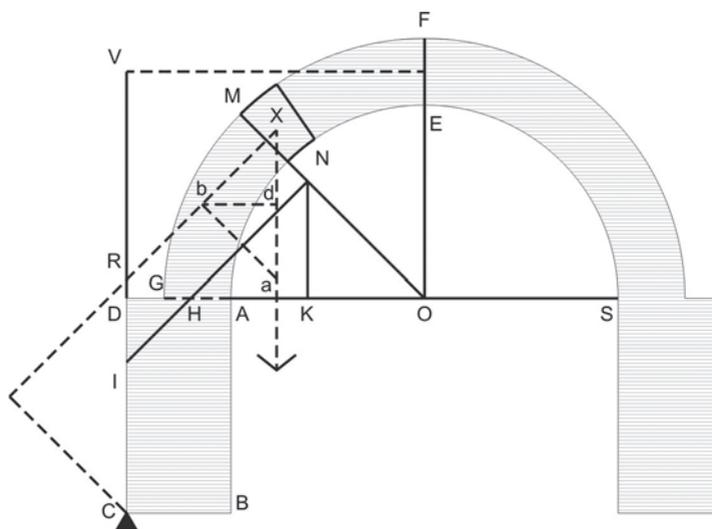


Figura 3.15 Fuerzas que actúan sobre un arco de fábrica, según Müller (1769).
Dibujo: E. Sotelo (2007).

El método de Bails (1796) es mucho más práctico, aunque está cargado de complejas expresiones matemáticas:

Para determinar el grueso de los estribos; 1º, búsqese la superficie de los dos círculos, que el radio del uno es AB , y el del otro AE ; réstese la menor de la mayor; tómese la cuarta parte de la diferencia y pártase por la altura del estribo, el cociente será el primer término; 2º, súmese el radio AC con la mitad del grueso del cañón, quádrese la suma, y sáquese la raíz de la mitad del cuadrado, cuya raíz se añadirá a la altura del estribo, la suma será el segundo término; 3º, súmese el primer término con el segundo, multiplíquese la suma por el primer término, el producto será el tercer término; 4º, sáquese la raíz cuadrada del tercer término, réstese de la raíz el primer término, la diferencia expresará el grueso que corresponde a los estribos⁵⁶.

⁵⁶ Bails (1796: 549).

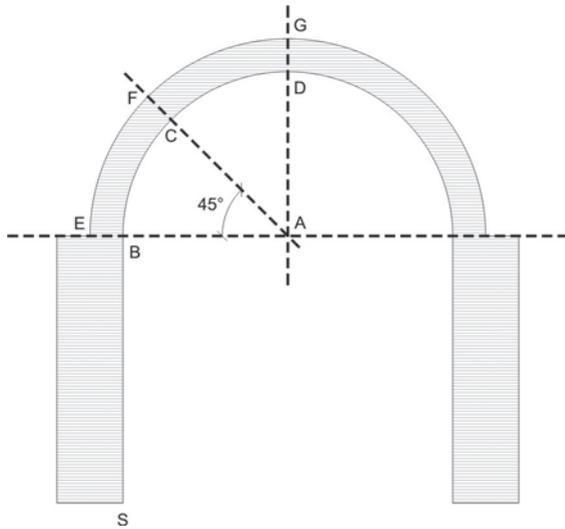


Figura 3.16 Fuerzas que actúan sobre un arco de fábrica, según Bails (1796).
Dibujo: e. sotelo (2007).

A partir de entonces las teorías mecánicas acerca del espesor de los arcos y los estribos seguirán perfeccionándose: Couplet, Bouguer, Bossut, Salimbeni, y en especial Coulomb y Mascheroni, harán aportes significativos al tema⁵⁷. Ya en el siglo XIX, muchos autores se limitarán a retomar el abanico de ecuaciones disponibles para ello, en ocasiones tomando partido por una u otra en virtud de su propia experiencia, en otras dejando en libertad a sus lectores para adoptar la que comprendieran con más facilidad. Croizette (1885), por ejemplo, cita en su tratado al menos ocho ecuaciones de seis autores diferentes, entre los que se cuentan Perronet, Gauthey, Lesquiller, Léveille, Dejardin y Dupuit, destinadas a calcular el espesor de los arcos de los puentes.

Lastimosamente solo disponemos de un único documento que permite verificar que los constructores caucanos emplearon también las fórmulas de los manuales europeos en el dimensionamiento de las estructuras de puentes de arco. En el manuscrito⁵⁸ que contiene los cálculos relativos al puente sobre el zanjón de Chambio, en la población de Timbío, elaborado por Isaac Sarria en 1921, su autor confiesa haber usado las fórmulas expuestas por Aragón (1909), según las cuales, a partir de la luz, se establecía la magnitud de la flecha, el radio del intradós y el espesor de la clave:

57 Ver Benvenuto (1981).

58 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1487; ff. 383-385.

<i>Luz (L)</i>	5,40 m
<i>Flecha (f):</i> $\frac{1}{4} * 5,40 =$	1,35 m
<i>Radio del intradós:</i> $(4*f^2+L^2)/8f$	3,37 m
<i>Espesor de la clave (e):</i> $(3/10+1/100*1/4)*(1+L/10)$	0,52 m
<i>Espesor de los arranques (e'):</i> 2e	1,04 m ⁵⁹ .

Vale la pena destacar que Sarria era miembro de una familia de artesanos dedicados a la construcción de puentes de arco: Jesús Sarria, su padre, había levantado el puente de Mondomo en compañía de un hermano suyo, Florentino Sarria, en 1905. Existe también el registro de un tal Gregorio Sarria, constructor del puente de Piendamó en 1809, pero no hay constancia de vínculo familiar⁶⁰.

Otros informes confirman que en algunos dictámenes periciales era común citar autores europeos como referentes: es el caso del ingeniero Adriano Paz, quien en 1895 y para hacer referencia al carácter inconcluso de las obras del puente sobre el río Fraile, citaba a autores como *M. Ivon, Villarceau, Michael, Mery y cualquier otro*⁶¹. Una mirada juiciosa –aun pendiente de hacer– sobre los planos arquitectónicos y los principios matemáticos más comunes, posiblemente permitirá una idea más precisa sobre el uso de ecuaciones y fórmulas matemáticas en el diseño y construcción de los puentes en el alto Cauca. Por ahora se cuenta solo con algunas relaciones proporcionales, como la ya comentada del puente de Buga sobre el río Guadalajara o las que se pueden deducir de la lectura de la alzada del puente sobre el río Cauca en Popayán, de 1769, donde la luz del arco central es $6 \frac{1}{2}$ veces el espesor de su rosca, o el que aun existe sobre el río Güengüé, de 1890, en el camino de Caloto hacia Buga, donde, además de una rigurosa simetría, la luz de los arcos centrales equivale a $5 \frac{1}{2}$ veces el espesor de sus roscas.

59 *Ibid.*, 383.

60 AHC: Sala Capitulador, Cabildo de Popayán, t. 55, f. 19, 1809.

61 ROC, 877, octubre 11 de 1895.

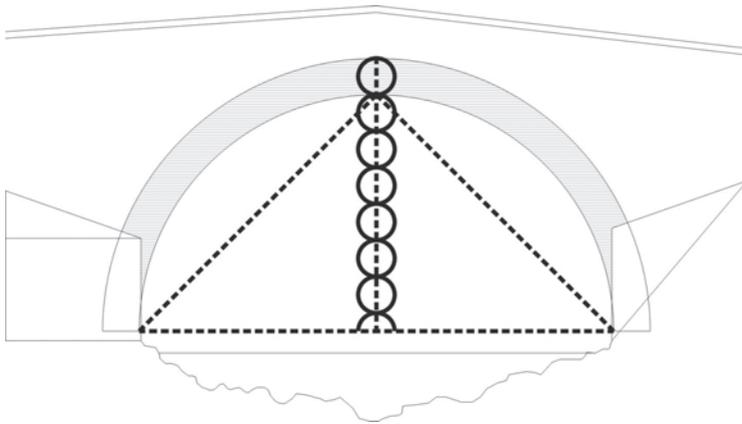


Figura 3.17 Alzada del arco central del puente de Popayán sobre el río Cauca y sobre ella, sistemas de proporción empleados por sus constructores (1769) *Dibujo: J.C. Guzmán (2007).*

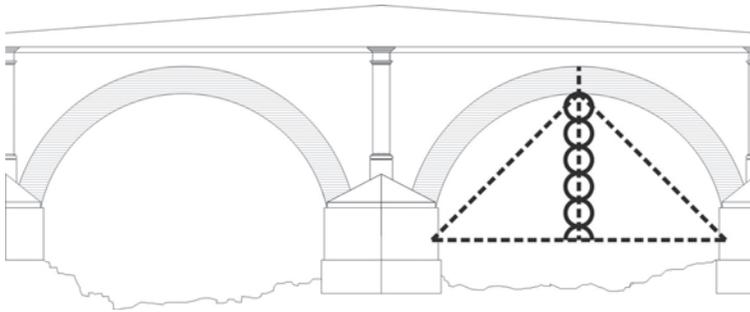


Figura 3.18 Alzada de los arcos centrales del puente sobre el río Güengüé y sobre ella, sistemas de proporción empleados por sus constructores (1890) *Dibujo: J.C. Guzmán (2007).*

Los encofrados

Otro de los grandes problemas a resolver durante la construcción de un puente, aunque menos conocido, era el cálculo de los encofrados o cimbras⁶²: como ya lo había planteado Palladio, se trataba siempre de evitar a toda costa que las columnas de madera que soportaban la obra en construcción llegasen sobre el suelo o dentro del lecho de los ríos, en el peor de los casos, para lo cual se buscaba contar con un apoyo a la altura de los arranques de las bóvedas produciéndose en muchos casos altas deformaciones que desvirtuaban el perfil geométrico de la obra.

⁶² Entendiendo aquí la *cimbra* como aquella estructura de madera, de carácter provisional, que sirve de molde a la directriz de una bóveda o un arco y debe ser capaz de resistir el peso muerto de la estructura durante su proceso de construcción y fraguado. Sobre el tema puede consultarse a López (1996).

En sus formas más simples, las cimbras de madera se hacían con al menos dos arcos paralelos reforzados con una estructura de entramados triangulada. De la complejidad de su construcción y sus particularidades operativas, Mark (2002: 89-90) describe el siguiente panorama: *estos arcos, hechos de cortas vigas de madera ensambladas, llevan entre ellas tablonces, llamados entibos, sobre los cuales se colocan las piedras. Para hacer más seguro el descimbrado, los constructores insertaban pares de calzos opuestos bajo las cimbras de madera así como en las cimentaciones provisionales o, en el caso de las cimbras colgantes, en los resaltos del muro de fábrica. En cuanto se terminaba el arco se retiraba la cimbra extrayendo los calzos, los cuales hacían salir sucesivamente a la cimbra unos pocos centímetros y permitían a los riñones fijarse por sí mismos en el sitio. En los grandes arcos con muchos calzos de fijación, el descimbrado era un procedimiento difícil que requería una estrecha coordinación en la eliminación de los calzos, ya que un descimbrado desigual podía tener como resultado la distorsión o el derrumbe de la estructura.*

Pese a tales dificultades, la literatura técnica consagrada al tema fue prácticamente inexistente hasta el siglo XVIII, cuando el francés Henri Pitot –en un artículo publicado en las *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris* de 1726⁶³– recomendaba el uso de vigas horizontales de madera dentro de las cimbras, capaces de enlazar piezas simétricas a la manera de tirantes: su colocación se determinaba a partir del punto de intersección formado por la curva y una perpendicular trazada a ella desde el lugar donde se cruzan las tangentes a la clave y a los arranques del arco. Posteriormente las teorías de Pitot serán revisadas y refinadas por P. Couplet (1729) y A.F. Frézier (1739) en lo relacionado con la porción de carga muerta que recibían las cimbras, concluyendo que era necesario reforzar aún más la propuesta estructural.

Más propias de actividades de naturaleza práctica eran las recomendaciones de Müller (1769), para quien:

Concluidos los pilares y los estribos, lo primero que se debe disponer es empalmar y situar las cimbrías, que han de ser tan sólidas, fuertes y robustas, que puedan sostener el grande peso de los arcos. Respecto que los más de los carpinteros no ignoran en modo de enlazar y fabricar estas cimbrías, y que por otra parte Mr. Lebely ofrece publicar los diseños de las que ha empleado en la construcción del puente de Westminster, solo hablaremos del modo de situarlas...⁶⁴

63 Titulado "Examen de la force qu'il faut donner aux Cintres dont on se sert dans la construction des grandes Voutes, des Arches des Ponts, etc.", referido en López (1996).

64 Müller (1769: 37).

Es más interesante el hecho de que en la versión castellana que de la obra de Müller hiciera Sánchez Taramas, este incluyera en el libro un texto de su propia autoría relacionado precisamente con el tema de las cimbras de las bóvedas de los puentes bajo el subtítulo *Advertencia para la disposición, enlace y robustez de las cimbras*⁶⁵, en el que retoma las lecciones de Pitot con el fin de aumentar en los artífices el conocimiento sobre el tema:

*Las cimbras que ordinariamente emplean los Artífices para la fábrica de las Bóvedas y Arcos de toda especie, las constituyen à su modo, y sin sujetarse à las precisas reglas que enseña la Teoría, fiados acaso en los auxilios que puede prestarles su continuada práctica y experiencia...*⁶⁶

Para apoyar sus explicaciones apelaba a dos figuras que representan tanto un arco de medio punto como uno de tres centros, recalcando en ambos casos la importancia de la solera EF, cuya posición se determinaba en el primero de los casos a partir de la intersección entre la circunferencia y uno de sus radios trazados a 45° con respecto a la línea horizontal; en el segundo caso, el punto F, análogo al E, resultaba de la intersección de la línea TL, trazada desde el centro T del arco superior hasta el punto L (intersección de las tangentes DL y BL) con el estradós del arco o la bóveda.

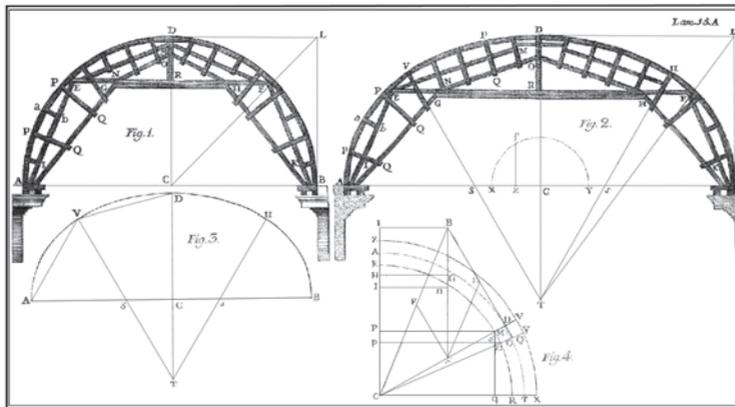


Figura 3.19 Sobre las cimbras para los arcos de fábrica.
Fuente: Müller (1796, lámina 35A).

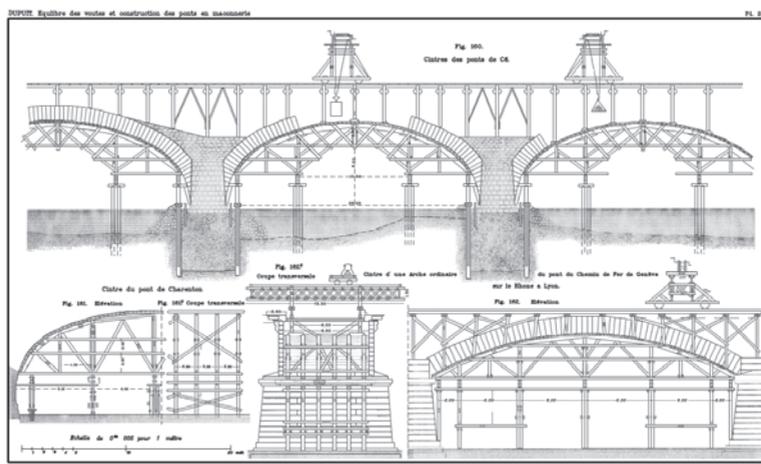
65 *Ibid.*, 93-112.

66 *Ibid.*, 93.

También Bails (1796) desarrolló el tema a partir de dos situaciones: una cimbra para bóveda de medio punto y otra para del tipo rebajado, elíptico o carpanel. Como premisas, establecía algunas pautas a seguir por el carpintero a cargo de las obras relacionadas todas con el ensamble de las piezas de madera; acto seguido, entraba a calcular el peso de la bóveda, el que debía reducirse en proporción de 14 a 11 para tener en cuenta qué parte de él había de cargar la cimbra⁶⁷. Retomando a Parent (1713) y Pitot (1726), con el apoyo de sus experiencias en torno a la resistencia de materiales (en especial la madera), Bails lograba establecer una relación entre carga máxima y capacidad resistente de las piezas de la cimbra.

Durante el siglo XIX el tema será aun de interés para los ingenieros de la industrialización. Dupuit (1870), por ejemplo, desarrolló una muy buena cantidad de detalles constructivos y especificaciones técnicas en torno al tema, que para él tenía aún plena validez ya que las cimbras se usaban también en la construcción de túneles y puentes ferroviarios; por su parte Desnoyers (1885) dedicó al tema de las cimbras un capítulo completo, en el que recomienda disponer en lo posible las piezas de madera formando triángulos equiláteros, evitar el empleo de piezas de poca sección y contrarrestar las flexiones donde se presentasen. Aportaba además una ecuación que permitiría determinar el peso que debe soportar una pieza de madera ante una carga uniformemente distribuida⁶⁸.

Figura 3.20 Cintres des ponts de Cé.
 Fuente: Dupuit (1870, plancha 24).



67 Se consideraba que la parte inferior de las bóvedas no cargaban sobre la cimbra, ya que podían sostenerse por sí solas durante el proceso constructivo.

68 La ecuación es $b = \sqrt{P * 1 / 8 * 10^5 * a}$, donde b es la altura de la pieza de madera, P el peso a soportar, l la luz y a el largo de la pieza.

Para el caso de los puentes de arco en el alto Cauca, no tenemos descripción alguna que dé cuenta de manera precisa cómo se llevaban a cabo sus encofrados. Solo podemos contar con una mera alusión al tema, hecha por el ingeniero Modesto Garcés en 1875 durante la construcción del puente de Buga, sobre el río Guadalajara:

Hay un arco de 10 metros de luz terminado; otro á la altura de los riñones, con las cimbras arregladas para continuar cerrándolo. Para cerrar el tercer arco, que también está adelantado, y por supuesto terminados los estribos y muros laterales, tendré necesidad de descimbrar el primero (cuando el 2º esté terminado) y construirlo sobre estas cimbras⁶⁹.

Garcés reutilizaba las potentes cimbras, que en este caso alcanzaban los 10 m de luz porque los tres arcos centrales eran exactamente iguales. Además, exponía su preocupación porque la obra falsa fuese arrasada por una creciente del río, con causas fatales para la continuidad de los trabajos:

...una grande avenida del río se arrastraría las cimbras, desnivelaría y tal vez destruiría cuanto hay hecho, no dejando la esperanza de verlo a levantar⁷⁰.

También es posible deducir la manera en que se disponían los encofrados a partir de las pequeñas cicatrices o *mechinales* que dejaron en los muros de algunos de los puentes caucanos. En el de Ovejas, por ejemplo, iniciado en 1877 bajo la dirección de Serafín Barbetti, aún se aprecian las huellas de los maderos dispuestos horizontalmente sobre el río, que casi con seguridad debían soportar un entramado de tornapuntas y diagonales capaces de sostener la doble rosca del arco. En este caso, como en algunos otros puentes de Barbetti, se advierte que la rosca inferior del arco responde a un aparejo simple, como un muro en soga curvado, que quizá se colocaba directamente sobre las cimbras en espera de fraguar para luego recibir el peso de la segunda rosca, más gruesa y resistente. Esa primera rosca, además, no arranca desde la línea de las impostas, sino desde un punto imaginario que resulta de la intersección del intradós con una línea que describe un ángulo de 52° con respecto a la horizontal, justo desde el punto donde la cimbra se hace rigurosamente necesaria.

69 ROC, 94, abril 17 de 1875.

70 *Ibid.*

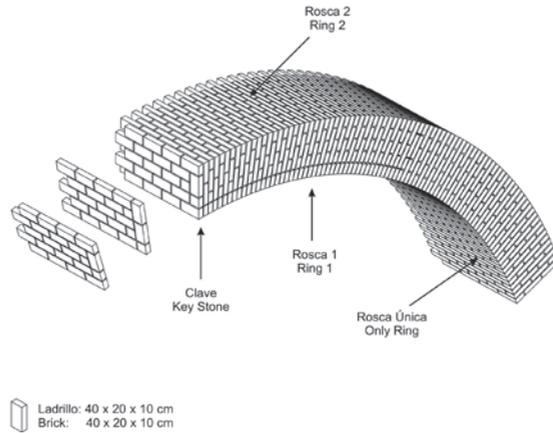


Figura 3.21
Características del
aparejo y trazado de
las roscas de la bóveda
del puente sobre el río
Ovejas (1877).
Foto: J. Galindo (2006).

Cosa similar ocurre en los tímpanos del puente sobre el río Güengüé, cuya construcción empezó seguramente en 1890. Dado su gran tamaño, demandó un considerable trabajo en relación con las cimbras y los andamios, tal vez hechos con maderas redondas cortadas de las inmediaciones y muy probablemente del tipo *guadua* (nombre local del bambú) dada su abundancia en la región, sumada a su elasticidad y resistencia.



Figura 3.22 Huellas de andamios laterales en el puente sobre el río Güengüé (1890).
Foto: J. Galindo (2006).

Otro problema práctico era el descimbrado. Bails (1796) lo expresa bastante bien cuando dice, refiriéndose al tema:

El modo de quitarlas es un punto sumamente esencial. Algunos maestros aconsejan que se vayan quitando desde luego las tablitas y los egiones debaxo de la clave, después los de las dovelas inmediatas, prosiguiendo á este tenor hasta los almohadones; pero es mejor lo que aconsejan otros, es á saber, que se quiten primero las tablitas y egiones de los almohadoes y de las dovelas inmediatas al arranque de las bóvedas, prosiguiendo la misma maniobra de mano en obra hasta la clave; dando por razón que la parte que obra de la bóveda y la clave se halla así más apretada, que el asiento se hace con más igualdad, que la parte superior de la bóveda baxa menos, y corre menos riesgo de desfigurarse su curva⁷¹.

En el ámbito local, los problemas de retirar la cimbra también despertaban interés. Una muestra de ello es el artículo “Cajas de arena para bajar las cimbras de los arcos”, traducido del inglés por el ingeniero civil Manuel José Peña y publicado en Bogotá en 1906 en *Anales de Ingeniería*, la publicación oficial de la Sociedad Colombiana de Ingenieros:

71 Bails (1796: 555).

Para sostener las cimbras de un puente de cuatro luces sobre el río Tamal, en el distrito de Midnapore (India), se necesitaban para llenar de arena algunos receptáculos enteramente cerrados que fueran gradualmente vaciándose á medida que el peso colocado encima de ellos fuera descendiendo...⁷²

No existen testimonios o documentos que den idea de la manera en que en el alto Cauca se retiraban las cimbras, aunque es muy probable que tal cosa no fuese muy diferente de los métodos convencionales que empleaban sacos de arena bajo los apoyos cuando era necesaria la reutilización de estas, o el simple desmonte, pieza a pieza, para hacer de las maderas la leña de los fogones.

Los rellenos y las calzadas

El tema del relleno de los senos de los puentes (es decir, del espacio vacío que se forma entre ellos y los tímpanos laterales) será poco desarrollado por la tratadística clásica. Para Alberti (1485), por ejemplo, una vez cerradas las bóvedas y levantados los muros del puente, era necesario hacer el relleno de los senos con material duro y consistente:

Todo el relleno se hará con la piedra más dura posible y la ligadura más consistente que se pueda. Y si no hay suficiente cantidad de la piedra más resistente de todas, no rechazaré que, por razones de fuerza mayor, se utilicen piedras más débiles en la construcción del relleno, con tal de que el espinazo y las hiladas de dovelas que se encuentran a uno y otro lado próximas a él, en toda la superficie de la bóveda, no se hagan sino de piedra muy dura⁷³.

Terminada esta labor, Alberti hace referencia a la calzada del puente, recomendando que el espesor del pavimento, que se elaboraba con hormigón a base de cal, debía ser igual al de los arcos de las bóvedas. En cuanto a las pendientes para los desagües, afirmaba que:

Los procedimientos para dar inclinación son de tres clases. En efecto, o bien la inclinación se produce hacia el centro de la calzada, lo que debe hacerse en el caso de calzadas de una anchura considerable, o bien hacia los costados, lo que causa menos molestia en las más estrechas, o bien se hace en sentido longitudinal. Ello va en función de las posibles

72 Al: vol. XIII, 158, Bogotá, abril de 1906, p. 311.

73 Alberti (1485: 189).

salidas de las alcantarillas y ls arroyuelos al mar, a un lago o a un cauce de agua. La inclinación justa será de medio dedo cada dos codos⁷⁴.

Pero no siempre los senos se rellenaban. Conforme se observa aun en algunos puentes europeos, también se optaba por poner en su interior arcos de descarga formando hornacinas con lo que se aligeraba el peso propio y se producía un eficiente reparto de cargas. El mismo Turriano (Mss, s. XVI), en el siglo XVI, lo decía de la siguiente manera:

Haorrarse piedra devaxo de la boveda B que es la que haze A y C en aquel angulo se puede haorrar gasto y mucha piedra y cal aun tiempo; porque aquel arquillo B es de mucha fuerça para los dos arcos grandes...⁷⁵

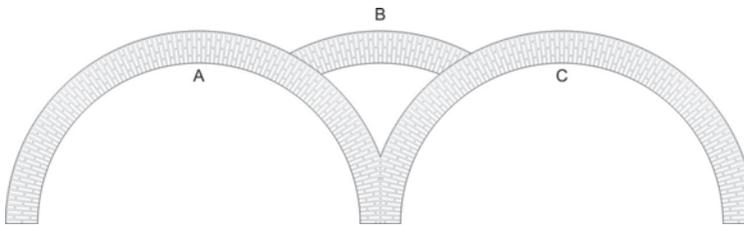


Figura 3.23 Ilustración acerca de los senos de los arcos a partir de la descripción de Turriano (1983).
Dibujo: E. Sotelo (2007).

Y sobre las pendientes que debían dársele a las calzadas, el manuscrito atribuido a Turriano establecía que la mejor era aquella en proporción de 1 a 8, aunque en caso de ser posible, debía optarse por las ideales para el tráfico de personas y bestias con carga, que son de proporción 1 a 15 o 1 a 30.

Ni Belidor (1729) ni Gautier (1755) muestran interés en el tema; solo a través de algunas ilustraciones que representan secciones transversales de puentes dejan intuir que asumen un relleno dentro de los senos hecho a base de piedras toscas sobre las cuales se colocaba el pavimento. Para Müller (1769), una vez construidos los arcos, debían macizarse los senos con mampostería ordinaria o piedra seca sobre la cual se disponía un lecho de arena que debía recibir el pavimento. Sobre las claves de los arcos disponía de canalones a fin de dar salida a las aguas para evitar que se introdujera por las juntas del empedrado. Tampoco los autores decimonónicos desarrollan el tema de los rellenos o las calzadas: Clémencet (1891), por ejemplo, se muestra partidario de dejar vacío el interior de los

⁷⁴ *Ibid.*, 190.

⁷⁵ Turriano (Mss, s. XVI: 506).

puentes y emplear los mismos arcos de descarga que siglos atrás había descrito independientemente Turriano.

Para el caso de los puentes caucanos, sabemos hoy –gracias a un trabajo de excavación manual muy simple aplicado por los autores– que el material de su relleno estaba constituido por una mezcla pobre de tierra arcillosa compactada, mezclada con cascotes y escombros del mismo ladrillo que se empleaba en la albañilería de los arcos, aunque no se tengan documentos que describen el proceso de su vertido sobre las estructuras. Uno de los escasos relatos al respecto nos lo ha dejado Adriano Paz, quien en 1905 estaba al frente de las obras del puente sobre el río Mondomo en cercanías de la población del mismo nombre:

Para la fecha, están clavados los dos arcos menores, así como las cimbras para voltear el eje mayor. Están contruados los contrafuertes, trabados los muros del puente y rellenos los senos de los arcos con cantos de piedra arenisca⁷⁶.

Más interés despertaba el tema de los pavimentos y los peligros que pudiese acarrear la filtración de las aguas a través suyo. En relación con el puente sobre el río Fraile, el mismo Adriano Paz comentaba lo siguiente en un informe de su autoría fechado diez años antes, en 1895:

Esta obra inconclusa consta de cinco arcos elegantes y bien contruados, con especialidad el ojo mayor que es un arco elíptico, y toda la parte contruida es completamente satisfactoria ... Llamo la atención del Gobierno sobre el estado de esta obra porque el estropeo ocasionado por el piso de las bestias sobre los ladrillos de las bóvedas, los está despedazando, y si á esto se agrega la falta de una capa de mortero para evitar las filtraciones, más el agua que se deposita en los senos, es de suponer que estas causas ocasionarán daños de gravedad, que tendrán por consecuencia la ruina de la obra, si se deja indefinidamente sin contruir⁷⁷.

Paz cuestionaba el hecho de que el puente estuviese inconcluso amparado en los efectos a largo plazo causados por la acción del agua sobre las rocas de ladrillo sin pavimentos. Finalmente, precisa una consideración de carácter eminentemente técnica en torno a la estabilidad de la obra:

Si como supongo el arco mayor de dicho puente es una curva elíptica ó un arco peraltado, es cosa averiguada que en esta clase de bóveda

76 ROC, 279, mayo 15 de 1905.

77 ROC, 895, noviembre 22 de 1895.

la tendencia a romperse se manifiesta en la clave en trasdós, de los riñones en intrados y en los arranques del lado de trasdós; por lo que se hace uso de algunos medios de ornamentación destinados á aumentar la carga de la bóveda en la parte superior y a contrarrestar los efectos de las presiones laterales. En el estado inconcluso en que se encuentra el puente, tiene el peso de las barandas, rellenos y empedrados en la parte superior, pero como esto falta a los demás arcos y en materia de equilibrio cuando se llega al límite de la resistencia la más insignificante fuerza puede romperlo, deduzco que hasta no estar terminado el puente y completos los macizos, no se habrán establecido definitivamente las condiciones de equilibrio, aunque lo creo bien construido y supongo no sufrirá⁷⁸.

La observación final de Paz era acertada: barandas, rellenos y empedrados ayudaban al equilibrio de la obra. También era correcta su decisión: aumentar la masa en los costados del puente, allí donde el relleno húmedo podía ejercer presión lateral, no solo dignificaba sus paramentos sino que contrarrestaba los nocivos efectos laterales propios de esta clase de estructuras. La ornamentación guardaba también una función constructiva. Quizá consideraciones análogas hicieron que los artesanos a cargo de los puentes del Humilladero, Güengüé o Caloto dispusieron pilastras de refuerzo, con clara referencia al lenguaje arquitectónico que entonces exteriorizaban con orgullo los edificios de la República.

En algunas ocasiones, en los contratos de construcción se aludía a la manera en que debían hacerse los rellenos, como aconteció al del río Güengüé, en 1894, entre el Estado y el empresario payanés Antonino Olano⁷⁹:

La sección transversal de los arcos será de cuatro metros y la altura de las barandas de un metro. El piso será consolidado y empedrado, de manera que no puedan producirse infiltraciones de aguas lluvias... Los rellenos laterales que haya que hacer en el puente serán hechos de tierra, piedra y cascajo bien apisonados, consolidados y encasajados con un declive que no pase del diez por ciento. La construcción general se aproximará, en cuanto sea posible, y de acuerdo con lo estipulado en el presente contrato⁸⁰.

78 *Ibid.*

79 Antonino Olano Borrero, representa, junto a otros hombres de su generación como Cenón Caicedo o Belisario Zamorano, al empresario criollo que en virtud de sus vínculos con el poder regional, contrataría con el Estado la construcción de obras públicas independientemente de su formación académica. Olano, nacido en Cali en 1871 era abogado y ejercería como profesor de jurisprudencia en la Universidad del Cauca hasta su muerte en 1923.

80 ROC, 746, noviembre 13 de 1894.



Figura 3.24 Detalle del refuerzo ornamental en el puente del Humilladero, en Popayán (1868).
Foto: J. A. Paredes (2007).

Las pendientes de las calzadas eran otro aspecto de mucha preocupación en el alto Cauca sobre el que los contratistas no siempre ponían el merecido interés, por lo que muchos informes posteriores a su inauguración clamaban por reparaciones en este sentido. Por ejemplo, en un informe del Inspector General de Caminos del Departamento del Cauca, fechado en 1891, haciendo referencia al puente de Aguasucia, situado en el término de la población de Santander de Quilichao, en que se alude a la necesidad de *zulaquear* la superficie externa de las bóvedas de la estructura y hacer de nuevo la pendiente, se afirma:

...debido á la mala calidad del ladrillo empleado en esta obra, el agua de las lluvias se filtra por debajo del arco, la cual compromete la estabilidad del puente. Para subsanar este mal y suavisar la inclinación de la calzada, creo conveniente que se descargue el arco para zulaquear la superficie del extradós y se levanten más los planos de cabeza para alzar los rellenos hasta conseguir que la inclinación de la calzada sea apenas del 2%⁸¹.

Para el puente sobre el río Nima, construido también en 1891, se hacían las siguientes exigencias contenidas en el contrato firmado entre la Secretaría de Hacienda del Departamento del Cauca y Rogelio González Concha:

González se compromete á darle al mencionado puente de Nima el declive del seis por ciento (6 por 100) en vez del diez por ciento (10 por 100) á que estaba obligado; para lo cual elevará las murallas y los contrafuertes del puente y el piso hasta donde fuere necesario... González construirá las alcantarillas necesarias para el libre paso de las aguas... La calzada será construida con solidez de tierra pisada y encasajada por encima...⁸²

En casi todos los contratos, la magnitud de la pendiente de la calzada quedaba fijamente establecido: 10% en los puentes de los ríos Fraile (1891), Güengüé (1894) y Sonso (1894). Los arcos rebajados facilitaban en muchas ocasiones su trazado. Así lo testimoniaba el inspector general de Caminos del Departamento en 1891 al referirse a los trabajos que se llevaban a cabo para construir el puente sobre el río Zabaletas, a cargo del artesano Toribio Vivas, situado en el camino entre las poblaciones de El Cerrito y Guacarí, en la zona plana del valle del río Cauca:

La luz del de Zabaletas es de 12 metros, y para evitar que fuera á quedar el puente muy elevado, convine con el contratista, que es un albañil inteligente, que hiciera un arco rebajado, con lo cual es fácil dar á la calzada del puente, el 7% de inclinación, sin prolongar mucho los terraplenes laterales... Los puentes contratados por el señor Vivas, puedo asegurar que quedarán buenos, pues tuve ocasión de ver y examinar los planos de dichos puentes, trabajados por el mismo Vivas, quien personalmente los está ejecutando⁸³.

81 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

82 ROC, 512, marzo 7 de 1893.

83 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

Junto al puente de Zabaletas, hoy desaparecido, Toribio Vivas construía también el puente de Popurrinas, aprovechando las mismas cerchas de madera. Calificado por sus contemporáneos como *maestro entre albañiles pero no ingeniero*, Vivas era un artesano de mucha experiencia en la región: a su cargo tuvo las obras de los puentes sobre los ríos Sonso (1894), Güengüé (1905) y Desbaratado (1906), además de los de Zabaletas y Popurrinas ya mencionados.



Figura 3.25 Puente sobre la quebrada Popurrinas, en el camino entre Palmira y Buga (1891). Foto: J. Galindo (2007).

Huellas de pavimentos originales se observan hoy en los puentes del río Cofre, La Victoria y Piendamó. En algunas ocasiones el empedrado usado sobre la superficie de los puentes se prolongaba en los mismos caminos, como aún se puede verificar en la ruta que desciende al puente sobre el río Ovejas, de Serafín Barbetti, que delata el interés de los constructores por hacer de la vía una obra sólida y duradera.



Figura 3.26 Empedrado existente en el camino que desciende al puente sobre el río Ovejas.

Foto: J. Galindo (2006).

Organización de las obras

Además del *utillaje* técnico con que debían contar los maestros de obras, ingenieros prácticos o simples artesanos encargados de la construcción de un puente de albañilería, era necesario tener capacidad para organizar y dirigir todos y cada uno de los procesos de ejecución reseñados aquí. Se trataba un aspecto, que aunque podía tener algún respaldo en lo dicho por los autores clásicos, dependía de manera definitiva de la tradición que durante años se había venido consolidando en la región. Temas relacionados con la construcción de un campamento, la compra o

fabricación *in situ* de materiales de construcción, la vinculación de jornaleros y sus condiciones laborales, las maneras de contratar con el Estado o el complejo manejo de las responsabilidades, eran siempre de difícil manejo en el momento y lugar de nuestro estudio.

Uno de los pocos registros que se tienen acerca de las tareas previas al inicio de las obras y la adquisición de los materiales de construcción hace referencia al puente sobre el río Amaime, entre las ciudades de Palmira y Buga, a cargo de fray Serafín Barbetti y Yacundo Nannetti en 1879, gracias a un contrato firmado entre ellos y el Estado Soberano del Cauca:

El Gobierno del Estado se compromete a dar a los contratistas, poniéndolos en el lugar en que se ha de construir el puente, ochenta mil ladrillos dobles de cuarenta centímetros de largo, veinte de ancho y diez de grueso ... También es de cargo del Gobierno entregar libre de toda cuestión la faja de terreno necesaria para poder construir el puente dos o tres cuadras arriba del camino público, en el punto en que hai una isla que facilita la obra⁸⁴.

En el documento se le reconocía a Barbetti la calidad de ingeniero y se le obligaba a ejecutar la obra observando las reglas de la ciencia, quedando en libertad para dar al puente las dimensiones estructurales que considerara necesarias. Acto seguido⁸⁵, los dos contratistas vincularon cinco maestros de albañilería y doce peones, invirtieron en excavaciones, compraron cal, arena y maderas, edificaron una casa rústica que servía de campamento, adquirieron clavos para cerchas, tres caballos y utensilios de cocina. Para dar de comer a los empleados se contrató una cocinera, además de un sirviente que servirían durante los cinco meses proyectados de labores; también se compró licor para los albañiles a manera de gratificación y algunas medicinas, así como herramientas y una *bomba extranjera*. Todo ello costó entonces \$6.060 a lo que se sumaron los \$4.940 que reclamaban como honorarios, para un costo que ascendía a \$11.000.

Una relación del total de los gastos se puede ver en la tabla 4.1, en la cual se expresan además los porcentajes del costo de cada ítem, siendo los más altos los correspondientes a honorarios y al valor de los ladrillos que compraba directamente el Gobierno:

84 ROC, 29, octubre 9 de 1879.

85 AHC: Índice de Manuscritos, 1883, paquete 162, legajo 8, *Documentos relacionados con el reclamo de los señores Barbetti y Nannetti*, ff. sin numerar.

Tabla 3.1 Costos estimados para la construcción del puente de arcos sobre el río Amaime.

ITEM	COSTO TOTAL	%
Cinco maestros de albañilería a \$2 c/u (son \$10 diarios)	1250	9,32
Doce peones a \$0,8 diarios	1200	8,95
Excavación de cimientos	300	2,23
Cal	1050	7,83
Arena	250	1,86
Madera	180	1,34
Construcción de una casa	140	1,04
Construcción de una cocina y un rancho	70	0,52
Bomba extranjera	80	0,59
Herramientas y demás útiles de trabajo	100	0,74
Clavos para cerchas	30	0,22
Tres caballos para el servicio	120	0,89
Trastos del servicio de mesa y de cocina	40	0,29
Una cocinera durante los 5 meses	60	0,44
Gastos de alimentos de los empleados y viajes	300	2,23
Un sirviente para los contratistas	150	1,11
Licor para gratificar a los albañiles y peones	300	2,23
Gastos en medicina	40	0,29
Imprevistos	400	2,98
Honorarios de los contratistas	4940	36,86
Costo de los ladrillos asumidos por el Gobierno	2400	17,91
TOTAL	13400	100

Es muy probable que la cal empleada fuese extraída de la cercana población de Vijes por lo que el costo del desplazamiento hasta el punto de Amaime incrementaba su valor frente al de la arena, la cual se extraía directamente del lecho del río para luego ser cernida y empleada en la fabricación de los morteros. También era habitual que para las maderas se talaran árboles cercanos y que las herramientas tuvieran múltiples usos. Se destaca el gasto en medicinas no por su valor, sino como indicativo de la preocupación por accidentes laborales en un sitio despoblado y relativamente alejado de centros urbanos de importancia. No deja de ser anecdótico el gasto en licores y el bajísimo precio relativo de la construcción de los recintos destinados al alojamiento y la cocina.

Mención aparte merecen los ladrillos, que para el caso del puente del Amaime eran suministrados a los contratistas por el propio Gobierno caucano, quien a su vez los adquiría de particulares luego de invitación abierta a cotizar. Para este caso se tiene constancia de la existencia de avisos impresos por medio de los cuales el jefe municipal de Palmira, Juan E. Conde, llamaba a los interesados a proporcionar *ochenta mil ladrillos*

*dobles de cuarenta centímetros de largo, veinte de ancho y diez de altura*⁸⁶. El suministro le fue asignado finalmente a Belisario Barandica, quien meses más tarde habría de dirigirse en persona al Presidente del Estado Soberano del Cauca para reclamar el pago incumplido de 20 mil ladrillos a un costo total de 60 mil pesos.

En otros casos, como en la construcción del puente de Buga en 1878 o en la reconstrucción del puente de Mondomo en 1905, los ladrillos se fabricaban a pie de obra en hornos construidos especialmente para tal fin, en ocasiones acompañados de galpones para el corte y almacenamiento bajo cubierta de las piezas⁸⁷.

La abundancia de calizas en las laderas que conforman el valle del río Cauca, facilitó con seguridad la continuidad de los procesos de construcción. No son muchas las referencias que nos quedan acerca de la cal empleada en labores de albañilería, entre las que se cuenta la alusión hecha por Adriano Paz con motivo de un informe elaborado acerca del estado de las obras del puente de Mondomo en 1904:

*Respecto a la calidad de la cal, procedente de una caliza nueva, aplazo mi opinión hasta que haya analizado las muestras que traje, a algunos peritos a quienes las he enseñado la hallan de buenas condiciones hidráulicas*⁸⁸.

No era tampoco un hecho extraño que los vecinos del puente en construcción colaboraran con materiales en especie: en el caso del puente del Humilladero, hombres reconocidos de Popayán como Antonino Olano Olave o Federico Restrepo aportaron clavos de alambre y tirantes de madera para la construcción de las cimbras⁸⁹, aunque no siempre la calidad de los materiales fuese la mejor. Por ejemplo, en relación con el puente de Aguasucia, en la población de Santander de Quilichao, se tiene noticia fechada en 1891 de que la mala calidad de los ladrillos llegó a comprometer la estabilidad de la obra:

*...debido á la mala calidad del ladrillo empleado en esta obra, el agua de las lluvias se filtra por debajo del arco, la cual compromete la estabilidad del puente*⁹⁰.

86 Aviso impreso inserto. *Ibid.*

87 ROC, 279, mayo 15 de 1905.

88 ROC, 200, octubre 10 de 1904.

89 AHC: Índice de Manuscritos, 1869, paquete 102, legajo 63, *Documentos relativos a la construcción del puente sobre el río Molino*, ff. sin numerar.

90 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

Los aspectos relacionados con la contratación de los operarios y sus condiciones de trabajo no siempre eran fáciles y demandaban un seguimiento contable en ocasiones tedioso, como ha quedado registrado en el manuscrito titulado *Gastos en el puente sobre el río Molino*⁹¹, en el que se llevaba memoria de los pagos a los peones empleados durante las obras que dieron pie al puente del Humilladero, en Popayán, a cargo también de Barbetti. Se deduce de su lectura que al menos en este caso, el pago se hacía cada 6 días, conforme a tareas específicas asignadas: reparación de un carro, trasiego de ladrillos o excavaciones, por ejemplo. Además, la mano de obra no siempre se formaba con personal asalariado. Según el mismo documento, durante los primeros meses de la construcción del puente se empleó a personal del presidio a quienes se pagaba un jornal, como acontecería en la construcción del puente de Buga pocos años más tarde⁹². También se sabe que, en otro caso, para edificar el puente de arco sobre el río Cauca en el sitio denominado Julumito, cerca a Popayán, los indígenas colaboraron con diez peones y materiales⁹³; y que en el caso del puente de Coconuco, en 1907 y sobre el río Cauca, se contó también con locales que laboraron de manera voluntaria:

*...se inicia la obra de un puente sobre el río Cauca en punto en que era indispensable conseguir el acceso de la una a la otra orilla de aquel río. Se plantará en territorio del mismo corregimiento fábrica de ladrillos para esta obra y será la parcialidad de indígenas de Coconuco quien dé los brazos para la plantación de esa fábrica...*⁹⁴

No existía entonces ningún tipo de vínculo laboral entre los peones o jornaleros y el Estado que actuaba como contratante. Del maestro de obras, cuya reputación y experiencia constituían su carta de presentación, dependían en ocasiones cuadrillas de 10 o 12 personas que probablemente tenían algún tipo de jerarquía establecida a partir de las especialidades de los oficios.

En algunas situaciones, las extremas condiciones de trabajo desalentaban la vinculación de jornaleros, como en el caso del puente sobre el río Fraile, en 1895, a cargo de Rafael González Concha quien explicaba así las demoras en el desarrollo de esta obra:

91 AHC: Índice de Manuscritos, 1869, paquete 102, legajo 63, *Documentos relativos a la construcción del puente sobre el río Molino*, ff. sin numerar.

92 ROC, 1644, julio 30 de 1892.

93 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1178, ff. 148-150b.

94 *Ibid.*, Mss sin título, firmado en Popayán por Miguel Arroyo el 14 de marzo de 1907 informando sobre vías y puentes en el Cauca.

*Los materiales en Florida son escasos y caros, y como el clima es mal sano, los operarios no quieren ir á trabajar allá sino mediante crecido salario. Los recursos se me agotaron en absoluto y me ví en la necesidad de suspender el trabajo*⁹⁵.

En ciertos momentos, la escasez de obreros se explicaba por el reclutamiento que de hombres jóvenes, sanos y fuertes hacían los ejércitos que azotaban el país, diezmando las cuadrillas de peones, a tal punto que durante la construcción del puente sobre el río Sonso, en 1895, los contratistas tuvieron que solicitar a la Gobernación del Cauca salvoconductos para sus obreros a fin de que no fuesen tomados por los agentes del Gobierno⁹⁶.

En otros momentos la mano de obra era tan abundante que el contratista podía darse el lujo de escoger el personal a su cargo, como ocurrió durante la construcción del puente sobre el río Mondomo, también en 1895, el cual constaba de un arco único de 15 metros de luz y 5 metros de flecha. Allí, el ingeniero Adriano Paz, al frente de la obra, afirmaba categóricamente:

*...que [la] construirá cualquier maestro de albañilería de los que aquí abundan, como han construido tantos en el Departamento*⁹⁷.

Otra causa de intranquilidad era la destreza de los obreros. Rómulo Durán, por ejemplo, contratista de varias obras públicas en la región del Cauca, afirmaba en 1889 que:

*...nuestros obreros son poco hábiles y no trabajan cuanto es necesario, aun cuando se tenga la fortuna de encontrarlos*⁹⁸.

Opinión compartida por Cenón Caicedo, a cargo de un puente metálico colgante en la ciudad de Tuluá en 1889:

*Es grande la escasez de buenos peones, así es que los pocos que hay trabajando apenas son regulares y su número no ha podido pasar de ocho diariamente, insuficientes para dar una organización definitiva a los trabajos*⁹⁹.

Las dificultades propias del entorno natural y las débiles condiciones políticas empeoraban en muchas ocasiones la marcha de las obras. De

95 ROC, 877, octubre 11 de 1895.

96 ROC, 883, octubre 29 de 1895.

97 ROC, 895, noviembre 22 de 1895.

98 ROC, 266, marzo 9 de 1889.

99 ROC, 270, marzo 20 de 1889.

nuevo en el caso del puente sobre el Amaime, los contratistas Barbetti y Nannetti argumentaron como una de las causas para solicitar la terminación del contrato, las difíciles circunstancias que se dieron durante su construcción. En carta aclaratoria firmada por F. Mantilla, desde la Secretaría de Hacienda del Estado, se dice que:

...cuando el contratista Sr. Nannetti partió a Palmira con el objeto de practicar los trabajos preparatorios y el Gobierno había impartido sus órdenes para completar el pago del primer contado, se difundió en el Valle el alarma proveniente de la venida a este Estado del ex Gobernador de Antioquia General Tomás Rengifo. Hubo pues necesidad de hacer gastos extraordinarios en aquellos meses para la conservación del orden público, y en seguida ocurrieron las inundaciones que tantos males causaron en el centro y norte del Estado y que destruyeron los puentes de “Piendamó” y el “Palo”¹⁰⁰.

Cosa similar a la ocurrida durante la construcción del puente sobre el paso de La Bruja, según palabras de su director, González Concha:

Esta obra estaba en construcción cuando estalló la guerra que acaba de pasar. Este hecho unido á la circunstancia de no haberse cubierto oportunamente los dos mil pesos valor del segundo contado del contrato, motivaron la suspensión de los trabajos¹⁰¹.

Económicamente, cada proyecto de construcción era entendido como una empresa contable y jurídicamente distinta de las demás: el punto de partida era el contrato, firmado y legalizado entre las partes, en el que se especificaba el sitio en donde se había de erigir el puente, el tipo de estructura, el plazo de entrega y un estimado del costo, que podría variar en función de los inconvenientes que surgieran durante la marcha de los trabajos.

Gracias a una disposición contenida en la ley 69 del 31 de octubre de 1874¹⁰², el Estado Soberano del Cauca había determinado que la construcción de caminos, puentes y en general todo tipo de obras públicas, podía llevarse a cabo por el sistema de administración, *contrata general* (a precio global), *contrata parcial o privilegio*; en cualquier caso, el contratista debía garantizar la calidad de sus trabajos por espacio de 15 años. Sin embargo, cada vez fue más frecuente el sistema de administración delegada gracias al cual el dinero del anticipo se invertía en la compra de

100 AHC: Mss. sin título, paquete 162, legajo 8, con documentos varios de 1883.

101 ROC, 305, diciembre 17 de 1891.

102 ROC, 19, diciembre 13 de 1874.

materiales y en el pago de jornales. Mes a mes se hacía una liquidación del valor de lo ejecutado y se desembolsaban pagos parciales al contratista. El acto final consistía en la ceremonia de la entrega de la obra ante dos o tres peritos que servían de testigos y que firmaban el acta de entrega, librando de compromisos y responsabilidades al contratista y su fiador.

Los plazos de ejecución de las obras también se estipulaban en los contratos y variaban según la envergadura del proyecto. En el contrato del puente de Buga, por ejemplo, se le fijaba a Garcés un periodo de 4 años para la terminación de todos los diseños y las obras; en el del puente del río Ovejas se le daba a Barbetti un plazo de 12 meses y en el de Sonso se establecía con claridad que el contratista solo contaba con 20 meses para la entrega de la obra.

Una vez puesto en servicio el puente, luego de una ceremonia formal y con presencia de vecinos y autoridades locales, era común el advenimiento de problemas. La falta de labores de mantenimiento de la estructura, ya en uso, era en ocasiones motivo de conflictos entre las autoridades y los ingenieros. Una interesante exposición a cargo de Rafael González Concha, constructor de los puentes de El Fraile y La Paila entre 1890 y 1895, expresaba lo siguiente en torno esta situación:

Creo que los contratos que se celebran con el Gobierno, por el hecho de ser bilaterales, caen bajo las mismas leyes que rigen los contratos celebrados entre particulares; es decir, que cada cual, persona ó entidad, contrae obligaciones y adquiere derechos que deben hacerse efectivos sin exigir ni más ni menos de lo estipulado, por más que una de las partes sea notoriamente más débil que la otra. El uno se compromete a construir una obra de cierta naturaleza, cuya forma, dimensiones, etc. se estipulan previamente. En efecto la construye, según su leal saber y entender y procurando ceñirse a lo pactado. Luego viene el otro, examina la obra, se declara satisfecho, la paga y toma posesión de ella. Es evidente que desde ese momento cesa la responsabilidad del primero y comienza la del segundo, el cual como dueño que es, puede dejar perder la obra o poner los medios para conservarla. Cómo puede al cabo de tres años exigirle rotundamente responsabilidad por cualquier daño que suceda? Pruébelo primero que no cambió su compromiso, que empleó malos materiales, que no construyó bien, que los que examinaron y recibieron la obra estaban ciegos y cuando haya hecho todo eso, vea cuáles cláusulas del contrato le dan derecho para exigirle al contratista cualquier reparación o para hacerle algún cargo¹⁰³.

103 ROC, 895, noviembre 22 de 1895.

Lentamente, nuevas condiciones fueron alterando el orden y las normas impuestas por los años. Al término del capítulo anterior se expuso de qué manera, factores externos allanaron el camino para que una nueva tipología de puentes empezara a construirse en la región; pero también sumaron situaciones internas como la descrita por González Concha, y otras más que a continuación se explicarán.

El fin de la tradición

Es difícil establecer el momento y lugar en el que ocurrió la ruptura entre las tradiciones relativas a las técnicas de construcción de puentes de arco de ladrillo y las novedosas técnicas del hormigón armado que permiten estructuras de luces mayores y trazos rectos. De hecho, tal situación no se produce específicamente en un sitio y mucho menos en una fecha determinada; sin embargo, es posible encontrar y documentar casos que permiten entender la manera en que ella aconteció.

El primer factor de cambio se encuentra en los materiales. Mientras que el ladrillo siguió siendo utilizado con enorme frecuencia, la piedra se hizo poco apetecible no sólo por la escasez de fuentes de materia prima, sino también por la falta de canteros. En cuanto a los materiales empleados en la preparación de morteros, sabemos que ya en 1905, en la región del alto Cauca, se empleaba cemento tipo Portland mezclado con cal para trabajos de construcción civil. En un informe firmado entonces por Abelardo Ramos, ingeniero oficial del Departamento del Cauca, existe constancia de ambas cosas, conforme a la explicación dada con relación a la construcción del puente sobre el río Guachinte, al sur de la ciudad de Cali:

La dificultad que he hallado para el avance rápido de la obra ha consistido en la escasez de canteros hábiles; apenas he podido reunir cuatro de regulares aptitudes, que han formado, junto con dos picapedreros y dos peones, el grupo dedicado a la cantera...

La Prefectura hizo situar ya en el lugar de los trabajos 20 sacos de cemento [sic] Pórtland y se ocupa de encontrar la cal necesaria¹⁰⁴.

El puente de Guachinte había sido diseñado por el ingeniero Víctor Borrero en su calidad de director de Obras Públicas en 1895 y se ubicaba sobre el camino que años antes trazara Aquilino Aparicio en busca de una

104 ROC, 282, mayo 26 de 1905.

ruta cómoda entre Cali y Popayán siguiendo la margen occidental del río Cauca.

Más contundente es, sin embargo, el caso relacionado con la fallida construcción de un puente de albañilería en la ciudad de Timbío, sobre la quebrada Chambio, en el camino nacional entre Popayán y Pasto, acontecido a lo largo de varios años durante la segunda década del siglo XX¹⁰⁵. Mediante la Resolución 49(bis) de 1920 se determinó que la construcción del puente estaría a cargo de Celso Guevara, quien al parecer acometió las obras de manera inmediata, como consta en un escueto mensaje dirigido al Ministro de Obras Públicas el 21 de enero del año siguiente:

Para conocimiento del señor Ministro, tengo el honor de transcribirle lo siguiente de un oficio dirigido a esta Procuraduría por el señor Visitador Fiscal de la Nación don Julio R. DELGADO, con fecha del 1° de los corrientes: “En Timbío están construyendo un Puente en la Quebrada Chambio, con fondos nacionales y se han invertido hasta ahora \$1.599-33 oro. Los trabajos marchan muy bien”¹⁰⁶.

Un presupuesto de la obra, sin fecha¹⁰⁷, redactado por el jefe de la Sección de Hacienda del Departamento del Cauca, Benigno Valencia, daba cuenta de las actividades y sus costos. Un resumen de este se incluye en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Costos estimados para la construcción del puente de arcos sobre la quebrada Chambio según Benigno Valencia.

ITEM	COSTO TOTAL	%
25.000 ladrillos	750	21,94
630 arrobos de cal	462,5	13,53
40 arrobos de cemento	48	1,40
430 cargas de arena	258	7,55
200 cargas de piedra	900	26,33
Andamiaje y cerchas	75,5	2,21
Mano de obra	613	17,94
Imprevistos	310,7	9,09
TOTAL	13400	100

Se sabe que para el puente de Chambio se encargaron dos proyectos: el primero, elaborado por el ingeniero caucano Reinaldo Cajiao Wallis,

105 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1487, ff. 5 y ss.

106 *Ibid.*, f. 365.

107 *Ibid.*, f. 374.

exhibía un arco único de 5 metros de luz y llegó a ser considerado muy caro si se comparaba con otros similares en Colombia, por lo que el ingeniero jefe de la Dirección General de Caminos Nacionales (sección del Ministerio de Obras Públicas), Aquilino Aparicio, recomendaba la ejecución de otro, esta vez a cargo del ingeniero departamental Isaac Sarria, que finalmente se adoptó en cumplimiento de la promesa hecha por el presidente Marco Fidel Suárez a los habitantes de Timbío.

El puente diseñado por Sarria constaba de un arco central rebajado de 5,4 metros de luz, una flecha de 1,35 metros (es decir, $\frac{1}{4}$ de la luz) y un espesor en la clave de 52 centímetros. El peso total era 11 toneladas. Los dos arcos laterales eran iguales entre sí, tenían una luz de 5 metros, una flecha de 1,25 metros, un espesor en la clave de 55 centímetros y un peso de 11 toneladas cada uno. El arco central salvaba la quebrada y los arcos laterales nivelaban la vía. Según la memoria de cálculo, aun conservada, Isaac Sarria había seguido las instrucciones contenidas en un tratado atribuido a Ernest Aragon, titulado *Ponts et ouvrages en maçonnerie*¹⁰⁸. El valor total de las obras se estimaba en \$11.011 conforme al presupuesto resumido en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Costos estimados para la construcción del puente de arcos sobre la quebrada Chambio según Isaac Sarria.

ITEM	COSTO TOTAL	%
62400 ladrillos	2184	19,83
3120 arrobas de cal	2340	21,25
1248 cargas de arena	748	6,79
2000 cargas de piedra	900	8,17
Andamiaje y cerchas	237	2,15
Mano de obra	3601	32,70
Imprevistos	1001	9,09
TOTAL	11011	100

En esta tabla se puede hacer una lectura en varios niveles, si se compara con el presupuesto de Serafín Barbetti para la construcción del puente sobre el río Amaime 42 años antes, y el de Benigno Valencia para el puente de Chambio un año atrás, teniendo en cuenta solo los factores comunes¹⁰⁹. Se destaca ante todo que la relación porcentual del costo de la mano de obra es muy bajo en la propuesta de Valencia (17,94%), en tanto

¹⁰⁸ Aragón (1909).

¹⁰⁹ Materiales (ladrillo, cal, piedra para cimientos, arena y madera para cerchas), mano de obra, e imprevistos.

que entre los presupuestos de Sarria (32,7%) y Barbetti (34,85%) existe una gran similitud, siendo estos dos últimos más creíbles y evidenciando un relativo estancamiento en las condiciones sociales de los albañiles de la región.

Cosa distinta ocurre al valor relativo de los materiales: mientras que el del ladrillo mantiene semejanzas en los presupuestos de 1921 (21,94% según Valencia y 19,83% según Sarria), en el estimado de Barbetti, de 1879, este se presenta muy elevado (34,14%). El costo proporcional de la cal también es irregular: similares valores en las propuestas de Valencia (13,53%) y Barbetti (14,94%) contra la de Sarria (21,25%). Si se compara el valor unitario de la cal y el cemento en 1921 (solamente tenido en cuenta en la propuesta de Valencia), podemos concluir que el valor de la primera era 6,11 veces el del material importado. La arena mantiene un valor porcentual alto en las propuestas de 1921 (7,55% según Valencia y 6,79% según Sarria) contra la del Amaime (3,56%). Así mismo, el costo relativo de las maderas para andamios y cerchas no experimenta incrementos notables (2,56% en Amaime, 2,21% según Valencia y 2,15% según Sarria). Singular también es que pese a contar con mayor tecnificación en 1921, el valor relativo de sus imprevistos (9,09% en ambos casos) se mantenga en niveles superiores a los de 1879 (5,68%).

En un informe de 1921, el secretario de Gobierno del Cauca informaba de la siguiente manera sobre el avance de las obras sobre la quebrada de Chambio:

Por ser demasiado cenagoso el punto donde se está construyendo el puente, hubo que profundizar lo suficiente para que las fundaciones quedaran sobre terreno firme. Estas fundaciones se construyeron de mampostería de piedra y tienen un volumen de 320 metros cúbicos, que con los 364,47 metros cúbicos de mampostería de ladrillo dan un volumen total de 684,47 metros cúbicos de mampostería en general... La arena se extrae con los mismos operarios del río Timbío, que corre a pocas cuadras de la obra ... Ya están contruidos los estribos y las pilas, a punto de voltear los arcos. Las cerchas también ya están hechas¹¹⁰.

Ante la sugerencia de hacer los arcos laterales a menor precio, el mismo informe expresaba:

No es posible sustituir los dos arcos en la forma o de la manera indicada por el Ingeniero Jefe, porque habría que desbaratar las pilas centrales para darles mayor espesor a fin de que pudieran resistir el empuje del

110 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1487, ff. 394 y 395.

arco central; porque si los dos viaductos se construyeran de piedra, esta cuesta mucho, porque hay que llevarla de largas distancias; si se hicieran de cemento armado saldría costando mucho más, y finalmente no es posible emplear en esto la madera, porque su precio es muy alto en ese lugar, porque habría que estarla reparando con frecuencia y porque la obra en conjunto presentaría un aspecto desagradable¹¹¹.

Pese al interés y el optimismo, desde junio de 1921 la obra fue suspendida por falta de fondos. En una sentida carta dirigida por el alcalde de Timbío, Guillermo Alegría, al Presidente de la República afirmaba:

Tengo el alto honor de informar a usted atenta y respetuosamente que el puente que se construye sobre el río Chambio en la vía Nacional, de cal y ladrillo, hace algunos meses que se suspendió la continuación de esa obra por falta de fondos nacionales y hasta hoy se deben dos planillas a los operarios... Además con la variante que se hizo poniendo un puente de madera sobre dicho río con las fuertes lluvias fue destruido y se ha formado un gran lodazal que no hay por donde pasar...¹¹²

A partir de esa fecha se encuentra un vacío documental que solo se puede llenar con el contenido de cartas e informes posteriores al mes de abril de 1927. Al parecer, la obra siguió inconclusa hasta julio de 1926 cuando se nombró al ingeniero Ernesto Ordóñez como administrador del camino entre Popayán y el río Mayo y, por tanto, encargado de la terminación del puente; como alarife se designó a Florentino Sarria, quien había estado frente a las obras del puente de Mondomo en 1904 y de quien se dijo:

El contratista es un albañil hábil en esta clase de construcciones y se ha asociado al señor Florentino Sarria quien también reúne condiciones de laboriosidad y competencia¹¹³.

Los problemas empezaron en septiembre de ese año cuando el gobernador de entonces, Carlos Vernaza, dirigió un oficio a Ordóñez reclamándole por su escasa presencia al frente de las obras a la vez que lamentaba el incumplimiento en los pagos a los proveedores de materiales de construcción. En enero del año siguiente se recibían quejas de los vecinos de Timbío que obligaban a enviar al ingeniero Reinaldo Caijao Wallis a la población con el fin de que rindiese un informe sobre el estado de las

111 *Ibid.*, f. 395.

112 *Ibid.*, f. 397.

113 ROC, 243, enero 20 de 1905.

obras, por lo que Vernaza le expresaba en carta fechada el 31 de enero de 1927:

*Creen algunos timbianos que a dicho puente le falta consistencia para resistir el tráfico, y como Ud. podría prestarnos sus servicios en el caso, le ruego hacerlo, informarme si encuentra bien ejecutados los trabajos y suficiente la resistencia del puente...*¹¹⁴

A lo que Cajiao Wallis, quien en ese momento se desempeñaba como ingeniero del Ferrocarril del Pacífico, respondió el 6 de febrero siguiente:

*Soy de concepto que los arcos laterales del referido puente se deben demoler por inútiles, pues la luz central, cubierta por la plancha de concreto, es más que suficiente para dar paso a la quebrada en sus mayores crecientes. Con el material de estos arcos se podría reforzar los estribos de la plancha y construir los muros de ala para defender los terraplenes. Examinada la mezcla con que fue cogido el ladrillo en los estribos y en los arcos, la hallé, en su mayor parte, de muy mala clase y sin fraguado ninguno. Por esta razón, y aun cuando los estribos de la plancha tienen las dimensiones suficientes para resistir el empuje de los terraplenes, creo necesario el refuerzo de dichos estribos*¹¹⁵.

También el ingeniero José María Obando rindió un informe con conclusiones propositivas en el transcurso de ese mismo mes:

*Pero, como por lo pronto, lo importante es utilizar lo posible, estimo como solución más conveniente la siguiente: conservar la plancha central, que aunque con defectos de construcción, puede prestar servicio; demoler los dos arcos extremos, que está al caerse y que son absolutamente inútiles; con parte de los materiales reforzar, por detrás, las dos pilas centrales sobre las que gravita la plancha, y construir los cuatro muros de ala para sostener los terraplenes*¹¹⁶.

En remplazo del arco central de albañilería, el ingeniero Ordóñez había dispuesto una pesada plancha de hormigón con el fin de optimizar los recursos disponibles y economizar tiempo, frente a lo cual la estructura, como sistema, era completamente inútil. Finalmente, como medida para salvar el puente se resolvió conservar la placa de cemento armado por

114 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1488, ff. 108 y ss.

115 *Ibid.*, f. 114.

116 *Ibid.*, f. 116.

ser más económica y estar más de acuerdo con el sistema moderno de puentes y pontones.



Figura 3.27 Puente sobre la quebrada de Chambio (1927).
Foto: J. Galindo (2006).

Con el fin de aclarar el hecho y buscar un responsable distinto a la Gobernación misma, el Gobernador del Cauca solicitó al alcalde de Timbío, el 17 de febrero de 1927, la apertura de un expediente y la citación de testigos con el fin de que rindiesen detalles del desarrollo de las obras a cargo de Ordóñez. A este se le imputaba no haber examinado los cimientos antiguos sobre los cuales se construyeron los arcos, a lo cual el ingeniero respondió:

El Sr. Gobernador del Departamento contrató al alarife Sr. Florentino Sarria para que reanudara los trabajos del puente de Chambio, del cual existían los cimientos hasta cierta altura, sobre el suelo. Como el Sr. Sarria ha construido casi todos los puentes del Departamento, es reputado como el más hábil alarife, y él era quien había estado en 1920 al frente de la obra y levantado las estribaciones existentes. Por tanto, era inoficioso practicar pozos de examen y creo que ningún ingeniero los hubiera practicado¹¹⁷.

117 *Ibid.*, f. 109.

Ante el mismo tema, Sarria se defendía con los siguientes argumentos:

*Sí examiné minuciosamente los cimientos antiguos y sobre los cuales se construían los arcos del puente, arcos que terminé con todas las reglas del caso y cuyos cimientos tienen tres metros de profundidad, es decir, hasta donde se encontró terreno firme. Aclaro que en la construcción del cimiento del lado sur, intervino el Sr. Celso Perafán, entregándome lo a flor de agua. Los cimientos fueron construidos con dos hiladas de piedra y ladrillo macizo, con mezcla de cal, quedando muy consistentes... Recuerdo que cuando me hice cargo de la obra las cerchas estaban hechas y el ingeniero Ordóñez me ordenó que sobre estas se construyeran los arcos. En cuanto a los materiales empleados, certifico que la arena es de muy buena calidad, que se lavó bien y que la cal empleada fue la del Troje y recién preparada; el ladrillo apenas de regular calidad y de diferentes tamaños, pero sí me esmeré en que los arcos fueran construidos con ladrillo hecho en la misma gabela...*¹¹⁸

En cuanto a las causas del desastre, en opinión del ingeniero Ordóñez, podían explicarse por la mala calidad de los materiales degradados por el mal clima al que estuvieron expuestos durante años y a la falta de solidez de los cimientos:

*...dos causas actuaron simultáneamente en las agrietaduras que determinaron la supresión de los arcos; la descomposición completa del mortero, originada por las lluvias y otras causas, pues por muestras que hice extraer hasta el interior de los arcos se pudo demostrar su ninguna adherencia; la segunda causa, creo fue debida a lo que cedieron los cimientos que seguramente fueron faltos de piedra por encontrarse este material solamente a más de una legua de distancia...*¹¹⁹

Lo cual difería del concepto del alarife Sarria:

En mi concepto, una sola causa ocasionó las agrietaduras que determinaron la supresión de los arcos, porque la plancha de cemento armado quedó construida a una altura superior al arranque o imposta de los arcos. Además el plano fue calculado para un puente de tres arcos y así se calculó el grueso de los pilones, por el Sr. Ingeniero y no para una

¹¹⁸ *Ibid.*, ff. 111-112.

¹¹⁹ *Ibid.*, f. 110.

plancha de cemento armado, como lo dispuso este y el mismo Gobernador¹²⁰.

El hormigón armado irrumpía entonces con fuerza y dejaba por el piso no solo las bases del puente de Chambio, sino la tradición que se había forjado durante años en torno a los puentes de arco, convirtiéndolos en estructuras anacrónicas o sueños de papel. Así ocurriría con el ambicioso proyecto que presentaron en 1923 el ingeniero civil Segundo Federico Montenegro y el constructor-albañil Federico Montenegro, hijo y padre respectivamente, vinculados ambos al oficio pero con profesiones distintas, para salvar el cruce del río Guáitara, en el camino entre Tumaco y Pasto, el cual

*...será construido en su totalidad de cal y piedra, esta última será de la que se halla en las inmediaciones del lugar donde va a construirse la obra, y la cal de la mejor calidad que haya en la plaza ... las dovelas de los arcos serán muy bien labradas; los paramentos se harán de piedra sillar y los rellenos con piedra bruta y la misma mezcla de cal, como enseñan los principios de la ciencia y la economía ... la mezcla que ha de emplearse se compondrá de una parte de cal por dos de arena ... las tres bóvedas principales llevarán en el extradós un revestimiento de dos y medio centímetros de espesor de una mezcla formada por una parte de cemento por una y media de arena...*¹²¹

A juicio del Ministerio de Obras Públicas, este proyecto carecía de planos completos y no estaba acompañado del gráfico de estabilidad según lo prescriben los reglamentos vigentes. Además,

Según se ve en uno de los dibujos los estribos no tienen talud en el sentido del eje de la bóveda; para el de la orilla izquierda del río, dada su altura superior a 40 metros, el peso del arco, el relleno y piso del puente y la carga viva, la carga por metro cuadrado en la base será de 106 toneladas por metro cuadrado, valor que es excesivo; para disminuirlo habría necesidad de aumentar el área de la base y por lo tanto el volumen y el costo¹²².

120 *Ibid.*, f. 111.

121 AGN: Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1557, ff. 145-146.

122 *Ibid.*, f. 120.

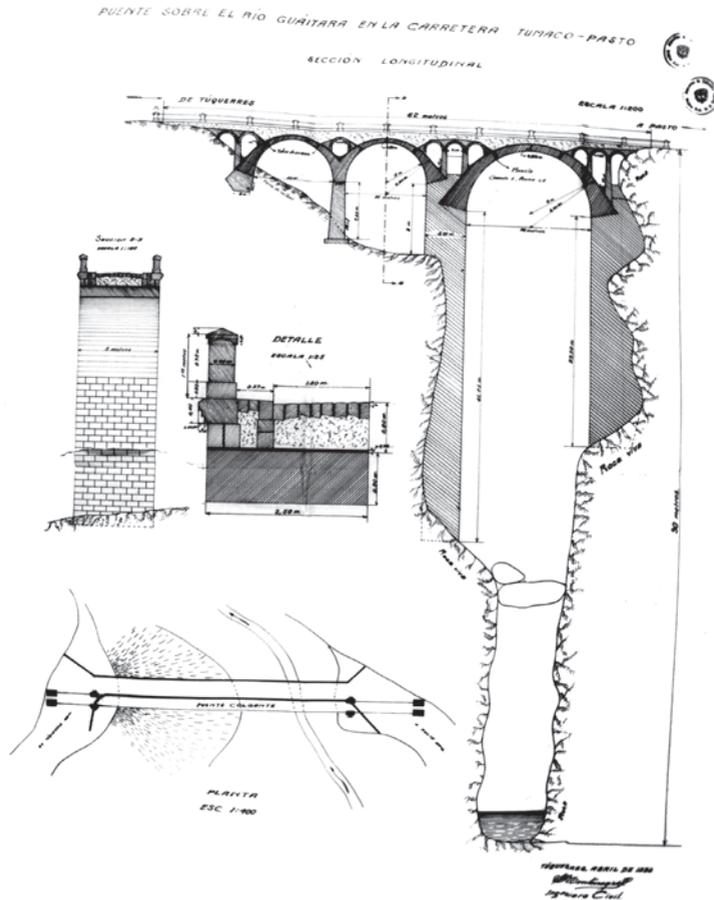


Figura 3.28 Proyecto del puente sobre el río Guaitara, por S.F. Montenegro y F. Montenegro (1923).
Fuente: AGN, Fondo Ministerio de Obras Públicas, t. 1557, f. 152.

El proyecto seleccionado finalmente, a cargo del ingeniero Manuel María Bucheli¹²³, aprovechaba una estructura metálica de puente rígido tipo Carnegie, contaba con cálculos estructurales adecuados y un costo relativamente bajo. Las leyes de la mecánica habían ganado el pulso a la fuerza de la tradición.

¹²³ El ingeniero Manuel María Bucheli (1895-1933) era hijo de Medardo Bucheli, quien había participado en las reparaciones del puente de Juanambú en 1890. Cursó estudios de ingeniería en Bélgica, aunque obtendría su título de ingeniero en la Escuela de Minas de Medellín. Murió trágicamente en un accidente estando al frente de las carreteras del Departamento de Nariño.

CAPÍTULO 4

Cómo se comportan los puentes de arco

En apariencia, un puente de arco es una estructura cuyo comportamiento se puede explicar de manera bastante sencilla. Muestra de ello son las aproximaciones científicas del siglo XVIII que buscaban reducir el hecho real a un modelo semejante al de una máquina simple aplicando ecuaciones algebraicas conducentes a valores más o menos fijos capaces de orientar las decisiones respecto a las dimensiones de los elementos que entonces se consideraban los más significativos del puente: el espesor de los arcos y el tamaño de las pilas. Se trataba de construir un método que formara parte integral de la fase del proyecto con miras a garantizar el control del artefacto durante su proceso de construcción, darle estabilidad una vez en servicio y, por supuesto, asegurar su durabilidad.

Hoy el análisis del comportamiento estructural de edificios históricos se orienta en un sentido inverso. Por una parte, se pretende establecer el valor de la carga última que puede llegar a soportar un puente con miras a determinar su grado de utilidad; por la otra, se busca conocer el mayor número de razones que dan cuenta de su condición actual con el fin de conservarlo en las mejores condiciones posibles y, de ser necesario, tomar los correctivos para hacerlos más durables en el tiempo y, por tanto, en la memoria de aquellos a quienes pertenece.

En cualquier caso, el análisis de estructuras antiguas es una tarea compleja: además de tener en cuenta que el comportamiento mecánico de sus materiales constitutivos no está suficientemente estudiado (al

menos en nuestro medio), este no siempre es fácilmente generalizable y es casi imposible emplear normas estándar como patrón de referencia. A esto se suma la enorme varianza de las técnicas de construcción empleadas, las alteraciones que con el paso del tiempo sufren los materiales, las dificultades implícitas en la imposibilidad de ver la estructura interior de los edificios sin tener que apelar a pruebas altamente destructivas, y el desconocimiento de las condiciones de carga y reparaciones efectuadas a lo largo de su vida útil, entre otras.

Sin embargo, las crecientes necesidades invocadas por labores de rehabilitación y conservación en puentes europeos y particularmente británicos, en especial durante la segunda mitad del siglo XX, obligaron a desarrollar varios métodos de análisis estructural¹, apoyándose en sus comienzos en técnicas que combinaban la inspección visual con el análisis elástico. Fue este el caso del llamado método MEXE², ideado en el Reino Unido entre 1950 y 1960 a partir de las ecuaciones de A.J.S. Pippard³, que modelizaban el arco como una estructura elástica lineal articulada en los estribos. Según Clemente (s.a., 4), *el método consiste en un nomograma que relaciona las cargas admisibles con las dimensiones del puente (luz del arco y profundidad total del relleno y dovelas del arco en la clave). Para un arco de dimensiones dadas, la carga axial provisional obtenida directamente del nomograma se afecta por una serie de coeficientes de ponderación, que dependen de relaciones geométricas entre dimensiones del arco, la estimación de la calidad del material de la rosca y el relleno, del ancho, espesor y estado del mortero de las juntas y de un coeficiente del estado general del puente. El método MEXE está sometido a una serie de coeficientes excesivamente subjetivos, no obstante proporciona valores conservadores y es sencillo y comúnmente utilizado.*

Más reciente fue la aparición de la técnica de análisis propuesta por Heyman (1982), conocida con el nombre de *Método del mecanismo de colapso*, en la que se asume que la fábrica se comporta como un material perfectamente elástico a tracción y totalmente rígido a compresión y corte, con desplazamientos siempre muy pequeños en cualquiera de los sentidos. En este método, el arco se entiende como una estructura llevada al borde del colapso bajo una carga axial simple, localizada sobre la superficie de rodamiento en un sitio próximo a $\frac{1}{4}$ de la luz del arco. La

- 1 Una revisión de los métodos de análisis y valoración empleados en la estimación de la resistencia última de puentes de arco fue realizada por Hughes & Blackler (1997).
- 2 MEXE (1963). Nombre dado por las siglas en inglés de Military Engineering Experimental Establishment.
- 3 A. Pippard había publicado en 1948 un artículo titulado "The approximate estimation of safe loads on masonry bridges" en la revista *Civil Engineer in War*, en el que exponía las bases del MEXE.

posición de las cuatro rótulas es reiteradamente desplazada con el fin de buscar la carga mínima de colapso siempre que se mantenga la línea de empujes dentro del espesor de la rosca⁴.

La figura 4.1 muestra un arco en su estado límite. Ante la carga se han formado las rótulas en los puntos A, B, C y D, quedando la tarea de descubrir las tres incógnitas: el valor de la carga de colapso y el valor de las reacciones verticales y horizontales en los apoyos.

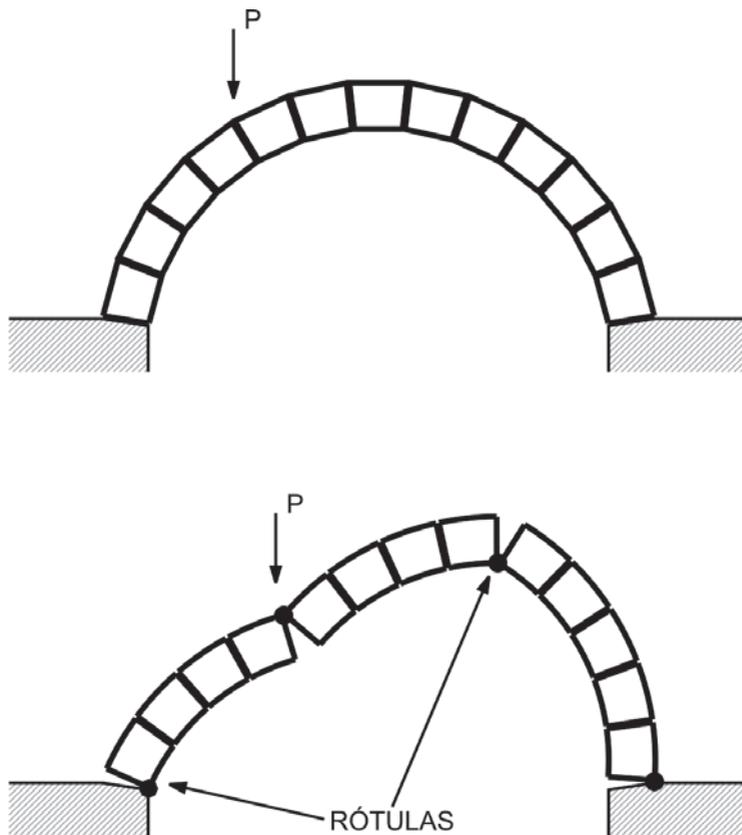


Figura 4.1 Formación de rótulas según el método del mecanismo. Dibujo: E. Sotelo (2007).

En ambos métodos, la resistencia máxima del puente viene dada por la resistencia máxima de la(s) bóveda(s) de soporte haciendo caso omiso de los efectos que sobre el comportamiento de la estructura pueden ejercer los tímpanos, el relleno o la superficie de rodamiento.

⁴ Ford, Augarde & Tuxford (2003).

A partir de las consideraciones de Heyman, se desarrollaron algunos programas informáticos, destacándose los que estuvieron a cargo de la Universidad de Cardiff⁵ y el software comercial Archie-M⁶, los cuales lograron incorporar al método del mecanismo una mayor cantidad de variables que ayudan a la comprensión íntegra de la edificación⁷.

Debido al desarrollo de las tecnologías de la computación y, en consecuencia, de los métodos de análisis estructural, durante los últimos años del siglo XX muchas de sus rutinas clásicas fueron revaluadas, entrando a considerar tanto las propiedades no lineales de los materiales como la manera en que el relleno, por ejemplo, y otros componentes del conjunto, participaban de la estabilidad estructural. Entonces se incorporó el método de elementos finitos (MEF)⁸ en el examen de estructuras de mampostería integrando sus diferentes componentes y todos los modos de fallo posibles. Su aplicación parte de la construcción de un modelo virtual tridimensional, discretizado en un número finito de unidades de acuerdo con los objetivos del análisis. Las diferentes partes de la estructura se definen conforme a aspectos como dimensiones geométricas, cargas que actúan sobre ellas y niveles de restricción de sus grados de movimiento, principalmente. El objetivo general del proceso de modelación es permitir la observación del comportamiento de la integridad de la estructura o de algunas de sus partes específicas en condiciones particulares de carga o alteraciones dinámicas.

Sin embargo, cualquiera que sea el método de análisis estructural, la observación directa de los puentes edificados constituye una premisa esencial en la aplicación del método científico. La descripción y el análisis del estado actual de una edificación y de sus patologías detectables a simple vista facilita y completa la comprensión de sus condiciones mecánicas, puesto que permite apreciar, sobre el mejor de los modelos que será siempre el edificio mismo, las condiciones a las que se encuentra sometido no solo por factores de carga, sino también por otros de tipo ambiental y humano. Requisito fundamental es para la comprensión total de la edificación, la caracterización muy precisa de las propiedades de todos los materiales que, en el caso de los puentes de arco, se limitan a solo dos: la mampostería y el material de relleno. El primero se compone a su vez de los ladrillos y el mortero de pega.

5 Hughes, Hee & Soms (2002).

6 Ver <http://www.obvis.com>

7 También es importante mencionar en este campo los aportes de Gilbert & Melbourne (1994) y, más recientemente, de Block (2003).

8 Según Clemente (s.a.), los primeros en introducir el MEF como método de análisis de obras de fábrica fueron Towler (1985) y Crisfield (1985).

A continuación se describirá el proceso seguido en esta línea de acción sobre los puentes que constituyen el conjunto edificado en la región del alto Cauca: se hará una breve descripción de las patologías que con mayor frecuencia se advierten en puentes de arco de ladrillo; después se explicará cómo se llevó a cabo la tarea de caracterizar física y mecánicamente sus materiales constitutivos haciendo particular énfasis en el suelo de relleno, dada la escasa bibliografía que sobre el tema existe en nuestro medio; finalmente, a partir de los datos obtenidos, se dará cuenta de los resultados obtenidos a partir del análisis estructural de uno de los puentes objeto de estudio haciendo uso del método de elementos finitos mediante un programa informático de uso comercial. El objetivo principal de este análisis (del tipo estructural elástico) es el de conocer las tensiones y desplazamientos en algunos puntos de la estructura para luego comparar sus magnitudes con las de los esfuerzos admisibles obtenidos en ensayos de laboratorio.

De las patologías más comunes en los puentes de albañilería

El paso de los años ha dejado su huella sobre la totalidad de los puentes estudiados que todavía se conservan en la región del alto Cauca. En muchos son comunes desgastes superficiales de sus partes, así como daños más severos producidos por el trasiego y las condiciones ambientales, incluso, lo que es peor, afecciones en su estabilidad producidas por intervenciones que, aunque bien intencionadas, no han sido capaces de minimizar su riesgo ante el colapso. La rápida mirada a sus patologías más notables⁹ permite identificar no solo su grado de conservación, sino también intuir cuáles son los factores externos e internos que más les afectan y dónde se sitúan las zonas más vulnerables de su entramado estructural.

Es probable que el problema más extendido en los puentes estudiados sea la infraexcavación producida en la base de las pilas y los estribos, la cual tiene su explicación en un proceso de erosión provocado por la filtración de agua que horada y arrastra su lecho, tornándose en ocasiones en un fenómeno complejo en extremo, como resultado de la combinación de factores de naturaleza hidráulica y geotécnica. Además, se trata de un

⁹ En este análisis ha sido importante la colaboración de la estudiante de arquitectura Carolina Osorio, quien elaboró en calidad de trabajo de fin de carrera un breve informe sobre el estado patológico de algunos de los puentes de arco en la región del alto Cauca. Su trabajo se apoyó en la metodología expuesta por Martins (2004).

hecho no siempre fácil de detectar, ya que su intensidad aumenta con el incremento del caudal que dificulta el acceso visual a las fundaciones y hace que las cavidades formadas se rellenen con material aluvial de baja capacidad de carga. Según Hunt (2003), la infraexcavación se caracteriza por tres componentes: 1. la degradación del lecho del río a largo plazo en la zona de implantación de la obra; 2. la infraexcavación generalizada en una sección del puente, y 3. la infraexcavación local junto a los pilares. La infraexcavación total se produce por la conjugación simultánea de los tres componentes.

Un ejemplo local que ilustra el caso de la degradación del lecho del río se presenta bajo el puente de Güengüé, producida a lo largo de varios años, incluso décadas, por las modificaciones del caudal, causadas a su vez tanto por factores naturales presentados en su curso *aguas arriba* como por la intervención del hombre a través de desviaciones del río hacia cultivos situados en las haciendas de su entorno inmediato. También aquí se presenta un caso de infraexcavación generalizada, manifiesta por modificaciones en las condiciones del curso natural de las líneas de agua a raíz de la alteración de la geometría de la sección del caudal por inclusión reciente de obras de hormigón armado para el uso de bañistas y obras de derivación.



Figura 4.2
Degradación del lecho del río e infraexcavación generalizada en el puente sobre el río Güengüé.
Foto: J. Galindo (2007).

En el puente de Buga es notable el fenómeno de infraexcavación local en la base de los pilares, caracterizado por remoción del material de fundación a causa de la perturbación del flujo de agua, lo que lleva a su aceleración descendente sobre la cara de las bases mediante la formación de vórtices o pequeños remolinos que se extienden en su longitud. A medida que la cavidad de erosión aumenta, la intensidad de los vórtices va disminuyendo, reduciendo a su vez la capacidad de transporte del material del lecho hasta llegar a una situación de aparente equilibrio: la profundidad de la cavidad alcanza un valor máximo para determinada velocidad, a partir de la cual cualquier aumento de velocidad no agrava el fenómeno de infraexcavación; sin embargo, la acción erosiva recae ahora de manera directa sobre las pilas, para lo cual no se habían concebido originalmente.



Figura 4.3
 Infraexcavación local
 en las bases del puente
 sobre el río Guadalajara,
 en Buga.
 Foto: J. Galindo (2007).

Fenómenos de esta naturaleza suelen dar origen a otra patología recurrente en puentes de albañilería: el movimiento de los apoyos, situación que en cualquier estructura hiperestática conduce a una necesaria redistribución de los esfuerzos, lo que a su vez se traduce en muchos casos en agrietamientos visibles o formación de rótulas plásticas no deseadas¹⁰. En el puente sobre el río Güengüé, por ejemplo, son hoy visibles este tipo de grietas entre las cabezas de los tajamares y la base de las pilas, las mismas que se han recalcado con pesadas obras de hormigón armado restringiendo cualquier posibilidad de desplazamiento y aportando una considerable carga muerta no deseada.

¹⁰ Sowden (1990).



Figura 4.4
Agrietamiento entre pilas y tajamares por movimiento de apoyos a causa de infraexcavación en el puente sobre el río Güengüé.
Foto: J. Galindo (2007).

Una situación similar ocurre en el puente sobre el río Cofre, donde la acusada infraexcavación en la base de uno de los estribos ha contribuido a que se produzca un giro de la totalidad de la estructura con los consecuentes agrietamientos a lo largo de los macizos laterales, desvirtuando el paralelismo original de los muros de los tímpanos. Estos agrietamientos –como en otros casos– también pueden ser causados por asentamientos diferenciales del suelo debido a la retracción de capas arcillosas subyacentes. Es muy común que este fenómeno se presentase durante los primeros años de vida útil del puente, lo que en general daba pie a soluciones inmediatas orientadas a subsanar las fisuraciones y, en algunos casos, recalzar las bases con obras de mampostería. Varios son los testimonios ya citados en que los constructores del siglo XIX se enfrentaban a situaciones de esta naturaleza.

Otra de las preocupaciones más sentidas durante la construcción de un puente de arco de ladrillo estuvo siempre relacionada con la impermeabilización de las superficies de rodamiento para proteger los materiales mampuestos y los rellenos de la acción del agua. Sabemos hoy que la saturación de humedad en el interior de la mampostería no solo contribuye a la degradación del ladrillo y los morteros, porque favorece la formación de capas de vegetación, sino que desintegra los componentes de estos últimos por lavado de los más finos e hincha los suelos de relleno afectando la estabilidad de la estructura. La infiltración del agua puede también dar origen a problemas relacionados con la aparición de eflores-



Figura 4.5
 Infraexcavación en uno de los estribos del puente sobre el río Cofre.
 Foto: J. Galindo (2007).

cencias, producto de la cristalización de sales solubles introducidas en el material por el agua atmosférica o absorbida desde el suelo.

Son comunes también las situaciones donde la superficie exterior de ladrillos y morteros presenta un deterioro pronunciado, como ocurre en el puente del Humilladero, en Popayán, y en los puentes de Ovejas, Timbío y Pescador, para citar solo algunos ejemplos.

Consecuencia directa de lo anterior son los daños en los tímpanos. En efecto, cuando la masa de tierra compactada que llena los senos del puente se satura de agua, ejerce una fuerza horizontal contra los muros laterales produciendo un esfuerzo que busca desplazarlos de su plano vertical. Las consecuencias han sido clasificadas por Gilbert (1993) de la siguiente manera: inclinación, hinchamiento, desplazamiento y desprendimiento.

En el primer caso, el tímpano permanece vinculado a las bóvedas del puente, pero se inclina generalmente hacia el exterior; en el segundo, la parte media del tímpano es expulsada hacia afuera conservándose paralelos el borde superior de los pretilos y el intradós de las bóvedas; en el tercero, se produce un movimiento completo del tímpano hacia el exterior, diferenciándose del plano de las bóvedas; en el cuarto, se presenta un desprendimiento del tímpano, arrastrando los arcos de borde con el consecuente agrietamiento de la estructura. Cualquiera de estas situaciones representa un serio peligro para el puente y exige una intervención inmediata, por lo general, de gran envergadura.



Figura 4.6
Meteorización de
ladrillos y morteros
en el puente del
Humilladero, en
Popayán.
Foto: J. Galindo (2007).

Este fenómeno se observa con claridad en el puente sobre el río Grande, en la población de Caloto, donde, además de los problemas de infraexcavación, es evidente la separación de los planos paralelos de los tímpanos por acción del empuje horizontal de los rellenos. Expresión de ello son las extensas grietas que discurren por el intradós de las bóvedas centrales a una distancia igual a la del espesor de los tímpanos y que ingenuamente han rellenado con una mezcla de hormigón simple.

Las principales causas de tales anomalías están asociadas al deficiente drenaje superficial y del relleno, al uso de materiales inapropiados en el mismo, al deficiente dimensionamiento del propio tímpano y a las cargas debidas al tráfico o elevación del pavimento.

Por último se debe señalar que el crecimiento de vegetación en la propia estructura puede ser causa de acciones mecánicas importantes a medida que van penetrando en las juntas y hendiduras, contribuyendo a acelerar la degradación de los materiales y, por tanto, de la estructura en su conjunto. Aunque la vegetación rastrera tiene pocos efectos nocivos, la que desarrolla raíces con poder de penetración por entre las juntas de la mampostería puede producir daños considerables a mediano plazo. En puentes como el de Quilcacé, por ejemplo, la capa de vegetación sobre pavimentos, estribos y tímpanos, además de mantener la estructura con un alto grado de humedad, representa en conjunto una carga adicional innecesaria. Situaciones similares se presentan en los puentes de Cofre, La Victoria, Pescador, Ovejas y Timbío.



Figura 4.7 Grietas longitudinales en el intradós de las bóvedas del puente de Caloto.

Foto: J. Galindo (2007).



Figura 4.8 Vegetación sobre el puente de Quilcacé.

Foto: J. Galindo (2007).

Cualquier planificación en aras de la conservación estructural requiere datos cualitativos obtenidos mediante la investigación histórica y datos basados en la observación directa de las degradaciones de los materiales y de los daños estructurales; sin embargo, también son necesarios datos cuantitativos basados en ensayos específicos y modelos matemáticos del tipo de los utilizados en la ingeniería moderna. Por tanto, es necesario explicar cómo se ha asumido el análisis de los materiales constitutivos de los puentes objeto de estudio y su aplicación, para validar las observaciones directas mediante un modelo numérico.

De las propiedades de los materiales constitutivos

A partir de la investigación bibliográfica, la documentación histórica y la inspección visual es posible concluir que cualquier puente de arco de ladrillo está constituido por dos materiales básicos: la mampostería y el material de relleno de los senos, es decir, de los espacios residuales situados entre las bóvedas, los tímpanos y el tablero de rodamiento. Así mismo, se sabe que la mampostería es un material compuesto por ladrillos de dimensiones más o menos fijas organizados conforme a determinada disposición geométrica, unidos entre sí por el mortero de pega, el cual está elaborado por una mezcla de arena y cal en proporciones que pueden variar notablemente debido a la calidad de ambas o simplemente como resultado de las tradiciones locales.

En cualquier caso y como norma general, estos materiales exhiben muy distintas propiedades mecánicas que dificultan la identificación de una ley única capaz de proveer una descripción global del comportamiento mecánico del conjunto. Por tanto, es necesario apelar a los principios de la teoría de la homogeneización de la mampostería, desarrollada y expuesta por varios autores¹¹, que aquí se asumirá sin entrar en explicaciones demasiado extensas. Además, la teoría de las estructuras de mampostería parte de considerar una serie de características especiales, propias de un material compuesto: alta heterogeneidad, alta resistencia a la compresión y bajísima resistencia a la tracción, y alto coeficiente de rozamiento.

El material de relleno sobre las bóvedas del puente está conformado habitualmente por una mezcla de suelo negro, piedra de canto rodado y cascajo (fragmentos de ladrillo). El relleno cumple un papel importante

11 Antoine (1995), Buhan & Felice (1997), Carbone & Codegone (2005), entre otros.

ya que afecta de modo significativo el comportamiento del conjunto por dos razones fundamentales: su peso propio colabora en la estabilidad estructural y su masa contribuye a distribuir las cargas concentradas sobre la superficie de rodamiento. Recientemente varios estudios han reevaluado el importante papel del material de relleno en la estabilidad de los puentes de arco¹².

La bibliografía disponible acerca de las propiedades mecánicas de esos materiales empleados en construcciones históricas en la región del alto Cauca era, hasta el comienzo de esta investigación, prácticamente inexistente. Esta situación condicionó que, de manera simultánea con la búsqueda documental e histórica, fuese necesario adelantar un conjunto de pruebas de laboratorio orientadas a obtener valores precisos relativos a los materiales empleados en los puentes de arco de ladrillo; estos datos a su vez eran necesarios para alimentar programas informáticos que habitualmente se emplean en la modelización y análisis por elementos finitos. A continuación se describe de manera más o menos detallada ese proceso experimental.

De los ladrillos

Los ladrillos son sin duda las piezas que mayor volumen ocupan en un puente de arco. Su uso se extiende a las obras de cimentación, las pilas, las bóvedas, los tímpanos; en algunos casos, incluso se usan como parte del pavimento. Su tamaño no obedece siempre a patrones fijos, aunque en la mayor parte de los casos estudiados las dimensiones estaban muy próximas a los 40 cm de largo, 20 cm de ancho y 10 cm de altura. Su materia prima es la tierra arcillosa, fácil de encontrar en casi toda la región del alto Cauca; su fabricación se llevaba a cabo de manera similar a como aún se hace en algunos sitios: mediante hornos artesanales alimentados con leña o carbón mineral.

Se destaca también que en algunos casos, debían fabricarse piezas especiales para el remate de los pasamanos, los salmeres de las bóvedas o las columnas que adornaban las pilas con aire republicano. Su uso se extendía también a otras obras de arquitectura, como se evidencia en la ciudad de Popayán o en las poblaciones de Caloto, Buga y Timbío, especialmente, cuyas más importantes obras civiles y religiosas muestran no solo una buena y cuidada manufactura, sino también similitudes en tamaño, consistencia, color y textura de las piezas mismas.

12 Royles & Hendry (1991), Ponniah & Prentice (1999), Bicanic, Stirling & Pearce (2002) y Cavicchi & Gambarotta (2005), entre otros.

Dado el elevado número de casos disponibles, se determinó que era pertinente extraer muestras en al menos tres de los puentes estudiados, siendo seleccionados el puente en Buga sobre el río Guadalajara, construido entre 1874 y 1900; el puente en Popayán sobre el río Cauca, en servicio desde 1769; y el puente sobre el río Güengüé, fechado alrededor de 1890. El criterio de esta selección fue contar con muestras propias de estructuras dispersas en el ámbito geográfico y cronológico propios de la investigación, que preferiblemente estuviesen aún en servicio, para en un futuro próximo desarrollar propuestas de intervención con fines de su conservación.



Figura 4.9 Extracción de núcleos en las bases de uno de los arcos del puente de Buga.

Foto: J. Galindo (2006).

En los casos señalados la toma de muestras se llevó a cabo con un taladro extractor por medio del cual se obtuvieron núcleos de 0,4 m de longitud y 0,051 m de diámetro. Adicionalmente, en los puentes de Cauca y Güengüé fue posible extraer manualmente piezas enteras de ladrillo situadas en los pretiles y aletas, con sus dimensiones reales, sin afectar la integridad de las estructuras. El tipo de muestras conseguidas y las pruebas aplicadas en ellas se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 número de especímenes y pruebas realizadas en cada uno de ellos

Puente	Muestras	Pruebas realizadas	
		Caracterización física	Compresión en frío
Buga	P 1 M 2	2 especímenes (cilindros)	2 especímenes (cilindros)
	P 1 M 3	2 especímenes (cilindros)	2 especímenes (cilindros)
	P 2 M 4	2 especímenes (cilindros)	2 especímenes (cilindros)
	P 2 M 5	1 especimen (cilindro)	1 especimen (cilindro)
	P 2 M 6	1 especimen (cilindro)	1 especimen (cilindro)
	S 1 M 1	1 especimen (cilindro)	1 especimen (cilindro)
Cauca	S 2 M 1	1 especimen (cilindro)	1 especimen (cilindro)
	S 4 M 1	2 especímenes (cubos)	3 especímenes (cubos)
	S 5 M 1	3 especímenes (cubos)	4 especímenes (cubos)
Güengüé	P 1 M 1	2 especímenes (cilindros)	2 especímenes (cilindros)
	P 1 M 2	2 especímenes (cilindros)	2 especímenes (cilindros)
	P 2 M 3	2 especímenes (cubos)	4 especímenes (cubos)
	P 3 M 1	2 especímenes (cubos)	3 especímenes (cubos)

Cilindros cortados de los núcleos con medidas aproximadas a los 51 mm en diámetro y altura
 Cubos cortados de los núcleos con medida aproximada de 51 mm en cada arista

De cada una de las muestras obtenidas *in situ* se cortaron especímenes para realizar en ellos una caracterización física encaminada a determinar su peso seco, suspendido y saturado, así como los cálculos correspondientes a volumen exterior, volumen de poros abiertos y cerrados, porosidad aparente, absorción de agua y gravedad específica aparente. El tamaño de los especímenes y los procedimientos siguieron las recomendaciones establecidas en la norma NTC-674, equivalente a la norma ASTM C20:00¹³.

Para determinar el valor del peso seco (D), los especímenes se sometieron primero a un periodo de secado durante 24 horas en horno a temperatura constante de 110 °C. Después, fueron sumergidos en agua y sometidos a ebullición por un periodo de 120 minutos para cuantificar su peso suspendido (S); por último se les sometió a un proceso de enfriamiento por inmersión en agua a temperatura ambiente durante 12 horas, previo al secado con paño para remover así todas las gotas de agua superficiales. Luego se estableció el peso saturado (W). Los resultados obtenidos aparecen consignados en la tabla 4.2, columnas 1-3.

Los valores correspondientes a volumen exterior (V), volumen de poros abiertos y cerrados, porosidad aparente (P), absorción de agua (A) y gravedad específica aparente (T) y densidad aparente (B) fueron obtenidos a partir de los datos tomados anteriormente y aplicados en las fór-

13 ASTM (2005).

Tabla 4.2 serie de datos obtenidos en la caracterización física de las muestras en ladrillo.

Puente	Muestra	Peso seco (D) (gr)	Peso suspendido (S) (gr)	Peso saturado (W) (gr)	Volumen exterior V _e (cm ³)	Volumen poros abiertos (cm ³)	Volumen poros cerrados (cm ³)	Porosidad aparente (P)	Absorción de agua (A)	Gravedad específica aparente (T)	Densidad aparente (B)	
Buga	P 1 M 2-1	115.9	73.9	157.6	83.7	41.7	42	49.8	36	2.76	1.38	
	P 1 M 2-2	129.3	81.9	158.3	76.4	29	47.4	38	22.4	2.73	1.69	
	P 1 M 3-1	129.6	84.4	165.9	81.5	36.3	45.2	44.5	28	2.87	1.59	
	P 1 M 3-2	137.6	86.9	166.6	79.7	29	50.7	36.4	21.1	2.71	1.73	
	P 2 M 4-1	127.5	81.9	156.8	74.9	29.3	45.6	39.1	23	2.8	1.7	
	P 2 M 4-2	127.2	81.1	154.9	73.8	27.7	46.1	37.5	21.8	2.76	1.72	
	P 2 M 5	131.8	82.1	156.3	74.2	24.5	49.7	33	18.6	2.65	1.78	
	P 2 M 6	126.4	73.7	142.8	69.1	16.4	52.7	23.7	13	2.4	1.83	
	S 1 M 1	120.6	75.3	150.7	75.4	30.1	45.3	39.9	25	2.66	1.6	
	S 2 M 1	115	69.4	145.9	76.5	30.9	45.6	40.4	26.9	2.52	1.5	
Cauca	S 4 M 1-1	219.4	133.4	277.2	143.8	57.8	86	40.2	26.3	2.55	1.53	
	S 4 M 1-2	235.2	143.4	293.7	150.3	58.5	91.8	39.9	24.9	2.56	1.56	
	S 5 M 1-1	189.4	115.1	238	122.9	48.6	74.3	39.5	25.7	2.55	1.54	
	S 5 M 1-2	193.4	117.7	242.6	124.9	49.2	75.7	39.4	25.4	2.55	1.55	
	S 5 M 1-3	196	119.2	246.5	127.3	50.5	76.8	39.7	25.8	2.55	1.54	
Güengüé	P 1 M 1-1	119.9	82.7	163.1	80.4	43.2	37.2	53.7	36	3.22	1.49	
	P 1 M 1-2	125.3	78.6	157.4	78.8	32.1	46.7	40.7	25.6	2.68	1.59	
	P 1 M 2-1	133.8	79.2	155.9	76.7	22.1	54.6	28.8	16.5	2.45	1.74	
	P 1 M 2-2	125.4	79.4	154.6	75.2	29.2	46	38.8	23.3	2.73	1.67	
	P 2 M 3-1	206.7	137.8	256.9	119.1	50.2	68.9	42.1	24.3	3	1.74	
	P 2 M 3-2	221.3	128.8	277.2	148.8	55.9	92.5	37.7	25.3	2.39	1.49	
	P 3 M 1-1	229.6	144.4	285.5	141.1	55.9	85.2	39.6	24.3	2.59	1.63	
	P 3 M 1-2	155.7	98.3	193.4	95.1	37.7	57.4	39.6	24.2	2.71	1.64	
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩

mulas contenidas en la norma NTC 674¹⁴. Los resultados de esta prueba aparecen consignados en la tabla 4.2, columnas 4-10.

A cada una de las muestras obtenidas se aplicó un conjunto de pruebas de laboratorio siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 682, equivalente a la norma ASTM C133/97¹⁵. Así se obtuvieron dos datos muy significativos: resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.



Figura 4.10 Núcleos obtenidos en el puente de Popayán sometidos a compresión.
Foto: M. Caicedo (2006).

14 Icontec (2002).

15 Icontec (2000).

La prueba de resistencia a la compresión en frío se realizó con un equipo especialmente diseñado para ello, cuyas lecturas se recogen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Resultados de la prueba de compresión en frío.

Puente	Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión en frío (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)
Buga	P 1 M 2-1	13.01	8.27	339,53
	P 1 M 2-2	11.91	7.58	309,16
	P 1 M 3-1	11.46	7.27	347.08
	P 1 M 3-2	8.34	5.24	303.97
	P 2 M 4-1	6.92	8.19	339.05
	P 2 M 4-2	12.60	7.94	319.89
	P 2 M 5	12.90	8.16	297.54
	P 2 M 6	9.68	6.20	183.36
Cauca	S 1 M 1	7.96	5.07	208.30
	S 2 M 1	7.89	4.94	96.58
	S 4 M 1-1	29.58	9.19	232.88
	S 4 M 1-2	19.57	6.04	144.66
	S 4 M 1-3	37.83	12.73	344.21
	S 5 M 1-1	6.92	2.78	87.48
	S 5 M 1-2	21.29	7.53	171.85
	S 5 M 1-3	10.88	4.14	89.67
S 5 M 1-4	30.89	11.49	308.06	
Güengüé	P 1 M 1-1	10.07	6.34	229.53
	P 1 M 1-2	8.67	5.53	280.80
	P 1 M 2-1	4.76	3.02	111.53
	P 1 M 2-2	8.96	5.77	201.16
	P 2 M 3-1	12.76	4.36	117.54
	P 2 M 3-2	8.51	3.00	118.67
	P 2 M 3-3	11.43	4.28	164.73
	P 2 M 3-4	7.40	2.78	112.85
	P 3 M 1-1	11.43	4.31	138.83
	P 3 M 1-2	10.88	4.66	161.54
P 3 M 1-3	10.81	3.5983	50.14	

De los morteros de cal

La cal es un mineral obtenido a partir de la piedra caliza, una roca sedimentaria porosa formada principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), cuyas propiedades han permitido al hombre emplearla en la construcción de edificios desde la antigüedad hasta nuestros días. La cal se fabrica poniendo piedras calizas en grandes hornos de muros de arcilla, como lo podemos apreciar hoy en los que se encuentran situados en el municipio de Vijes, entre las ciudades de Cali y Buga, donde son sometidas a un proceso de calcinación constante por un periodo de 8 a 12 días con una temperatura que oscila entre 850 °C y 900 °C, utilizando como combustible trozos de madera seca o carbón mineral. Cuando el proceso finaliza, la cal viva es molida o convertida en terrones y puesta en pozos de piedra donde se apaga con agua, produciendo una reacción química que la convierte en hidróxido cálcico.



Figura 4.11 Hornos de cal en la ciudad de Vijes.

Foto: J. Galindo (2007).

La cal resultante de este proceso se conoce como cal apagada por fusión y termina convirtiéndose en una pasta o polvo que se conserva cubierto por un tiempo prolongado necesario para su maduración. En este punto, el estado de la cal permite su mezcla con arena y agua para la elaboración de los morteros que, en contacto con el aire, hacen que la cal comience a fraguar y pierda el contenido de agua cristalizándose de la superficie hacia adentro, contrayéndose y endureciendo de manera lenta.

Estos morteros tienen un excelente comportamiento dentro de la estructura puesto que su porosidad permite que el núcleo se conserve húmedo; de allí sus propiedades elásticas.

En el curso de la investigación que apoya este libro, se obtuvieron muestras de mortero de cal del puente sobre el río Quilcacé con el fin de ser analizadas en el laboratorio de resistencia de materiales. De estas muestras, se cortaron tres especímenes en forma de cubo con dimensiones aproximadas de 28 mm en cada arista, que además se pesaron y midieron para determinar su volumen y peso unitario, los datos obtenidos se encuentran consignados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Muestras y número de especímenes y datos obtenidos a través de su peso y medidas.

Puente	Muestras	No especímenes	Peso seco (g)	Volumen (cm ³)	Peso unitario (g/ cm ³)
Quilcacé	M1	1	48.90	35.00	1.397
	M2	1	33.70	25.10	1.343
	M3	1	56.60	44.33	1.277

A cada uno de los tres especímenes se le aplicó una serie de pruebas en el laboratorio de materiales, siguiendo las recomendaciones de la NTC 682¹⁶, equivalente a la ASTM C133/97. Así se realizaron las pruebas de compresión en frío obteniéndose datos significativos de resistencia y módulo de elasticidad.

La prueba de resistencia a compresión en frío se realizó mediante el uso de una prensa multiusos sistematizada. Sus lecturas se encuentran registradas en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos en la prueba de Compresión en Frío.

Puente	Muestras	Carga máxima (N)	Resistencia a la compresión en frío (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)
Quilcacé	M1	751.06	0.57	14.16
	M2	176.12	0.26	33.34
	M3	293.45	0.21	6.19

¹⁶ Icontec (2000).



Figura 4.12 Muestras de los especímenes de mortero obtenidos del puente de Quilcacé.
Foto: M. Caicedo (2007).

Análisis de naturaleza físico-química también se realizaron sobre las muestras de mortero; sin embargo, sus resultados se salen de los alcances de este libro.

Del material de relleno

En términos generales, el material de relleno está compuesto por una matriz de suelo fino combinada con cantos redondeados de entre 10 y 15 centímetros de diámetro y trozos de *roca muerta* (nombre usado en la zona para el suelo residual) que tienen entre 2 y 3 centímetros de diámetro. Este material térreo cumple varias funciones, entre las cuales se cuenta servir en la nivelación de la superficie de rodadura o área de tránsito; igualmente, proporciona la carga confinante a los arcos para que estos desarrollen su resistencia estructural. En los puentes en que existe tráfico vehicular, el suelo de relleno disipa los esfuerzos producidos por las ruedas de los carros y los trasmite disminuidos al arco de ladrillo, elemento estructural que debe soportarlos y transmitirlos a la cimentación del puente.

Los arcos deben trabajar estructuralmente sometidos a esfuerzos de compresión, para lo cual necesitan la carga confinante del suelo. En el caso de no existir el material de relleno, un arco se asemejaría a una viga curva sometida a una serie de cargas puntuales y a su peso propio, lo cual –debido al modelo de deflexiones que ocurriría– generaría esfuerzos de

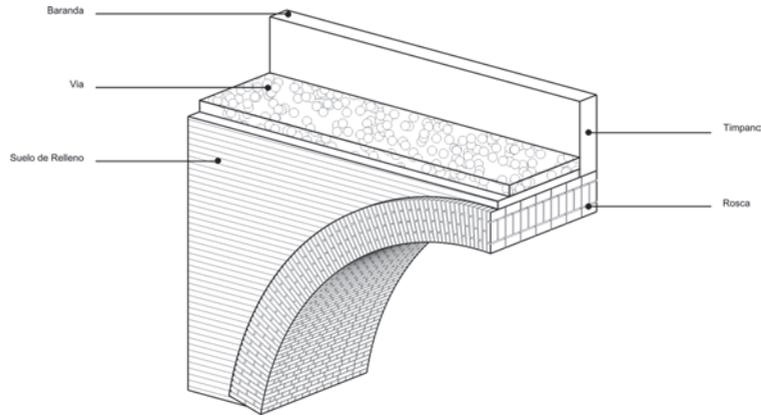


Figura 4.13 Sección típica de un puente de arco de ladrillo.
Dibujo: E. Sotelo (2007).

tensión excesivos, ya que el sitio del arco donde se aplique la carga puntual empezaría a descender mientras otros puntos subirían, iniciando el proceso de falla por la aparición de rótulas. El suelo de relleno impide que los puntos no cargados suban y, en consecuencia, evita que se desarrollen zonas de excesiva tensión; más aún, que se desarrollen rótulas en el arco, garantizando así la estabilidad estructural del puente en conjunto.

La teoría del esfuerzo límite establece que un arco falla cuando la línea de empujes está por fuera del espesor de la rosca del arco, mas no porque los materiales sean sometidos a su capacidad máxima. Así, si un arco sin confinamiento es sometido a una carga puntual, esta línea de empujes tiende a salir de la rosca, mientras que en un arco confinado, la línea de empujes tiende a estar en el interior de la rosca, aunque con mayores valores de esfuerzos. Entonces una carga puntual aplicada sobre la superficie se disipa y distribuye sobre la rosca, permitiendo que la línea de empujes se mantenga en el interior de la misma.

Con el fin de llevar a cabo la caracterización mecánica de al menos uno de los puentes objeto de estudio, se hicieron varios ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas e inalteradas obtenidas de dos apliques realizados en el puente sobre el río Quilcacé. Las muestras alteradas se tomaron para realizar ensayos de clasificación; las muestras inalteradas se tomaron para determinar los pesos unitarios del suelo y realizar ensayos de resistencia al esfuerzo cortante, específicamente el ensayo de corte directo.

Para la clasificación del suelo se hicieron cuatro pruebas de granulometría, las cuales se relacionan en la figura 4.15. Se observan tres curvas (M1, M1P2 y M3P2) relativamente juntas que representan la matriz fina del suelo y la curva M2P2 que representa la granulometría del suelo fino



Figura 4.14 Toma de muestras de suelo de relleno en el puente de Quilcacé.
Foto: J. A. Paredes (2007).

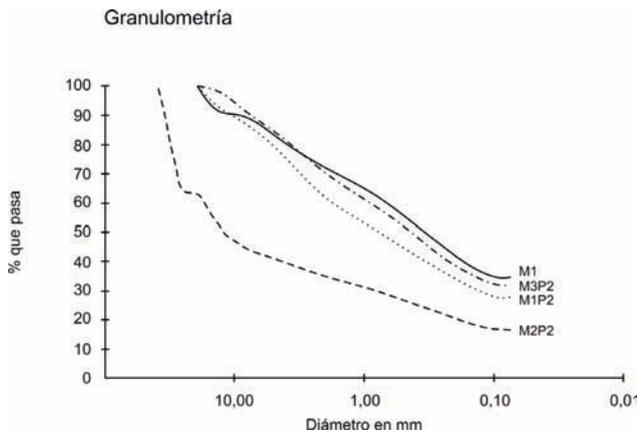


Figura 4.15 Granulometría correspondiente a la muestra obtenida en el puente de Quilcacé.
Fuente: Elaboración propia.

con los fragmentos de roca muerta. Esta diferenciación se hace ya que en el laboratorio fue necesario eliminar los fragmentos de roca muerta de la matriz fina y compactar el suelo de la matriz con el mismo peso unitario de campo. A este suelo se le realizó el ensayo de corte directo para determinar, con los resultados los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante: cohesión y ángulo de fricción interna, al igual que los parámetros elásticos necesarios para la modelación numérica de los puentes.

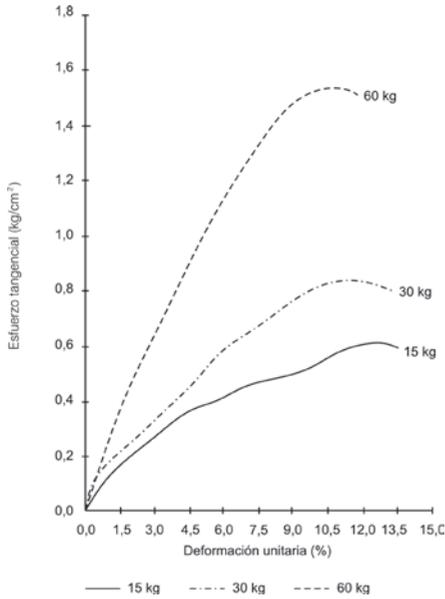


Figura 4.16 Deformación unitaria del material de relleno.
Fuente: Elaboración propia.

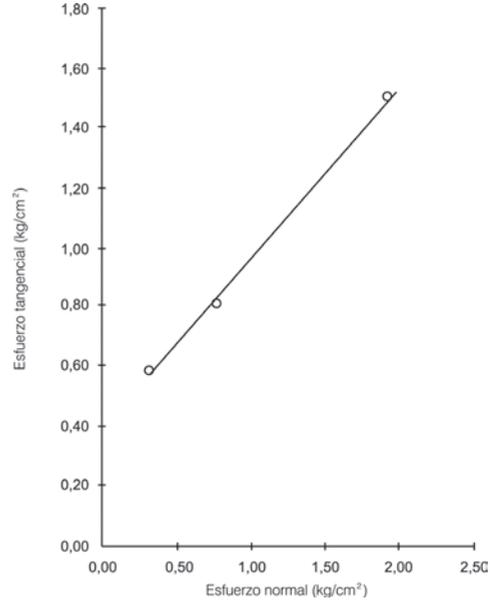


Figura 4.17 Esfuerzos normal y tangencial en el material de relleno.
Fuente: Elaboración propia.

En las figuras anteriores se muestran las curvas esfuerzo cortante versus deformación unitaria y esfuerzo normal versus esfuerzo cortante o envolvente de falla, a partir de las cuales fue posible determinar los siguientes valores:

Cohesión $C = 25 \text{ kPa}$

Ángulo de fricción interna $\varphi = 30^\circ$

En cuanto al comportamiento mecánico del suelo de relleno, es necesario mencionar que este genera los siguientes esfuerzos en los elementos del puente: en la rosca actúan una carga vertical debido al peso propio del suelo y una carga horizontal que se puede estimar como un empuje activo o pasivo según el punto de análisis; así, en los puntos en que la rosca empuja al suelo, este reaccionará con un empuje mayor o pasivo, mientras que en los puntos donde la rosca cede, el suelo disminuye el empuje hasta actuar con empuje activo. El valor de estas cargas se utiliza en el análisis estático de las roscas aplicando las teorías del análisis límite.

Para determinar las cargas verticales del suelo sobre la rosca es necesario determinar la geometría del puente y conocer el valor del peso unitario húmedo o de campo del suelo de relleno. En el caso de los puentes estudiados, la geometría se determinó mediante levantamientos topográficos y el valor del peso unitario de campo del suelo mediante las muestras inalteradas obtenidas en los apliques del puente sobre el río Quilcacé. Así, el valor del esfuerzo vertical efectivo es igual al peso de la columna de suelo que se encuentre en cada punto de la rosca (que a su vez resulta de la multiplicación del peso unitario húmedo por la altura de la columna de suelo). Considerando que el peso unitario se mantiene constante en todo el relleno, se tiene que el esfuerzo vertical varía con la profundidad, lo cual depende únicamente de la geometría de la rosca. En una rosca de medio punto, por ejemplo, se tiene la siguiente variación:

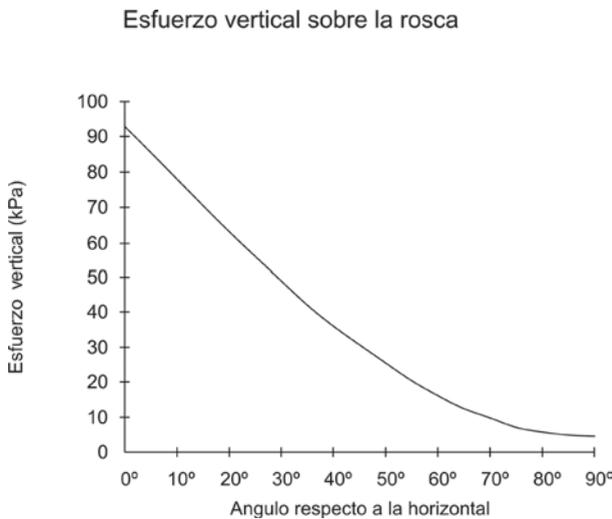


Figura 4.18 Relación entre el ángulo que se forma respecto a la horizontal y el esfuerzo vertical (kPa).

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.19 solo se dibuja la distribución de esfuerzos verticales en la mitad de la rosca, ya que la distribución es simétrica. Se aprecia que, en la clave del puente, el esfuerzo vertical será mínimo, aproximadamente 5 kPa, mientras que en los riñones del puente, el valor del esfuerzo vertical es aproximadamente 20 kPa. Como era de esperarse, el máximo esfuerzo vertical se genera en la base del puente con un valor de 93 kPa.

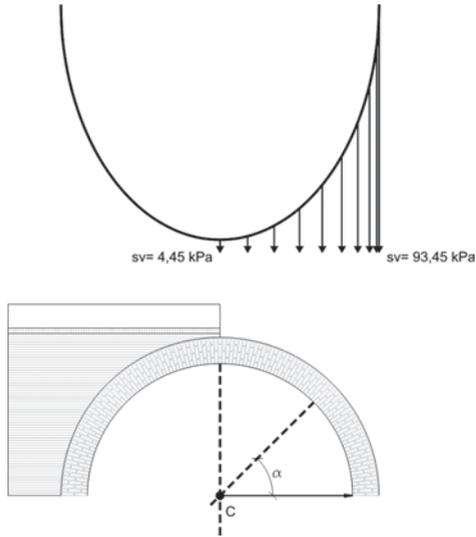


Figura 4.19 Distribución de esfuerzos verticales.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante observar que el esfuerzo vertical únicamente actúa de manera perpendicular a la rosca en la clave del puente, siendo allí un esfuerzo principal. En la base (donde es máximo), este esfuerzo actúa de modo tangencial. Justamente en este punto el esfuerzo horizontal tendrá mayor importancia, por lo cual se hace un análisis de la distribución de esfuerzos horizontales. Los esfuerzos horizontales en masas de suelo son directamente proporcionales al esfuerzo vertical, donde el factor de proporcionalidad está dado por el respectivo coeficiente de presión horizontal, que puede ser en reposo, activo o pasivo: K_0 , K_a o K_p , respectivamente.

Esfuerzo horizontal en la rosca

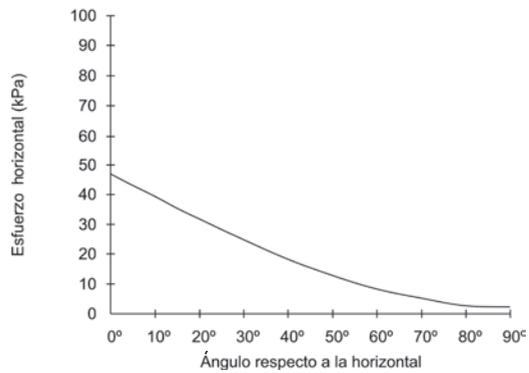


Figura 4.20 Relación entre el ángulo que se forma respecto a la horizontal y el esfuerzo horizontal (kPa).
Fuente: Elaboración propia.

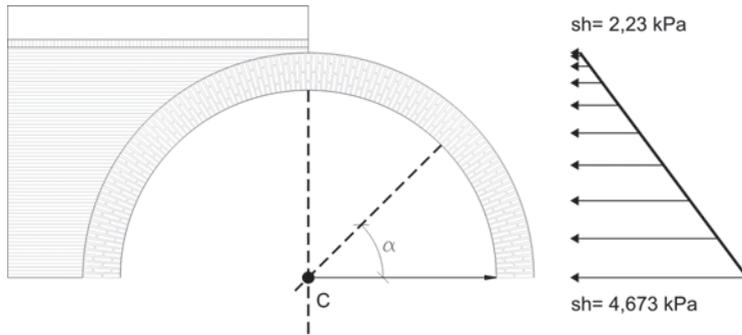


Figura 4.21 Distribución de esfuerzos horizontales.
Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar la variación de los esfuerzos horizontales, se grafica el esfuerzo horizontal de reposo en la rosca del arco considerando el coeficiente de presión horizontal en reposo, K_o , así:

$$k_o = 1 - \text{sen}\varphi \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde φ es el ángulo de fricción interna del suelo. Utilizando estos datos se obtiene la gráfica 4.20, en la cual se observa el mismo patrón de distribución de esfuerzos. En la clave, donde los esfuerzos horizontales son mínimos, es evidente que el esfuerzo neto es cero debido a la simetría (el suelo actúa contra el suelo); en la base, como ya se dijo, es el punto en que el esfuerzo horizontal máximo actúa perpendicularmente a la rosca.

Con estos valores, en cada punto de la rosca se obtiene un tensor de esfuerzos con el cual se pueden determinar el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en cada punto, así:

$$\vec{\sigma} = \underline{\sigma} \cdot \vec{n} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$\vec{\sigma}$: Vector de esfuerzos

$\underline{\sigma}$: Tensor de esfuerzos

\vec{n} : Vector normal a la rosca en el respectivo punto

donde el tensor de esfuerzos y el vector normal a la rosca quedarán definidos como

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 \\ 0 & \sigma_v \end{bmatrix}; \vec{n} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\alpha \\ \text{Sen}\alpha \end{bmatrix} \quad \text{Ecuaciones (3a) y (3b)}$$

Así, el vector de esfuerzos que actúa en el punto de la rosca que corresponde a los riñones (50°) será

$$\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} 12.64 & 0 \\ 0 & 25.27 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 50 \\ \sin 50 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.12 \\ 19.36 \end{bmatrix} \text{ kPa}$$

La descomposición de este vector de esfuerzos en las componentes normal y tangencial a la rosca en este punto será

$$|\sigma_n| = \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \text{ Magnitud del vector normal} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$|\sigma_n| = \begin{bmatrix} 8.12 \\ 19.36 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 50 \\ \sin 50 \end{bmatrix} = 20.05 \text{ kPa}$$

El esfuerzo cortante se calcula resolviendo el triángulo rectángulo, así:

$$|\vec{\sigma}|^2 = |\sigma_n|^2 + |\tau|^2 \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$|\tau| = 6.22 \text{ kPa}$$

Mediante este procedimiento se puede determinar el esfuerzo normal debido a las cargas aplicadas por el peso propio del suelo sobre la rosca, determinando la curva siguiente.

Esfuerzo normal en la rosca

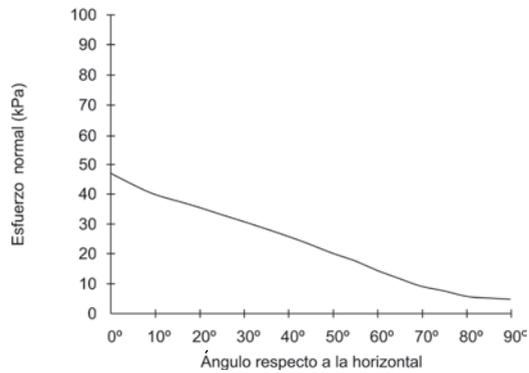


Figura 4.22 Relación entre el ángulo que se forma respecto a la horizontal y el esfuerzo normal (kPa).
Fuente: Elaboración propia.

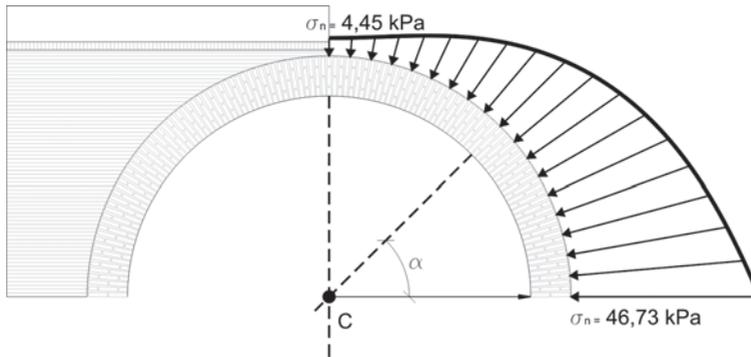


Figura 4.23
Distribución de esfuerzos normales sobre el intradós del arco.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los esfuerzos normales a la rosca, en la zona aledaña a los riñones, es mayor que el de los esfuerzos horizontales. Estos esfuerzos son los que confinan el arco.

El empuje horizontal en los tímpanos del puente actúa en dirección perpendicular al tímpano, y como el plano en el cual actúan es vertical, estos esfuerzos son normales al plano, por lo cual no se requiere hacer el análisis del caso de la rosca. Simplemente se determina que, al igual que en un muro, el diagrama de esfuerzos que sobre ellos actúan es triangular y seguirá dependiendo del espesor del relleno.

Como ya se dijo, el suelo de relleno disipa los esfuerzos aplicados en la superficie de circulación del puente y los trasmite a la rosca. El análisis de los esfuerzos aplicados en la rosca se puede hacer utilizando las fórmulas de Boussinesq¹⁷ para establecer el tensor de esfuerzos en cada punto de la rosca y, mediante este análisis tensorial, determinar la variación de los esfuerzos normales a la rosca en cada punto. Así, el tensor de esfuerzos debido a una carga puntual estará escrito como:

$$\Delta\sigma = \begin{bmatrix} \Delta\sigma_z & \Delta\tau_{zr} & 0 \\ \Delta\tau_{rz} & \Delta\sigma_r & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\sigma_\theta \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Al remplazar las expresiones de Boussinesq, se obtiene la matriz

¹⁷ Una explicación detallada de las teorías del matemático francés J. Boussinesq, desarrolladas en 1878, se explican en Davis & Selvadurai (1996).

$$\Delta\sigma = \begin{bmatrix} \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} & \frac{3Q}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} & 0 \\ \frac{3Q}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} & \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{3r^2z}{(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1-2\nu}{r^2+z^2+z(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right] & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Q}{2\pi}(1-2\nu) \left[\frac{z^2}{(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{r^2+z^2+z(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \end{bmatrix}$$

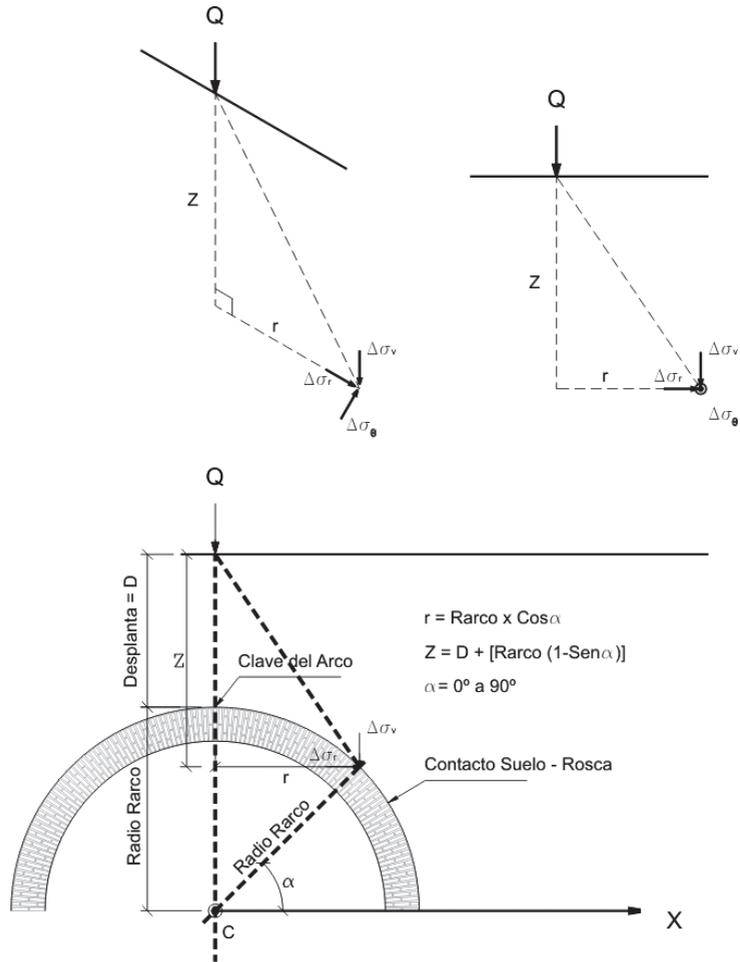


Figura 4.24 Esquema geométrico para la teoría de Boussinesq
 Fuente: Elaboración propia.

Así, al calcular el esfuerzo en diferentes puntos sobre la rosca del puente, debido a una carga móvil aplicada en la superficie, se tendrán unas líneas de influencia, como se muestra en las figuras 4.25, 4.26 y 4.27, en las cuales se dibuja una serie de curvas que representan el incremento del esfuerzo vertical. Dado que este cambia con la circulación de la carga desde el punto situado encima de la clave hacia un extremo del puente, se puede ver, por ejemplo en la curva de 30°, que en un punto A ubicado sobre la rosca a una distancia horizontal de 4,3 metros, desde la línea vertical que pasa por la clave, se presenta una variación del esfuerzo vertical de entre 0,21 Kpa cuando la carga Q está sobre la clave, de 5.38 kPa cuando la carga está a 4 metros de la clave y de 3,85 kPa cuando la carga Q está a 5,5 metros de distancia de la clave (aproximadamente 1,5 metros del punto de análisis). Esto permite concluir (como es lógico) que en los puntos del suelo ubicados en la línea de acción de la carga puntual aplicada en la superficie se desarrollará el mayor incremento de esfuerzo vertical. Así se explica la forma parabólica de las curvas de la figura.

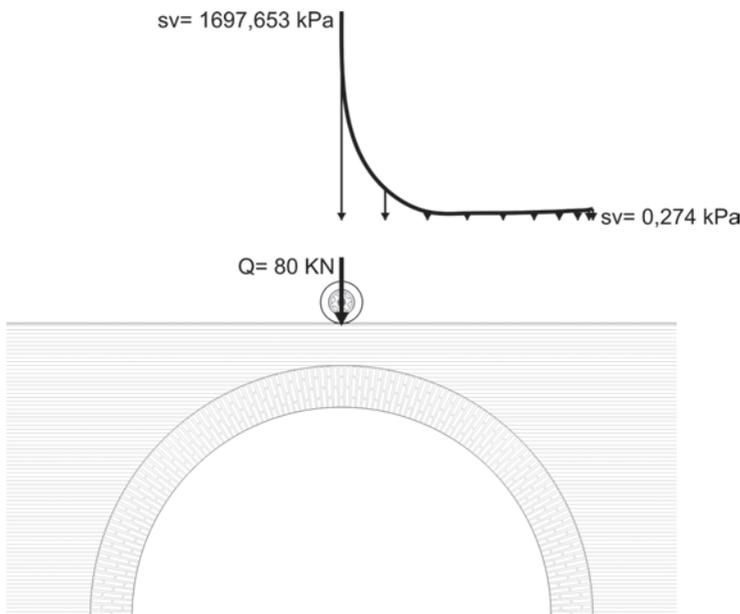


Figura 4.25 Distribución de esfuerzos sobre la clave.
Fuente: Elaboración propia.

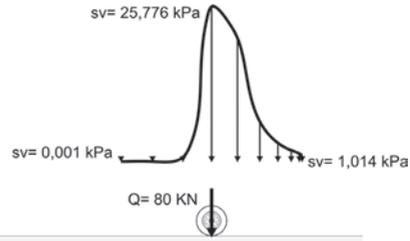


Figura 4.26 Distribución de esfuerzos aproximadamente a $\frac{1}{4}$ de la luz.
Fuente: Elaboración propia.

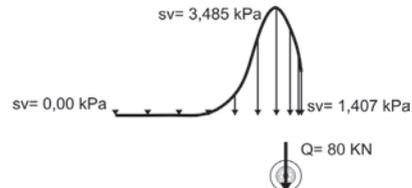
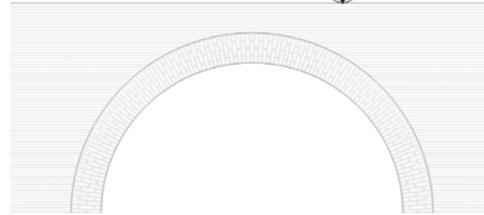
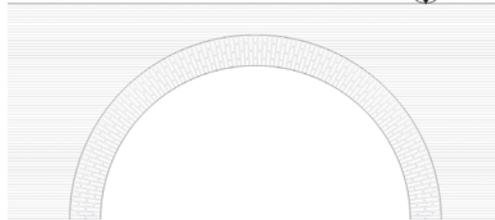


Figura 4.27 Distribución de esfuerzos cerca de los apoyos.
Fuente: Elaboración propia.



Igualmente los esfuerzos radiales, que según lo establecen las ecuaciones de Boussinesq y el modelo geométrico planteado, tienen un sentido horizontal y varían según la figura anterior. En la figura se observa que el esfuerzo radial aumenta a medida que la carga se aleja del punto de análisis (hasta aproximadamente 2 metros); cuando la carga se aleja más de esta distancia, la carga empieza a disminuir ya que empieza a perder influencia sobre el punto de análisis. Es decir, cuando la carga está sobre el punto de análisis, el esfuerzo radial es negativo, ya que se genera una tracción perpendicular a la línea de acción de la carga aplicada; a medida que la carga se aleja del punto de análisis, el esfuerzo radial pasa de tracción a compresión, debido a la disposición geométrica. Es pertinente recordar que en mecánica de suelos los esfuerzos de compresión son positivos, contrario a la convención que se tiene en mecánica de sólidos.

Lineas de influencia en diferentes puntos de la rosca

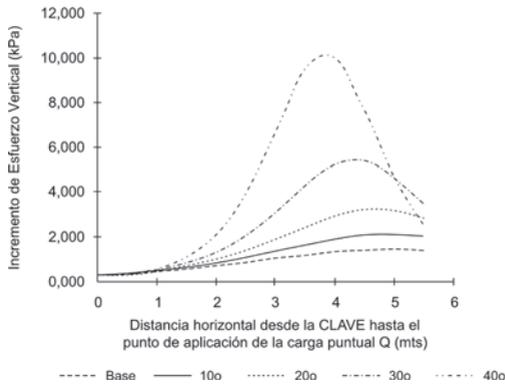


Figura 4.28 Líneas de influencia en diferentes puntos de la rosca (distancia horizontal desde la clave hasta el punto de aplicación de la carga).
Fuente: Elaboración propia.

Lineas de influencia en diferentes puntos de la rosca

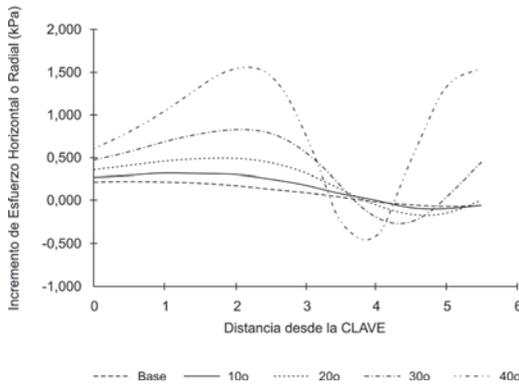


Figura 4.29 Líneas de influencia en diferentes puntos de la rosca (distancia desde la clave).
Fuente: Elaboración propia.

Por consideraciones propias del tipo de suelo, fue necesario remoldar el suelo para realizar el ensayo de corte directo a la matriz fina, la cual fue compactada con una densidad muy similar a la de campo. Así, con los resultados obtenidos de este ensayo, se calcularon los valores de las constantes elásticas del suelo módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson (ν) y los parámetros de resistencia mecánica, como cohesión (C), ángulo de fricción interna del suelo (φ) y el ángulo de dilatancia, necesarios para la modelación numérica del suelo en ANSYS © v.10¹⁸, en el que se emplea el modelo de Drucker-Prager.

18 ANSYS (1998).

La manera de determinar los parámetros elásticos a partir de los resultados del ensayo de corte directo sigue dos pasos, basados en teorías de mecánica de suelos y de la elasticidad: primero se determina el módulo cortante del suelo G a partir de la gráfica esfuerzo cortante τ versus deformación cortante y utilizando el módulo secante de cada nivel de confinamiento para establecer un rango de variación de G .

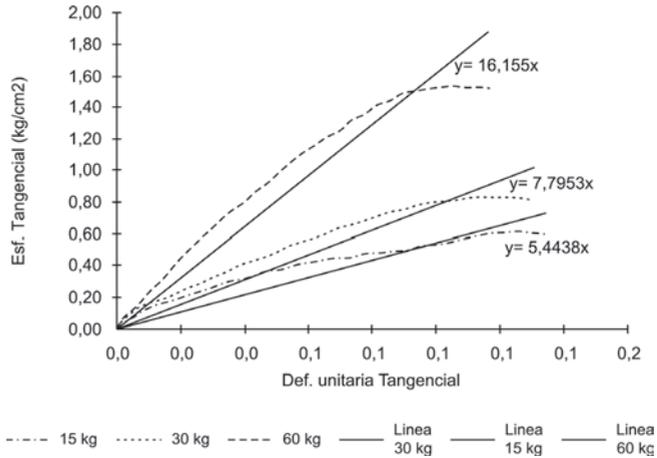


Figura 4.30 Deformación unitaria tangencial de la muestra del suelo de relleno.

Fuente: Elaboración propia.

En esta figura la pendiente de cada línea de tendencia representa el valor del módulo para cada nivel de confinamiento del ensayo. A partir de la relación elástica:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad \text{Ecuación (7)}$$

En la ecuación (7) se relacionan los esfuerzos principal menor y mayor con la relación de Poisson, que se debe conocer. Partiendo del principio que el esfuerzo geostático vertical y el empuje horizontal son esfuerzos principales, se puede plantear que

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad \text{Ecuación (8)}$$

y conociendo que

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = k_o \quad \text{Ecuación (9)}$$

Además, por los principios de la mecánica de suelos, a partir de la ecuación (1), donde el ángulo de fricción interna φ para el suelo ensayado es 30°, el valor de k_o es 0.5. Así, al igualar las ecuaciones (7), (8) y (9) se tiene:

$$\frac{\nu}{1 - \nu} = k_o = 0.5$$

De esta manera se determina que el valor del coeficiente de Poisson es 0,33. Finalmente, se determina el valor del módulo de elasticidad mediante la siguiente expresión elástica:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Es importante resaltar que en estas relaciones se utilizan los datos de resistencia al corte, propios del suelo, para determinar las propiedades elásticas. Los resultados obtenidos para este suelo en función del nivel de confinamientos están entre 2000 y 8500 kPa, valores que, comparados con bibliografía propia del ámbito de mecánica de suelos, están dentro de los propuestos para este tipo de suelos.

La tabla 4.6 resume los valores estimados para el material de relleno con fines a la modelización numérica.

Tabla 4.6 Resultados de la prueba de compresión en frío.

Cohesión	Ángulo de fricción interna	Ángulo de dilatación	Módulo de elasticidad	Coficiente de Poisson
25 kPa	30°	-0.5	8500 kPa	0.33

Caracterización estructural de un puente de arco usando MEF

Como se reseñó al inicio de este capítulo, los puentes de arco de ladrillo no son necesariamente estructuras tan sencillas como se pensaba en el siglo XVIII, sino que gozan de un grado de complejidad cuyo análisis de comportamiento necesita involucrar, cuando menos, la interacción entre la mampostería, el material de relleno, la superficie de rodamiento y el suelo de fundación, cada uno de los cuales puede responder de manera no lineal ante las cargas vivas y de peso propio. Además, como lo ha señalado Fanning & Boothby (2001), la forma estructural del puente –que incluye bóvedas y tímpanos– implica significativas respuestas tridimensionales cuyos efectos, si bien han sido notados, poco se han tenido en cuenta en la valoración global de este tipo de estructuras¹⁹.

Para elaborar un análisis mucho más preciso y completo de los puentes de arco parece necesario el uso de modelos tridimensionales basados en el método de elementos finitos que permiten considerar la geometría y las propiedades mecánicas de cada una de sus partes constitutivas con el fin de obtener un modelo numérico representativo²⁰. En el curso de la investigación que soporta este libro se optó por llevar a cabo el análisis de al menos uno de los puentes estudiados mediante el software ANSYS © v.10 con que cuenta la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Como estudio de caso se tomó el puente sobre el río Guadalajara en la ciudad de Buga, bautizado con el nombre de La Libertad, por sus características constructivas y dimensionales, pero solo considerando las cargas muertas que actúan sobre él, es decir, su peso propio. Fases posteriores de la investigación contemplan incorporar datos relativos a las cargas ocasionadas por el tráfico vehicular que aún soporta.

Conforme a lo expuesto en el Capítulo 2, los trabajos de construcción del puente se iniciaron en 1874 gracias a un contrato firmado entre el presidente de la junta constituida para tal fin, Antonio María Soto, y el ingeniero colombiano Modesto Garcés. Desde el comienzo la estructura se consideraba una entidad formada por tres partes claramente diferenciadas: el tramo central del puente de tres arcos sobre el río, los terraplenes y el viaducto, formado por cinco arcos, todos de mampostería de ladrillo.

19 En este sentido se destacan los trabajos de Royles & Hendry (1991), Page, Ives & Ashhurst (1991), Begimgil (1997), Boothby, Domalik & Dalal (1998), Page (1987) y (1993), Ponniah, Fairfield & Prentice (1997), Roberts (1999) y Fanning, Boothby & Roberts (2001).

20 Roca, Molins, González & Casals (1995).

En un informe de 1875, el propio Garcés lo expresaba de la siguiente manera:

El puente de Buga ... es una obra mixta que comprende tres partes principales: el puente propiamente dicho que abarca con tres grandes arcos de á 10 metros de luz cada uno y el grosor de sus pilares y estribos un espacio de 41 metros; la segunda parte consta de los terraplenes indispensables para el descenso de la altura del puente en un espacio de 50 metros; y la tercera parte la forma un viaducto de cinco arcos espaciosa á distancias proporcionadas, adecuándolos á los accidentes del terreno en un espacio de 50 metros²¹.

Este dato histórico es particularmente importante para el proceso de análisis mecánico del macromodelo a elaborar, ya que permite considerar el tramo central del puente como una estructura independiente vinculada a las demás partes mediante un par de macizos romboidales que pueden considerarse resultados de la unión de las aletas del tramo central con las dos vías de acceso, una a cada lado. Aplicando procesos de digitalización en tres dimensiones, se han reconstruido dos momentos en el proceso constructivo, como se observa en las figuras 4.31 y 4.32.



Figura 4.31
Reconstrucción de la primera fase de construcción del puente de Buga, correspondiente al tramo central.
Dibujo: E. Sotelo (2007).

21 ROC, 94, abril 17 de 1875.



Figura 4.32
Reconstrucción de la segunda fase de construcción del puente de Buga, correspondiente los terraplenes y viaductos.

Dibujo: E. Sotelo (2007).

En fecha incierta, pero antes de ser puesto en servicio a comienzos del siglo XX, se construyeron los viaductos de nivelación: el del lado norte consta de nueve arcos de medio punto de luz variable; el del lado sur, de solo tres arcos, también de luz variable, todos en ladrillo. No se tiene documentada la afirmación según la cual el sacerdote alemán Joseph Binder, o Hermano Silvestre, había colaborado como sobrestante en la terminación de las obras. En cualquier caso, una de las claves del arco central ostenta el año de 1900.

Características geométricas

Un levantamiento arquitectónico realizado en septiembre de 2005, revisado en 2006 y 2007, verificó las dimensiones a las que hacían referencia los documentos históricos. Además, se observó que el ancho del puente era 6,00 m constantes, aunque una intervención efectuada a mediados del siglo XX, mediante vigas de hormigón en voladizo a cada lado, había aumentado su ancho total a 8,00 m.

En el tramo central todos los arcos son de medio punto y la línea de sus impostas se encuentra en el mismo nivel. Los ladrillos de las roscas acusan una disposición radial con trama idéntica y dimensiones iguales: 0,95 m en la clave y 1,82 m en los riñones. La altura libre entre el intradós de la clave y el nivel medio de las aguas es 7,00 m. El ancho de las pilas

centrales es 2,53 m. En su tramo más alto, los tímpanos alcanzan una altura de 4,09 m y su espesor equivale a un muro en doble tizón, es decir, 0,80 m.

Tabla 4.7 Medidas y relaciones dimensionales en el puente La Libertad.

Elemento	Diámetro del arco (m)	Espesor de la rosca en la clave (m)	Relación Espesor de la rosca / Diámetro del arco	Ancho de las pilas
Arco 1	9,51	0,95	0,1	
Arco 2	9,51	0,95	0,1	
Arco 3	9,51	0,95	0,1	
Pila A (arcos 1 – 2)				2,53
Pila B (arcos 2 – 3)				2,53

El puente se encuentra hoy en buen estado de conservación, aunque las bases de las pilas del tramo central presentan un acusado deterioro a causa de la acción abrasiva de las aguas del río Guadalajara. Esto obliga –en fecha no determinada– a realizar un recalce en hormigón armado de tipo superficial. La inspección de 2005 determinó que existen cavidades bajo las pilas por socavamiento de la acción hídrica. Existen pronunciadas fisuras a la altura de los riñones en las tres bóvedas centrales, en sentido perpendicular al eje longitudinal del puente.

Con el conjunto de esta información se realizó un modelo simplificado de tres arcos según la geometría propia del puente, asumiendo una serie de consideraciones en las condiciones de frontera. En las caras verticales de los extremos del eje principal del puente se consideró que: a) los desplazamientos eran nulos en la dirección del eje principal, por confinamiento longitudinal; b) el desplazamiento en la dirección transversal al eje principal del puente era igual a cero (consideración inicial en estado de verificación); c) existían desplazamientos en el sentido vertical libre con el fin de dar continuidad al movimiento del puente en su modelo completo. En los apoyos inferiores se consideraron restringidos todos los desplazamientos (condición de apoyo). Para simplificar el análisis, solo se consideró el valor de la carga muerta. No se contemplaron las aletas del puente.

Para el modelamiento numérico se consideraron tres componentes estructurales que conforman constructivamente el puente: las bóvedas, los tímpanos y el material de relleno, siguiendo pautas de análisis apli-

cadadas en estructuras similares²². No se establecieron diferencias para la mampostería de las bóvedas y los tímpanos. En el proceso de enmallado, con el fin de lograr continuidad de los elementos, se hicieron coincidir los nodos de todos ellos sin importar que pertenecieran a diferentes sólidos. Una malla mejor organizada se logró a partir del uso de hexaedros, creando además elementos de longitudes similares en el perímetro de cada área; para este caso se escogió una longitud de 40 a 50 cm. La figura 4.33 muestra la solución final del enmallado.

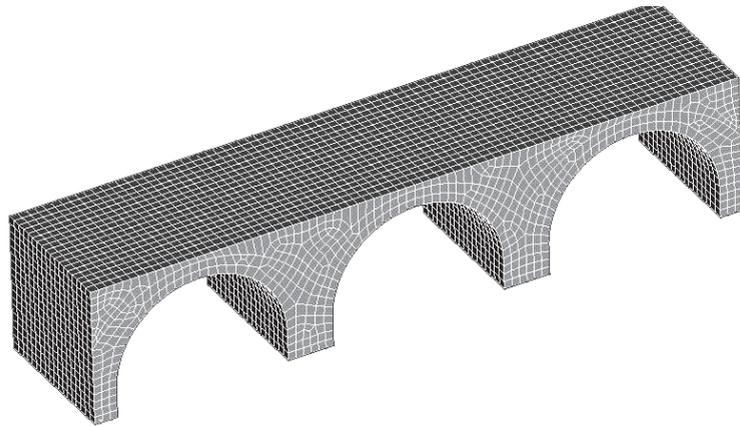


Figura 4.33 Enmallado del tramo central del puente La Libertad, en Buga.

Es de destacar que la simetría de la estructura, tanto en sentido longitudinal como transversal, simplifica su comportamiento general.

Características de los materiales

Con el fin de alimentar el programa informático, fue necesario definir el comportamiento elástico de sus dos materiales constitutivos (mampostería y material de relleno) a partir de tres valores: el módulo de elasticidad, el peso unitario y el coeficiente de Poisson.

Un primer paso consiste en determinar teóricamente el valor de la resistencia a la compresión de la mampostería haciendo uso de la ecuación (11)²³, que brinda la norma colombiana NSR-98:

²² Frunzio, Mónaco & Gesualdo (2001).

²³ Correspondiente a la ecuación D.5.5, contenida en la norma colombiana NSR-98, Cap. D.5.2.1. Ver ACIS (2002).

$$R_m = \left(\frac{2h}{75 + 3h} \right) * f'_{cu} + \left(\frac{50k_p}{75 + 3h} \right) * f'_{cp} \leq 0,8 f'_{cm}$$

$$f'_m = 0,75 R_m$$

Ecuación (11)

Donde R_m es el parámetro definido por la ecuación, h es la altura de la unidad de mampostería (en mm), K_p es un factor de correlación por absorción de la unidad (adimensional) equivalente a 0,8 para unidades de arcilla, f'_{cu} es la resistencia a la compresión de las unidades de ladrillo (en Mpa) y f'_{cp} es la resistencia a la compresión del mortero de pega (en Mpa).

Para el caso del ladrillo, se puede asumir que la magnitud del factor f'_{cu} es igual al promedio aritmético de los datos consignados en la columna 4 de la tabla 4.3 (filas 1-8), equivalente a 304,94 Mpa. Para el caso del mortero, es también válido asumir que la magnitud del valor f'_{cp} es igual al valor del promedio aritmético de los datos consignados en la columna 4 de la tabla 4.5, equivalente a 0,346 Mpa.

Teniendo en cuenta que la mampostería es, a su vez, un material compuesto, para determinar su módulo de elasticidad E_M se apeló a la ecuación (12)²⁴, según la cual es posible determinar el módulo de elasticidad para mampostería de arcilla, E_M , tomándolo como función de la resistencia a la compresión de la misma (f'_m):

$$E_M = 750 * f'_m \leq 10000 MPa$$

Ecuación (12)

Aunque no se conoce con exactitud el valor del coeficiente de Poisson (ν) para unidades de mampostería, estudios experimental es han arrojado un rango estimado entre 0,13 y 0,2 dentro del cual este puede oscilar²⁵. Para esta investigación dicho valor se fijó en 0,25 a partir de la ecuación (13) considerando el valor del módulo de cizallamiento G equivalente al 40% del valor del módulo de elasticidad E ²⁶.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Ecuación (13)

24 *Ibid.*

25 Molano (2005).

26 EUROCODE (1995).

El peso unitario se puede establecer analíticamente sobre un volumen de 1 m³, considerando las dimensiones del ladrillo (40 x 20 x 10 cm) con un espesor promedio de las juntas de mortero (1,5 cm). En este caso el análisis permitió deducir que el 68,4% del volumen corresponde a los ladrillos y el 31,6% restante al mortero de pega.

Un resumen de los datos obtenidos para la mampostería se halla en la tabla 4.14. Un resumen de los datos obtenidos para el material de relleno se encuentra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Valores asumidos para la mampostería del puente La Libertad.

Magnitud	Procedimiento empleado	Valor obtenido
Peso unitario	Determinado analíticamente	1,56 gr/cm ³
Resistencia a la compresión (f'm)	Ecuación (11)	2,97MPa
Módulo de elasticidad (E)	Ecuación (12)	2225,81Mpa
Coefficiente de Poisson	Ecuación (13)	0,25

El valor de la resistencia a la compresión de la mampostería permite a su vez establecer los esfuerzos admisibles para compresión axial (Fa) y para compresión por flexión (Fb), haciendo uso de las ecuaciones (14), (15) y (16)²⁷.

$$R_e = 1 - \left(\frac{h'}{40t} \right)^3 \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$F_a = 0,2 * f'_m * R_e \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$F_b = 0,33 * f'_m \quad \text{Ecuación (16)}$$

27 Correspondiente a las ecuaciones. D-1-1, D-1-5 y D-1-6 contenidas en la NSR-98, Apéndice D-1. Ver: ACIS (2002).

De acuerdo con las características dimensionales del puente La Libertad, ya señaladas, la magnitud h' se podía identificar con la distancia existente entre el borde superior de los tímpanos y el punto en donde confluyen las bóvedas (4090 mm) y la magnitud t con el espesor de esos mismos tímpanos (800 mm). Así, el esfuerzo admisible para compresión axial en muros de mampostería no reforzada, para el caso del puente La Libertad, se pudo fijar en 0,59 MPa y el valor del esfuerzo admisible para compresión por flexión se estimó en 0,98 MPa.

Análisis estructural

El comportamiento del puente La Libertad se analizó a partir de un macromodelo empleando –en función de sus posibilidades y versatilidad– el software ANSYS © v.10, el cual cuenta con elementos tipo *solid*, particularmente *solid95* y *solid65*, que permite modelar estructuras en tres dimensiones; además, tolera formas irregulares sin perder precisión y ofrece posibilidades de modelar superficies curvas. Igualmente permite utilizar materiales con características elastoplásticas o incluir en el análisis las curvas de comportamiento obtenidas en los ensayos de laboratorio.

Es preciso aclarar que este software no tiene un módulo particular de conversión de unidades, razón por la cual los datos de entrada deben tener unidades consistentes. Los datos de salida deben ser reconocidos por el usuario dependiendo de la magnitud a la que se refiera. Se emplearon unidades del Sistema Internacional de Unidades. La aceleración de la gravedad, por ejemplo, se tomó en $9,8 \text{ m/s}^2$; el módulo de Young (E) se introdujo en Pa (N/m^2). De esta manera se obtienen resultados expresados en este mismo sistema: desplazamientos en metros (m), esfuerzos en Pa (N/m^2) y fuerzas en Newton (N).

Análisis del comportamiento estructural de las bóvedas

El resultado del análisis lineal-elástico realizado a partir de la figura 4.34 permite apreciar que cada una de las bóvedas del puente es objeto de esfuerzos de compresión que oscilan en un rango de valores entre 29,42 kPa y 172,67 kPa. Simultáneamente, las mayores tracciones (82,65 kPa) se presentan en el sentido longitudinal o eje X sobre la zona baja de los arcos donde los tímpanos tienen mayor rigidez con valores superiores a la mayor tracción en el eje Y que es de 60,5 kPa y al mayor valor obtenido en el eje Z que es de 2,88 kPa. Es importante entonces considerar la vulnerabilidad de estas áreas en caso de sismo o del efecto de cualquier otra fuerza horizontal que afecte su rigidez por fractura.

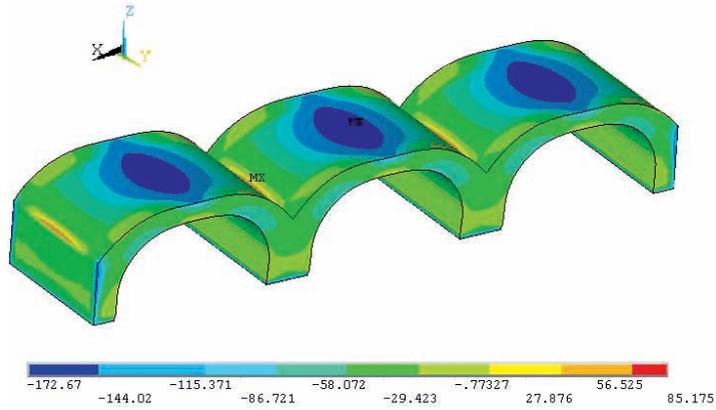


Figura 4.34 Distribución de esfuerzos en el eje X en la zona de las bóvedas del puente La Libertad.

La figura 4.35 muestra que las roscas están sometidas en su mayoría a esfuerzos de compresión. La gama de colores, que varía entre el marrón y el azul, indica valores que oscilan entre 109 kPa y 444,21 kPa. Se observa también la presencia notable de esfuerzos de tensión sobre la parte superior de cada rosca, lo cual es indicado con el color rojo. Es de resaltar que esta franja se debe a la interacción con el material de relleno, dominado por este tipo de esfuerzos, y que el valor de ella es muy pequeño, comparado con la magnitud de las compresiones. Su mayor valor es apenas 3 kPa, aproximadamente, el cual representa solamente el 0,5% del valor máximo de las compresiones. Los mayores esfuerzos a compresión se concentran en las bases de las pilas centrales y tienen un valor aproximado de 500 kPa.

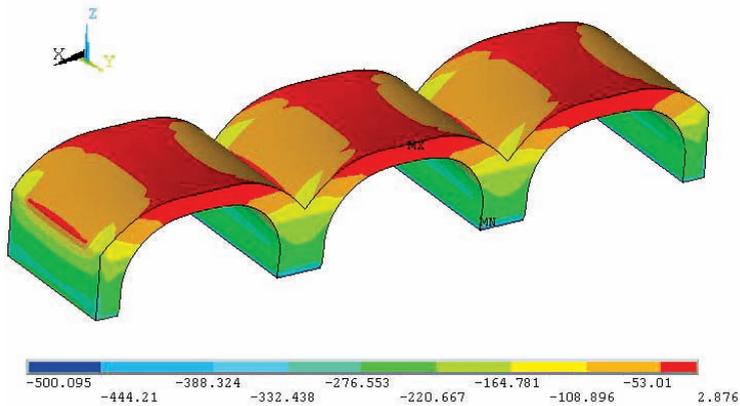


Figura 4.35 Distribución de esfuerzos en el eje Z de la zona de las bóvedas del puente La Libertad.

Análisis del comportamiento estructural del material de relleno

La figura 4.36 permite ver que el material de relleno presenta grandes extensiones superficiales de esfuerzos a la tensión cercanos a los 3,4 kPa, lo cual es un valor muy bajo si lo comparamos con las compresiones allí presentadas, cuyo máximo valor corresponde a 36,8 kPa, que no alcanza ni el 10% de este último valor. El sentido en que se distribuyen los esfuerzos en la gráfica de colores de derecha a izquierda es análogo al que tiene el puente de arriba hacia abajo, es decir, las tensiones se presentan en la parte superior del puente. A medida que descendemos el esfuerzo se acerca a la compresión, aumentando hasta llegar a su mayor valor. De ello se confirma que las mayores compresiones en sentido vertical se presentan en senos del puente.

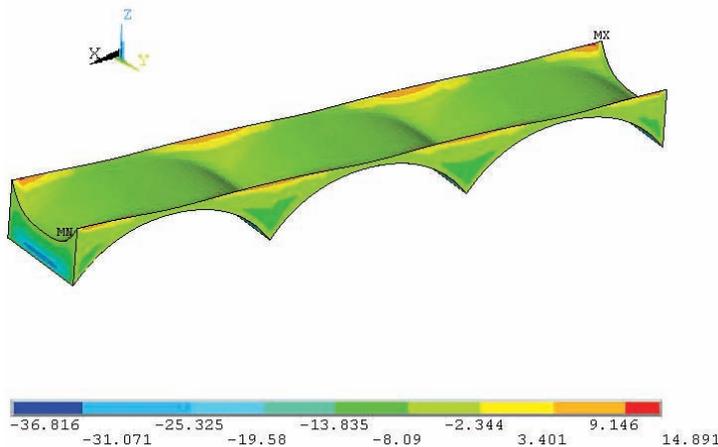


Figura 4.36 Esfuerzos en el eje Z del material de relleno del puente La Libertad.

Básicamente las compresiones dominan en el sentido longitudinal o eje X del puente. A medida que descendemos, esta compresión es mayor, los esfuerzos se concentran en los senos y su máximo valor es 14,82 kPa, aproximadamente la mitad del máximo valor en sentido vertical o eje Z, cuyo valor es 37 kPa.

La observación de la figura 4.38 permite concluir que los esfuerzos en el material de relleno tienen un comportamiento similar, en el sentido transversal o eje Y, al que presentan en sentido longitudinal o eje X, anteriormente descrito. Las mayores compresiones también están ubi-

cadras en los senos del puente, y su valor es 15,95 kPa, aproximadamente la mitad del máximo valor en sentido vertical; mientras que las mayores tensiones aumentan su valor en un 100% en este sentido, y se presentan en el mismo sitio.

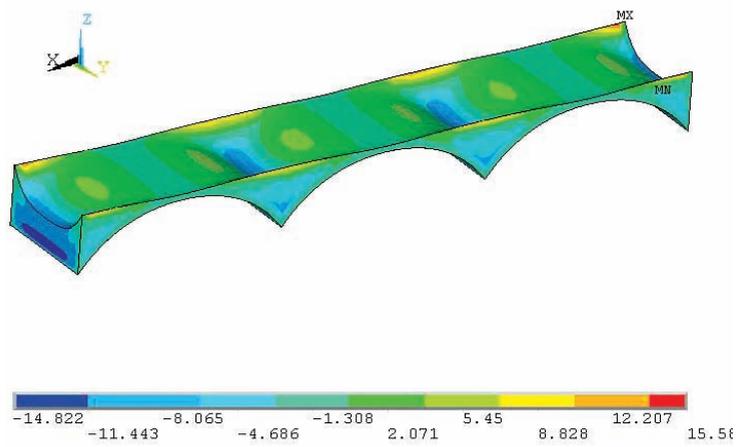
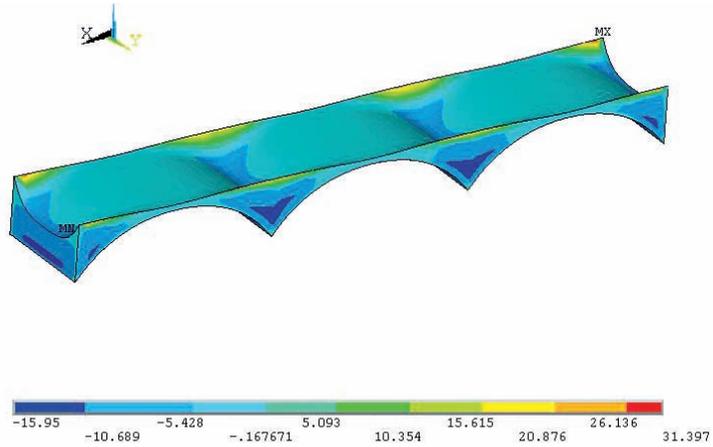


Figura 4.38 Esfuerzos en el eje Y del material de relleno del puente La Libertad.



Como era de esperarse, el desplazamiento del material de relleno presenta el mayor valor de toda la estructura, ya que el módulo de elasticidad obtenido en pruebas de laboratorio para este material es muy bajo (8500 kPa). Su valor es 0,44 cm. En la figura 4.39 se observa que se da en lo profundo de los senos del puente, lo cual corresponde al color azul. Complementando esta observación con las descritas en las figuras 4.36, 4.37 y 4.38, podemos concluir que la mayor vulnerabilidad del puente frente a cargas distintas a su peso propio se manifiesta en los senos, zonas donde el material de relleno presenta mayores esfuerzos a la compresión, así como los máximos desplazamientos. Este modelo expresa la realidad, ya que en el pavimento del puente La Libertad los mayores agrietamientos ocurren precisamente sobre estas zonas.

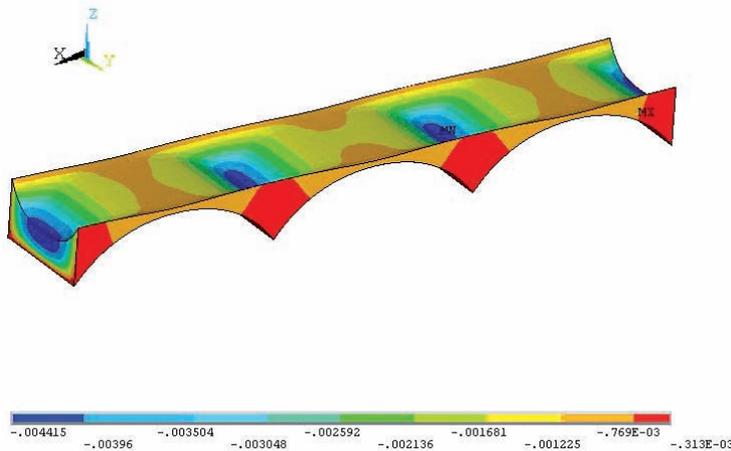


Figura 4.39
Desplazamientos en el eje Z del material de relleno del puente La Libertad.

Análisis del comportamiento de la obra de mampostería

El modelo que muestra la figura 4.40 es analizado bajo fuerzas de gravedad debidas al peso propio de la estructura. La figura permite concluir que el puente está sometido en su mayor parte a esfuerzos de compresión; la gama de colores que varía entre el marrón y el azul indica valores que oscilan entre 42 kPa y 442,8 kPa. Los mayores esfuerzos a compresión se concentran en las bases de las pilas centrales y tienen un valor aproximado de 500 kPa. El puente en conjunto presenta extensas franjas sometidas a esfuerzos de tensión, las cuales se hallan en la parte alta de la estructura, concentrados principalmente en el material de relleno y en los tímpanos.

Sin embargo, se debe advertir que estas tensiones tienen baja magnitud, comparada con la de los esfuerzos de compresión, pues llegan solamente al 3,1% de su valor. Además, el máximo valor de la tensión en este sentido es menor comparado con el de los otros dos sentidos.

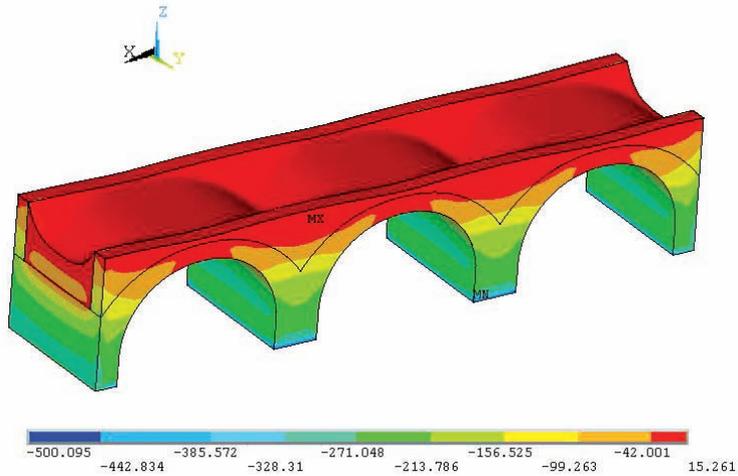


Figura 4.40 Distribución de esfuerzos en el eje Z en la obra de albañilería del puente La Libertad.

En el sentido longitudinal o eje X, los mayores esfuerzos de tensión equivalen a 165,3 kPa, prácticamente iguales a los mayores esfuerzos de compresión, los cuales se aprecian en la figura 4.41, equivalentes a 172,16 kPa. Ambos esfuerzos están situados en los tímpanos del puente. Vale la pena aclarar que en los tímpanos se presentan las únicas fracciones sometidas a tensión, si nos referimos al material mampuesto. En las roscas predomina la compresión y su mayor valor allí está cercano a 134,7 kPa, aproximadamente en un cuarto de la luz de cada rosca (lo cual es consecuente con los postulados del método del mecanismo de colapso). El material de relleno es dominado por esfuerzos de compresión, como en las roscas, pero con una magnitud menor, cercana a 15 kPa.

Casi toda la estructura está sometida a esfuerzos de tensión en sentido transversal de la misma o eje Y con valores inferiores a 47 kPa, muy bajos comparados con las tensiones presentadas en los otros dos sentidos. El cuadro de colores de la figura 4.42, que muestra los resultados, indica que existen esfuerzos de compresión que oscilan entre 19,3 kPa y 153 kPa; sin embargo, el puente revela que las franjas correspondientes a estos valores ocupan una región muy pequeña, si lo tomamos como referencia

en su totalidad, aunque son de mayor magnitud en comparación con los esfuerzos de tensión, que son apenas 31% de los de compresión.

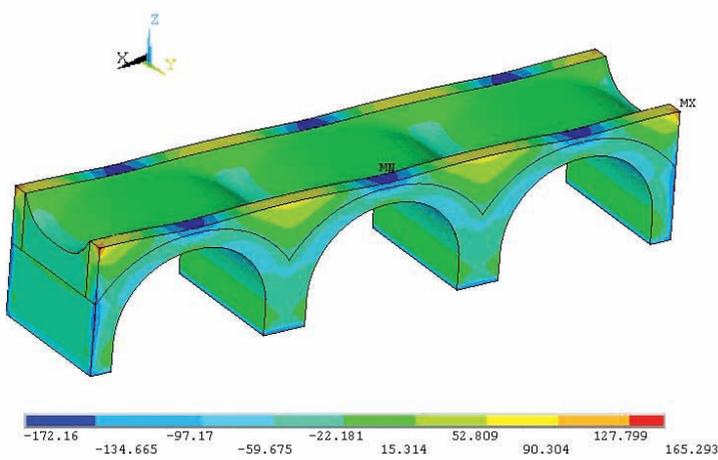


Figura 4.41 Distribución de esfuerzos en el eje X en la obra de albañilería del puente La Libertad.

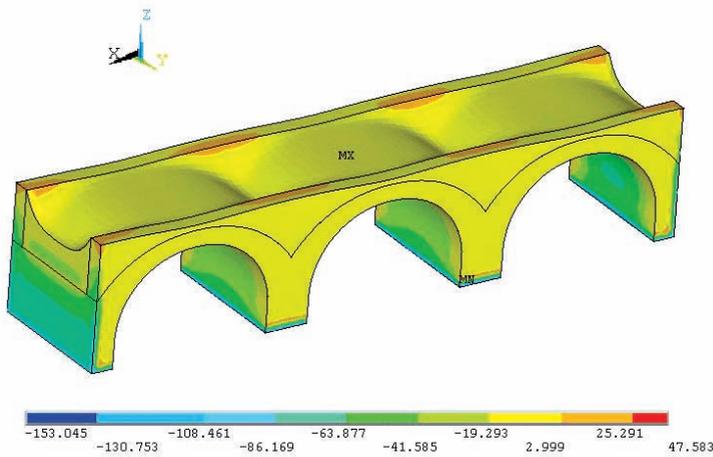


Figura 4.42 Distribución de esfuerzos en el eje Y en la obra de albañilería del puente La Libertad.

Como era de esperarse los mayores desplazamientos ocurren en sentido vertical o eje Z de la estructura. Los mayores valores de desplazamiento se hallan en el material de relleno de los senos del puente cercanos a 0,44 cm. El máximo valor en las roscas se halla en el centro del puente, el cual es casi 0,13 cm.

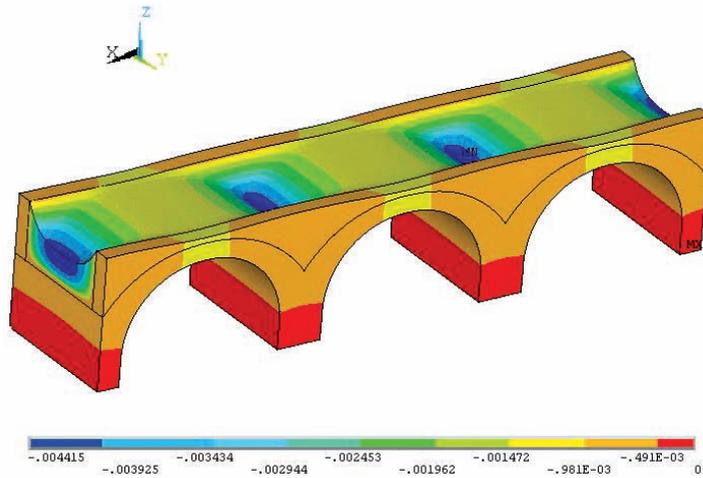


Figura 4.43
Desplazamientos en el eje
Y en la obra de albañilería
del puente La Libertad.

Si bien el puente pudo haberse reducido en una cuarta parte para ser modelado en el programa informático en virtud de ser una estructura simétrica, su escala permitió un análisis integral lo cual es mejor a efectos prácticos puesto que lo primero implicaría nuevas condiciones de borde, en tanto que la visualización del modelo en su contexto global permite una mejor lectura de los resultados. Así es entonces posible afirmar que la distribución de esfuerzos de compresión cuenta con su mayor valor sobre todas las bóvedas en el primer cuarto de cada una de sus luces y que el mayor esfuerzo de tracción de la estructura se presenta en el sentido longitudinal con un valor correspondiente a 165,3 kPa. En los sentidos transversal y vertical las tracciones son mucho más bajas pero se extienden en mayor proporción.

Los análisis permitieron establecer que los esfuerzos máximos a compresión que actúan en el puente están cercanos a los 500 kPa y se presentan en la mampostería de la rosca; los esfuerzos máximos de tracción rondan los 165 kPa y se sitúan en la zona de los tímpanos. Si comparamos estos resultados con los esfuerzos admisibles estimados para la mampostería (590 kPa para compresión axial y 980 kPa para compresión por flexión) además de los esfuerzos admisibles para tracción por flexión en mampostería no reforzada contemplados en la norma NSR-98 (190 kPa y 370 kPa conforme a la Tabla D-1-2- contenida en ACIS, 2002), se puede concluir que la estructura se encuentra todavía dentro de un rango de seguridad frente a esfuerzos y con una tolerancia aun de 90 kPa en cuanto a

esfuerzos admisibles por compresión axial y 25 kPa en cuanto a esfuerzos admisibles para tracción por flexión.

Se sabe también que la resistencia a la compresión obtenida mediante ensayos fue para el ladrillo de 7350 kPa y para el mortero de 350 kPa, dando en su conjunto como resultado una resistencia a la compresión de la mampostería igual a 2970 kPa²⁸, por tanto los esfuerzos actuantes solamente alcanzan el 16.8% de los esfuerzos resistentes, con lo cual se ratifica la premisa de la teoría de estado límite según la cual la resistencia a la compresión de los materiales se puede considerar infinita, es decir, se presentan cargas muy bajas en comparación con la resistencia última del material.

En el conjunto de la estructura los esfuerzos son relativamente bajos, y consecuentemente con esto, el mayor desplazamiento del material mampuesto es pequeño (1,3 mm) ante un esfuerzo de 500 kPa. Por su parte, el mayor desplazamiento ocurre en el material de relleno (4,4 mm) bajo un esfuerzo de solo 37 kPa puesto que su módulo de elasticidad es también muy bajo (8500 kPa).

Los resultados obtenidos son consecuentes con las valoraciones obtenidas a partir de la inspección visual de la estructura. No hay señales de fisuraciones causadas por fallo en la capacidad resistente en la mampostería, así como no hay evidencias de desplomes en los tímpanos o cualquier otra situación que pudiese amenazar con el colapso de la estructura, lo que resta valor a propuestas de intervención orientadas a reforzar la obra de albañilería mediante pórticos de confinamiento o arcos de hormigón bajo las bóvedas; sin embargo, el material de relleno es muy compresible y en condiciones de saturación de humedad puede tener efectos contra-productivos hacia la estabilidad del conjunto, en especial por el efecto de empuje horizontal sobre los tímpanos laterales. En este sentido, son saludables para el puente La Libertad acciones orientadas a mejorar las condiciones del relleno o remplazarlo por uno de mejor calidad; además deberán mejorarse las condiciones de evacuación de las aguas que se filtran hacia el interior de los senos a través del pavimento.

28 Correspondiente a la ecuación D.3.2, contenida en la norma colombiana NSR-98, Cap. D.3.7.5. Ver ACIS (2002).



Síntesis y conclusiones

Una historia con múltiples dimensiones

Un relato como este impone, ineludiblemente, diferentes mallas de lectura. Si un puente se contempla como un artefacto bien delimitado, pasa a ser solo un punto en el trazado de una carretera, de un camino, y pieza necesaria para conectar aquello que la geografía separa. Si se asume como un eslabón en la cadena de conformación y articula un territorio, es posible empezar a entender a través de él un amplio conjunto de contradicciones que, más allá de lo puramente técnico, abarcan lo social, lo político, lo humano.

El estudio de los orígenes de un puente, de sus características tipológicas y de su estado de conservación, constituye un primer tipo de acercamiento en el ámbito de la historia de la arquitectura y la ingeniería. Sin embargo, este estudio merece ser cruzado con el análisis del discurso (oral, escrito, edificado) de los actores involucrados en su génesis: los ingenieros, nuevos actores en la sociedad colombiana que transitan del siglo XIX al XX encarnando valores de progreso, a nombre de los cuales desempeñan un papel creciente en los procesos técnicos. Como empresarios particulares o en representación del Estado, los ingenieros actúan no solo como diseñadores o constructores, sino también como expedicionarios, representantes políticos, voceros sociales, maestros o, lo que aun puede ser más revelador, planificadores del territorio.

Sería una lástima reducir esta historia a un único componente, por muy esencial que sea para la comprensión de los intereses de ese entonces. Porque también encontramos un fenómeno de transmisión y transformación de saberes científico-técnicos que, a su vez, sufrían un complejo proceso de mutación acontecido entre los siglos XVIII y XIX debido a la matematización de disciplinas como la mecánica de los sólidos o la hidráulica y a los avances registrados en el conocimiento y uso de los materiales. Con ellos como patrimonio, los actores-ingenieros inician en Colombia proyectos a menudo audaces, explorando los límites legados por la tradición técnica. Lentamente, su capacidad de realización aumenta de manera notable, pese a que la complejidad de los fenómenos físicos a los cuales se enfrentan y las particularidades del medio local parecen limitar la eficacia de los conceptos generales y de las herramientas matemáticas

que los sostienen. Estas incertidumbres están compensadas por un ejercicio práctico que parece pertenecer a un arte de la construcción vinculado durante décadas a las tradiciones locales, permeables a determinaciones culturales provenientes de horizontes diversos. Este arte se ajusta a modelos espaciales y constructivos más o menos formalizados, impregnados de la literatura técnica, los discursos y los proyectos publicados a lo largo de la tratadística clásica.

Otra dimensión de este estudio tiene que ver con la historia de los lugares. A lo largo de este relato es evidente que el lugar es siempre el elemento primigenio, cuya génesis, consolidación y definición precede siempre y demanda un puente. En tal sentido, el lugar se construye a partir de las acciones humanas, de las relaciones entre actores sociales, de las fuerzas de la economía o incluso de las condiciones que ofrece la naturaleza misma. En los lugares no hay moradas. La estructura, el puente, se limita a ser un hecho material que reivindica y refuerza esa preexistencia. Además, aparece ante nuestros ojos el sentido de permanencia: los lugares son mutables, es decir, se desplazan por el territorio a consecuencia de esas mismas acciones humanas y, en ocasiones, de los cambios producidos por la fuerza de la naturaleza misma.

Otro nivel de lectura compete ineludiblemente a los ámbitos de lo público y lo privado. El paso del río es, por su origen, un espacio colectivo que requiere –ante la incapacidad de las instituciones o sencillamente su inexistencia– acciones e iniciativas particulares capaces de promover la construcción de un puente a través de medios limitados y a cargo de profesionales que ponen en juego su ingenio para resolver un problema. Solo cuando el Estado madura, crece y es capaz de conformar unas mínimas (y en ocasiones precarias) estructuras administrativas para gestionar y construir obras de mayor complejidad, se puede iniciar una nueva fase en la construcción de las obras públicas con la presencia de medianos y grandes capitales. Se pasa entonces al liderazgo y la iniciativa gubernamental, en la que los actores de primera línea son esos nuevos ingenieros de los siglos XIX y XX.

Por último, se pone en claro que la técnica no es autónoma, que existe un grado de coherencia entre las tecnologías que una sociedad es capaz de crear o de asimilar y el resto de los rasgos culturales que caracterizan esa sociedad: para construir una teoría del desarrollo tecnológico no solo importan los conjuntos de conocimientos y artefactos, sino una comprensión compleja de objetos, materiales y actores. Así entendido, un puente es un artefacto porque, aunque los ladrillos, morteros y suelos son los elementos necesarios para construirlos, se requiere al menos un agente intencional –un *ingeniero* dotado de un corpus de conocimientos– que

los ponga en orden para que el conjunto funcione realmente como un sistema.

Como escenario de fondo aparece siempre y reclamante la condición material de los puentes estudiados. Sin duda, no son abstracciones. Son ejemplos vivos, con fuerza, peso y masa, puestos sobre un sitio: ¿cómo se construían?, ¿cómo se conservan?, ¿cómo se comportan? Las dimensiones de este trabajo han respondido en cierto grado de detalle a esas preguntas, aunque quedan muchos aspectos por resolver; por ejemplo, dadas las características de los materiales usados localmente en la construcción de puentes, ¿cómo entender su comportamiento frente a cargas sísmicas?, ¿cómo asumir tareas de intervención serias y consecuentes con la calidad de los edificios?

Estudios reveladores

Ha quedado claro de qué manera, entre 1718 y los primeros años del siglo XX, se construyeron al menos 32 puentes de arco de ladrillo en el territorio geográfico del alto Cauca, que comprende el valle del río del mismo nombre y está delimitado por las poblaciones de Timbío, al sur, y Cartago, al norte. En su mayoría, son construcciones sin autor, producto más de la acción colectiva que de las iniciativas individuales.

La primera parte de la investigación asumió como objetivo principal el reconocimiento, la identificación y la valoración de al menos 12 de estos puentes, una tarea nunca antes emprendida en la historia de la arquitectura o la ingeniería colombianas. Sin embargo, progresivamente, los alcances se fueron extendiendo hasta alcanzar una muestra de 20 estructuras, todas ellas en pie y algunas en servicio.

El más antiguo de estos puentes se construyó sobre el río Molino, en el camino de Popayán hacia Cali tomando la ruta del norte, que data de 1718 y estuvo a cargo de Cristóbal Mosquera, hombre influyente de la ciudad que administró los dineros para la compra de materiales y el pago de la mano de obra, aunque no llegó a estar al frente de las tareas de la ejecución. De esta construcción obtuvo la confianza para edificar otro puente, esta vez sobre el río Cauca, cuyo fuerte caudal causaba destrozos sobre cualquier estructura de madera que intentase salvar su curso. Pero se demandaba la ayuda de una persona versada en matemáticas y geometría: un sacerdote alemán, portador quizás del saber clásico que podemos reconocer a través de los manuales de arquitectura e ingeniería que hemos reseñado. No fue accidental que el sacerdote José Ortiz dirigiera la construcción del puente que lleva su nombre sobre el río Cali, casi cien años después, ni que el también clérigo Serafín Barbetti llegara a desem-

peñarse como ingeniero y empresario por las tierras del Cauca en la segunda mitad del siglo XIX. Para el último cuarto de siglo encontraremos, ya en pie, puentes de arco de ladrillo en Timbío (constructor anónimo, 1875), sobre la quebrada La Victoria (constructor anónimo, 1876), sobre el río Cofre (Manuel Rincón y Manuel Balcázar, 1889), sobre el río Pescador (constructor anónimo, 1891), sobre la quebrada Popurrinas (Toribio Vivas, 1893), Piendamó (Telésforo Urquijo, 1892) y sobre el río Güengüé (Rafael González Concha y Antonino Olano, 1897), entre otros.

Estos puentes se pueden abordar, históricamente, de manera particular, ya que su génesis y desarrollo ha sido documentado a partir de información existente en archivos públicos: Archivo General de la Nación: Fondo Ministerio de Obras Públicas (Bogotá) y Archivo Histórico del Cauca (Popayán), además de las notas publicadas en *Registro Oficial del Cauca*, diario en que se registraban los hechos de la vida pública del entonces Estado Soberano del Cauca.

Los ejemplos restantes son puentes abandonados, incluso algunos en serio peligro de desaparecer debido a la falta de las más mínimas acciones de mantenimiento o reparación. Aunque es difícil determinar el momento exacto en que comenzó su ciclo de deterioro, no es difícil pensar que ocurrió cuando automóviles y camiones empezaron a hacer presencia en las carreteras nacionales y fue necesario dotar la vía carreterable de un nuevo puente, generalmente metálico, preámbulo de uno con carácter más definitivo de hormigón.

El caso de los tres puentes aún en servicio (Buga, Güengüé y Popayán) se puede calificar de excepcional. Con más de un siglo de antigüedad, sirven al tráfico actual sin interrupción ni limitación (ni siquiera de carga), incluso se consideran piezas vitales para la infraestructura del transporte urbano y regional. En Buga, el puente La Libertad soporta el pesado tráfico de dos instalaciones adyacentes: el Cuerpo de Bomberos Voluntarios y Gaseosas Postobón, de elevado peso propio. Además, sirve al tráfico urbano convencional de la ciudad. Por el de Güengüé, circula el tráfico intermunicipal de buses, camiones y vehículos que transitan entre las poblaciones de Corinto y Miranda, y hasta ha llegado a soportar el peso de tanquetas de guerra del ejército colombiano que tiene, a pocos kilómetros de allí, un activo escenario de operaciones. El de Popayán sirve de manera directa a los camiones que salen de la planta de Lácteos Puracé, los cuales distribuyen sus productos hacia el norte del Departamento.

Sorprende entonces la prolongada durabilidad en todos los casos, estén o no los puentes en servicio. Esta es producto no solo de la enorme capacidad de sus materiales constitutivos, sino de la disposición geométrica de las estructuras: arcos de medio punto en su mayoría y potentes

estribos capaces de contrarrestar sus empujes. Esta visión particular, capaz de trascender la mera labor de inventario y catalogación, justificó la formulación de una segunda etapa de investigación orientada a comprender la naturaleza material de algunos de los puentes estudiados y, a través de ellos, del conjunto.

Históricamente, el análisis mecánico del comportamiento de arcos de ladrillo ha seguido varios rumbos. Sin embargo, objeto de investigaciones recientes es el comportamiento mecánico de estos puentes a la luz de programas informáticos de cálculo estructural. Aunque en España y el Reino Unido, principalmente, son de vieja data trabajos orientados a comprender su naturaleza resistente y sus posibilidades de conservación o restauración, en nuestro medio no existen, a la fecha, estudios capaces al menos de comprender su importancia y valor histórico. La investigación que originó este libro apuntó en esa dirección y se propuso, como segundo cometido, desarrollar y apropiarse de una metodología multidisciplinar que llevara no solo a la comprensión integral del hecho construido, sino que permitiera establecer pautas de actuación sobre el patrimonio edificado.

Queda ahora claro que existe una relación de coincidencia entre las preguntas ¿cómo se comporta? y ¿qué significa?, las cuales solo pueden responderse luego de tener claro ¿cómo es? En consecuencia, la apuesta metodológica parte de una descripción detallada de cada uno de los puentes históricos antes mencionados. Como lo señala J. L. González en la Introducción de este libro, ese “cómo es” se ha respondido definiendo tres aspectos fundamentales: la forma, entendida como todo aquello que es susceptible de ser expresado gráficamente; la materia, es decir, la descripción de las propiedades mecánicas y, en lo posible, físico-químicas; y la estructura, entendida aquí como el sistema de relaciones entre los materiales y la forma.

La labor se desarrolló en esos ámbitos: de manera completa en el primero a través de un trabajo de campo que comprende levantamientos arquitectónicos, documentación histórica e inspección visual. El estudio de materiales se llevó a cabo con la ayuda de los laboratorios de Materiales y de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, con cuyos primeros datos se ha podido ejecutar el proceso de modelización numérica por el método de elementos finitos para comprender el comportamiento de algunos de los puentes estudiados.

El fácil acceso a programas de cálculo por computador ha hecho del Método de Elementos Finitos un camino aplicable al estudio de edificaciones históricas. Abundante es la bibliografía sobre el tema, así como los estudios de caso en que el MEF ha sido aplicado. Una de sus grandes ven-

tajas es que permite responder otra de las preguntas que se formulaban en la Introducción: ¿cómo se comportará? Este es un núcleo importante del problema: prever las relaciones entre el objeto existente y las diferentes alternativas para intervenir en él y cómo alcanzar la garantía de estabilidad en cada una de ellas.

Conocer de manera precisa los modos de comportamiento, comprender su materia y predecir los tipos de respuesta ante acciones futuras son hoy en día los medios indispensables para la intervención sobre los bienes históricos. El proyecto de investigación expuesto en este libro apunta, a largo plazo, hacia el diseño concreto de acciones tendientes a la recuperación y adecuación del mayor número de casos posibles, involucrando el trabajo de las comunidades locales.

Fuentes diversas y abundantes

Este trabajo de investigación empezó de cero. Libros consagrados a la historia de la técnica en Colombia son todavía inexistentes y el punto de partida se limitó a unos pocos artículos dispersos, dedicados a estudios puntuales. Sin embargo, se validó una vez más la experiencia metodológica de explorar fuentes diversas de primera mano que resultaron extraordinariamente abundantes: los puentes en sí mismos fueron los primeros focos de información a través de su estructura material. Luego, se pasó a revisar el valiosísimo fondo del antiguo Ministerio de Obras Públicas, disperso en más de cuatro mil volúmenes, celosamente guardados en el Archivo General de la Nación, que se complementaron con los folios dispersos por las bibliotecas públicas de Cali y Popayán. Del cruce de tanta información se logró un relato más o menos coherente y, en especial, multidireccional.

Lo que parecía una travesía por el desierto se convirtió en un entramado laberinto de documentos que fueron sirviendo como piezas del complejo *puzzle* en que se convirtió esta historia. Armarlo no ha sido fácil y ha demandado diversos grados de aproximación. Por ejemplo, solo a partir del resultado del cruce de la documentación es posible concluir que en torno a la construcción de puentes de arco en la región del alto Cauca se constituyeron unidades gremiales de maestros de obras que estuvieron fuertemente ligados a los diferentes proyectos que se llevaron a cabo: además de tener un carácter casi nómada en el territorio (aunque sus familias estuviesen domiciliadas en Popayán o Cali), existía un *corpus* de conocimientos trasmisible en el interior de esas unidades, respaldándose en algunos casos en centros de formación muy elementales (como Colegios Mayores, donde se impartían cursos de matemáticas, geometría

o dibujo). El caso de la familia Sarria es uno de ellos, vinculadas a varios proyectos en un periodo de años extenso; o el interesante (y no único) de los Montenegro, que además constata el esfuerzo para que las más recientes generaciones (próximas al siglo XX) contasen con una formación profesional en el campo de la ingeniería civil a través de la Universidad del Cauca, principalmente. Cuando se disponía de recursos económicos, como en el caso de los Bucheli, se emprendía una formación en el exterior, no siempre exitosa.

Los entramados de este relato y lo que las múltiples fuentes aportan también permiten apreciar el continuo de los saberes y las prácticas adaptados a las condiciones locales. En contra de lo que algunos quisieran ver como un caso de tecnología apropiada, se valora ante todo una tecnología adaptada a un medio singular, pero con fines y recursos de naturaleza idéntica a los de su tradición y su pasado: el uso del ladrillo, la preparación de mezclas de mortero, el armado de las cimbras, entre otras prácticas, no fueron una imposición cultural en el caso que hemos estudiado, sino una maravillosa adopción por su sencillez y su efectividad, así como por su flexibilidad: la geometría nunca se impuso al sitio, se adaptaba a él y, ya sobre ella, se levantaba el puente con todo el esfuerzo que fuese necesario.

Papeles manuscritos, planos (unos pocos), documentos oficiales, diarios, fotografías y edificios, son legibles. También el paisaje. Las condiciones geográficas de la región son, en últimas, el detonante de tan vasta producción material. Sus ríos, los valles, la fertilidad del suelo o las condiciones cambiantes del clima son otro telón de fondo de la coreografía de los puentes, hilados unos tras otro por la red de caminos que poco a poco fue penetrando por el territorio permitiendo fundación de pueblos, comercio, riquezas, flujo de personas y de ideas. Ese mismo paisaje aportó las materias primas: arcillas, cales, maderas, arenas, piedras, que con su abundancia facilitaron la adopción de una técnica y sus particularidades.

Camino por recorrer

Este trabajo está todavía incompleto, inacabado. Pero no por ello cerrado a la confrontación o al debate. Sobre su marcha, todos los que en él hemos participado hemos aprendido mucho y ampliado el horizonte. La dinámica de los ingenieros colombianos de los siglos XVIII y XIX, por ejemplo, es un tema por descubrir, asociado siempre a sus obras, sus conocimientos y su legado. El modelo que aquí se ha ensayado es extensivo a otras regiones del país; con su difusión se podrá ir completando el panorama de nuestra historia técnica. Además no es un asunto puramente

nacional. Los nexos entre América y Europa a través de España son sumamente fuertes y vivos, y están presentes en nuestras prácticas constructivas con una fuerza que incluso a algunos parece incomodar.

También está abierto el camino hacia la integración disciplinar: la historia, la arquitectura, las ciencias de la ingeniería son meras fronteras útiles en el campo de la didáctica, pero en el mundo de lo real se confunden y se mezclan para formar un todo. En ese sentido podemos decir que al menos nuestra experiencia ha sido interesante.

Queda también abierto el camino hacia la intervención del patrimonio (y también de lo que *no* es patrimonio), entendido desde una mirada compleja y unificadora, no desde orillas únicas. Son muchos los daños –a veces irreparables– que los arquitectos o los ingenieros, actuando individualmente, han causado en los edificios por exceso de celo o por defecto. Solo con una alta dosis de conciencia histórica y un esfuerzo por comprender las leyes de la mecánica será posible la integración disciplinar y con ella la búsqueda de nuevas vías para identificar la manera de actuar sobre los edificios con valor para la memoria de sus dueños. Y en eso, por supuesto, la enseñanza cumple un papel primordial.

Bibliografía

Archivos y fondos documentales

- Archivo General de la Nación (AGN). Mapotecas 2, 4.
Archivo General de la Nación (AGN). Fondo Documental Mejoras Materiales, Sección Colonia.
Archivo General de la Nación (AGN). Fondo Ministerio de Obras Públicas.
Archivo Histórico del Cauca (AHC). Sección Cabildo

Publicaciones periódicas impresas

- AI: *Anales de Ingeniería*. Bogotá: 1889-1974.
GNG: *Gaceta de la Nueva Granada*. Bogotá, 1840-1860.
PPI: *Papel periódico ilustrado*. Bogotá: 1883-1884.
ROC: *Registro Oficial del Cauca*. Popayán: 1874-1904.

Documentos oficiales de la República de Colombia

- CVC. Corporación Autónoma Regional del Cauca (1983). *Recreación en la región del alto Cauca. Recursos espaciales en el área rural*. Cali, Oficina de Planeación.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1980). *Estudio semidetallado de los suelos del valle geográfico del río Cauca*. Bogotá, Subdirección Agrícola del IGAC.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1996). *Diccionario geográfico de Colombia*. Bogotá, Subdirección de Geografía del IGAC.
- Ministerio de Obras Públicas (1930). *Memoria que presenta el ministro de Obras Públicas al Congreso Nacional en las sesiones ordinarias de 1930*. Bogotá, Imprenta Nacional.
- República de Colombia (1888). *Informe que presenta el Ministro de Fomento al Congreso de 1888*. Bogotá, Imprenta de A.M. Silvestre.
- República de Colombia (1890). *Informe del Ministro de Fomento al Congreso de la República de Colombia en sus sesiones ordinarias de 1890*. Bogotá, Imprenta de A. M. Silvestre.
- Uribe, Enrique (1931). *Carreteras y caminos nacionales: informe que rinde el Director General de Carreteras y Caminos al señor Ministro del ramo*,

correspondiente al año de 1930 y al primer semestre de 1931. Bogotá, Imprenta Nacional.

Ediciones impresas escritas antes de 1900 y publicadas entonces o recientemente relacionadas con aspectos propios de la técnica constructiva

- Alberti, León Battista (1485). *De Re Aedificatoria*. Florencia. Se ha consultado la edición castellana publicada en Madrid, Ed. Akal, 1991.
- Aragón, Ernest (1909). *Ponts et ouvrages en maçonnerie*. París, H. Dunot et E. Pinat.
- Bails, Benito (1796). *Elementos de matemáticas. Tomo IX, parte I. Que trata de la arquitectura civil*. Madrid, Imprenta de la Viuda de D. Joaquín Ibarra. Ed. facsímil publicada en 1983 por el Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, Murcia.
- Belidor, Bernard Forest (1725). *Nouveau cours de mathématique*. París, C. Jombert.
- _____ (1729). *La science des ingénieurs*. París, C. Jombert.
- _____ (1737-39). *Architecture hydraulique*. 2 vols. París, C. Jombert.
- _____ (1750). *Architecture hydraulique. Seconde partie*, 2 vols. París, C. Jombert.
- Blondel, Jacques-François (1771-1777). *Cours d'architecture ou traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments*. París, s.i.
- Clémencet, A. (1891). *Cours pratique de travaux publics*. París, E. Bernard & Cie.
- Collignon, Edouard (1885). *Cours de Mécanique appliquée aux constructions*. París, Vve. C. Dunod.
- Croizette, M. P. (1885). *Cours de construction des ponts*. París, Vve. C. Dunod.
- Couplet, P. (1729). "De la opuse des voûtes". En *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*. París, s.i., pp. 79-117.
- De la Hire, Philippe (1695). *Traité de mécanique*. París, s.i.
- _____ (1712). "Sur la construction des voûtes dans les édifices". En *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences de Paris*. París, s.i., pp. 70-78.
- De San Nicolás, Lorenzo (1639?). *Arte y uso de arquitectura. Primera parte*. S. l., s. i.
- _____ (1665). *Segunda parte del Arte y uso de arquitectura*. Madrid, s. i.
- Debauve, Alphonse (1875). *Manuel de l'ingénieur des ponts et chaussées*. París, C. Dunod.
- Degrand, Joseph & Resal, Jean (1887-1889). *Ponts en maçonnerie*. París, Librairie Polytechnique Baudry et Cie.

- Dejardin, M. (1845). *Routine de l'établissement des voûtes*. París, Carlilian-Goeury et Vor. Dalmont.
- Derand, Françoise (1643). *L'architecture des voutes ou l'art des traits et coupe des voutes*. París, Sebastien Cramoisy.
- Dupuit, J. (1870). *Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie*. París, Dunod Editeur.
- Filarete, Antonio Averlino (Mss, s. XV). *Tratado de Arquitectura*. Redactado en italiano entre 1461-1465. Se ha consultado la edición hecha por Pilar Pedraza, Vitoria-Gasteiz, Ephialte-Instituto de Estudios Iconográficos, 1990.
- Frézier, A.F. (1739). *La theorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*. París, C. A. Jombert.
- Gauthey, E-M. (1819). *Traité de la construction des ponts*. París, s.i.
- Gautier, H. (1716). *Traité des ponts*. 1ª ed., París, Chez André Cailleau.
- _____ (1727). *Traité des ponts*. Ed. sin número, París, Chez V. Duchesne.
- _____ (1765). *Traité des ponts*. 4ª ed., París, Chez V. Duchesne.
- García, Simón (Mss, 1681). *Compendio de arquitectura y simetría de los templos ...* Se ha consultado la edición en facsímile hecha por Carlos Chanfón Olmos, México, 1979.
- Giorgio, Francisco (Mss, s. XV). *Trattato di architettura civile e militare*. Se ha consultado la edición en facsímile hecha por Cesare Saluzzo, Torino, 1841.
- Milizia, Francesco (1781). *Principii di Architettura Civile*. Finale.
- Müller, John (1769). *Tratado de fortificación*. Barcelona, Thomas Piferrer. Versión castellana de Miguel Sánchez Taramas, con notas de su autoría.
- Morandière, Roman (1888). *Traité de la construction des ponts et viaducts*. París, Vve. C. Dunod.
- Palladio, Andrea (1570). *I Quattro Libri dell'Architettura*. Venecia. Se ha consultado la edición castellana, Madrid, Akal, 1988.
- Parent, A. (1713). *Essai et recherches de mathématique et de physique*. París, Nully.
- Perronet, J-R. (1834). *Mémoire sur une nouvelle manière d'appliquer les cheveaux au mouvement des machines*. París, s.i
- Pitot, H. (1726). "De la force qu'il faut donner aux cintres dont on se sert dans la construction des grandes voutes, des arches des ponts, etc". En *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*. París, s.i., pp. 216-236.
- Poleni (1747). *Memorie istoriche della gran cupola del templo vaticano*. Padova, Stamperia del Seminario. Se ha consultado la edición facsímile a cargo de A. Giuffré, Roma, 1988.
- Scamozzi, Vincenzo (1615). *Dell'idea dell'architettura universale*. Venecia, s.i.
- Serlio, Sebastiano (1566). *I sette libri dell'architettura*. Venecia, s.i.

- Turriano, Juanelo (Pseudo) (Mss, s. XVI). *Los veintiun libros de los ingenios y de las máquinas*. Se ha consultado la edición a cargo de Juan Antonio García Diego, Madrid, Turner – Colegio de Caminos, Canales y Puertos, 1983.
- Vittone, Bernardo (1760). *Istruzioni elementari per indirizzo dei giovani allo Studio dell'Architettura*. Lugano, s.i.
- Vitruvio, Marco (1787). *Los diez libros de arquitectura*. Traducción y comentarios por José Ortiz y Sanz, Madrid, 1787. Se ha consultado la edición facsímil de la primera traducción completa del latín al castellano, Madrid, Ed. Akal, 1992.

Ediciones impresas escritas antes de 1900 y publicadas entonces o recientemente relacionadas con aspectos propios de la historia de Colombia

- André, Edouard (1884). *América pintoresca*. Barcelona, Montaner y Simón.
- Anónimo (1899). *Puente Alcantuz: documentos relacionados con su construcción y reseña de su inauguración*. Bogotá, Imprenta de La Luz.
- Boussingault, J. B. (1992). *Memorias*. Vol. III, Bogotá, Biblioteca del V Centenario, Colcultura. Edición prima en 1849.
- Cieza, Pedro (1971). *La crónica general del Perú*. Bogotá, Ediciones de la Revista Ximenez de Quesada.
- Codazzi, Agustín (1973). *Memorias*. Bogotá, Banco de la República.
- Hamilton, J. P. (1955). *Viajes por el interior de las provincias de Colombia*. 2 vols. Bogotá, Banco de la República. Edición prima en 1827.
- Hettner, Alfred (1976). *Viajes por los Andes colombianos (1882-1884)*. Bogotá, Publicación del Banco de la República. Edición prima en 1888.
- Holton, Isaac (1981). *La Nueva Granada: veinte meses en los Andes*. Bogotá, Banco de la República. Edición prima en 1857.
- Mollien, Gaspard-Théodore (1992). *Viaje por la República de Colombia en 1823*. Bogotá, Biblioteca del V Centenario, Colcultura. Edición prima en 1824.
- Mosquera, Tomás Cipriano (1866). *Compendio de geografía general, política, física y espacial de los Estados Unidos de Colombia*. Londres, Imprenta inglesa y extranjera de H. C. Panzer.
- Schenck, Friedrich von (1953). *Viajes por Antioquia en el año de 1880*. Bogotá, Banco de la República.
- Simón, Pedro (1981). *Noticias históricas de las conquistas de tierra firme en las Indias Occidentales*. Tomos V y VI. Bogotá, Biblioteca Banco Popular.
- Uribe, Julián (1994). *Memorias*. Prólogo y notas de Edgar Toro Sánchez. Bogotá, Banco de la República.

Fuentes secundarias relacionadas con las ciencias sociales y aspectos de la historia de Colombia (siglo XX)

Artículos de revistas y capítulos de libros

- Barona, Guido (1995). "Por el camino de Guanacas. El camino Santafé-Quito por Guanacas (Tocaima, Neiva, la Plata, Popayán)". En *Caminos reales de Colombia*. Bogotá, Fondo FEN, pp. 181-193.
- Bateman, Alfredo (s.a.). "Apuntamientos para la historia de la ingeniería colombiana". En *Ingeniería y Arquitectura*. Vol. II. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Nos. 14 y 15, pp. 40-41.
- _____ (1968). "El primer plan vial de la República". En *Anales de Ingeniería*. Vol. LXXVI. Bogotá, No. 758, segundo trimestre, pp. 57-61.
- Galindo, Jorge (2006). "Puentes sobre el río Cauca en el Departamento de Caldas". En *Boletín de Vías*. Vol. XXXII, No. 99. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, pp. 19-46.
- Herrera, Leonor; Cardale, Marianne & Bray, Warwick (1975). "El hombre y su medio ambiente en Calima. Altos Calima y Río Grande, Cordillera Occidental". En *Revista Colombiana de Antropología*. Vol. XXVI. Bogotá, Instituto Colombiano de Antropología, pp. 343-478.
- Hincapié, Ricardo (2000). "Puentes antiguos sobre el río Cali". En *Revista CITCE*, No. 3. Cali, Universidad del Valle, enero-junio; pp. 3-30.
- Langebaek, Carl Henrik (1995). "Los caminos aborígenes. Caminos, mercaderes y cacicazgos: circuitos de comunicaciones antes de la invasión española en Colombia". En *Caminos reales en Colombia*. Bogotá, Fondo FEN, 1995, pp. 35-45.
- Melo, Jorge Orlando (1995). "Los caminos reales: retrato viviente de una especie en extinción". En *Caminos reales de Colombia*. Bogotá, Fondo FEN; pp. 13-17.
- _____ (1997). "Las vicisitudes del modelo liberal (1850-1899)". En Ocampo, José Antonio (Ed). *Historia económica de Colombia*. Bogotá, TM Editores-Fedesarrollo, pp. 119-172.
- Molina, Luis Fernando (1995a). "De Cartago y Aburrá a Nóvita y Citará". En *Caminos reales en Colombia*. Bogotá, Fondo FEN; pp. 195-209.
- _____ (1995b). "Legislación colombiana sobre caminos de herradura: 1823-1905". En *Caminos reales en Colombia*. Bogotá, Fondo FEN, pp. 293-305.
- Quintanilla, Miguel Ángel (2002). "Tecnología y cultura". En Aibar, E. & Quintanilla, M. A. (Comp.). *Cultura tecnológica. Estudios de ciencia, tecnología y sociedad*. Barcelona, ICE/HORSORI, pp. 15-38.
- _____ (2005). "Cultura tecnológica e innovación". Capítulo manuscrito de un libro en preparación.

- Romoli, Kathleen (1974). "Nomenclatura y población indígenas de la antigua jurisdicción de Cali a mediados del siglo XVI". En *Revista Colombiana de Antropología*. Vol. XVI. Bogotá, Instituto Colombiano de Antropología, pp. 263-364.
- Safford, Frank (1978). "Orígenes de la profesión de ingeniero en Colombia". En *Ciencia y tecnología en Colombia*. Bogotá, Instituto Colombiano de Cultura, pp. 59-65.
- Sebastián, Santiago (1964). "Un arquitecto español del siglo XVIII en la Nueva Granada". En *Archivo español de arte*. No. 145. Madrid, pp. 67-74.
- Suárez, Omar (2003). "Cultura del agua". En *Seminario taller Río Cauca. Problemática ambiental y opciones de recuperación asociadas a las aguas residuales*. Cali, Gobernación del Valle del Cauca-CVC-Acuavalle-Comité río Cauca.
- Uribe, María Victoria (1995). "Camino de los Andes del sur". En *Camino reales en Colombia*. Bogotá, Fondo FEN, pp. 61-71.
- Valencia, Alonso (1996a). "De la sociedad de conquista a la sociedad de colonia". En *Historia del Gran Cauca*. Cali, Universidad del Valle, pp. 37-44.
- _____ (1996b). "La Economía caucana". En *Historia del Gran Cauca*. Cali, Universidad del Valle, pp. 119-128.
- Vásquez, Jaime (1996). "Geografía del suroccidente colombiano". En *Historia del Gran Cauca*. Cali, Universidad del Valle e Instituto de Estudios del Pacífico, pp. 9-16.
- Zuluaga, Francisco (1995). "Por las montañas del Quindío. El Camino real de Santafé hasta Quito, por la montaña del Quindío". En *Camino reales en Colombia*. Bogotá, Fondo FEN, pp. 157-179.

Libros

- Antei, Giorgio (1993). *Las obras y los días de Agustín Codazzi, 1793-1859*. Bogotá, Museo Nacional-Biblioteca Nacional.
- Aprile-Gnisset, Jacques (1991). *La ciudad colombiana*. Vol. I. Bogotá, Talleres Gráficos del Banco Popular.
- Aragón, Arcesio (1925). *La Universidad del Cauca. Monografía histórica*. Popayán, Imprenta Oficial.
- Arango, Silvia (1989). *Historia de la arquitectura colombiana*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Arboleda, Gustavo (1956). *Historia de Cali. Desde los orígenes de la ciudad hasta la expiración del período colonial*. Cali, Biblioteca de la Universidad del Valle.
- Argüelles, Mariano (1946). *La carretera al mar*. Cali, Imprenta Departamental.

- Banderas, Pedro Antonio (1943). *Diccionario geográfico, industrial y agrícola del Valle del Cauca*. Buenos Aires, Instituto del Libro.
- Bateman, Alfredo (1972). *Páginas para la historia de la ingeniería colombiana*. Bogotá, Ed. Kelly.
- Bijker, Wiebe E., Hughes, Thomas P., Pinch, Trevor (eds.) (1987). *The social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*. Cambridge (MA), MIT Press.
- Buenaventura, Manuel María (1957). *Del Cali que se fue*. Cali, Imprenta Departamental.
- Bunge, Mario (1986). *Intuición y razón*. Madrid, Tecnos.
- _____ (1988). *La ciencia, su método y su filosofía*. Buenos Aires, Ed. Siglo XXI.
- Collins, Peter (1970). *Los ideales de la arquitectura moderna (1750-1950)*. Barcelona, Ed. Gustavo Gili.
- Colmenares, Germán (1997). *Historia económica y social de Colombia II. Popayán, una sociedad esclavista 1680-1800*. Cali, TM Editores-Universidad del Valle-Banco de la República y Colciencias.
- _____ (1983). *Cali: terratenientes, mineros y comerciantes. Siglo XVIII. Sociedad y economía en el Valle del Cauca*. Tomo I. Cali, Universidad del Valle.
- Eder, Phanor (1959). *El fundador*. Bogotá, Ed. Antares.
- Friede, Juan (1982). *Los quimbayas. Bajo la dominación española. Estudio documental (1539-1810)*. Bogotá, Carlos Valencia Editores.
- Galindo, Jorge (2000). *El conocimiento constructivo de los ingenieros militares de los siglos XVI a XVIII*. Cali, Universidad del Valle.
- _____ (2003). *Cruzando el Cauca. Pasos y puentes sobre el río Cauca en el Departamento del Valle hasta la primera mitad del siglo XX*. Cali, Gobernación del Valle del Cauca.
- Gille, Bertrand (1999). *Introducción a la historia de las técnicas*. Barcelona, Crítica.
- González, José Luis (1993). *El legado oculto de Vitruvio*. Barcelona, Ed. Gustavo Gili.
- Gutiérrez, Ramón (1972). *Notas para una bibliografía hispanoamericana de arquitectura e ingeniería*. Resistencia, UNNE.
- _____ Vallín, Rodolfo & Perfetti, Verónica (1999). *Fray Domingo de Petrés y su obra arquitectónica en Colombia*. Bogotá, Banco de la República y El Áncora Editores.
- Guzmán, Ángela Inés (2002). *La ciudad del río. Honda*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Artes.
- Kagan, Richard (2000). *Urban images of the Hispanic World. 1493-1793*. Londres, Yale University Press.

- Martínez, Frédéric (2001). *El nacionalismo cosmopolita. La referencia europea en la construcción nacional en Colombia. 1845-1900*. Bogotá, Banco de la República e Instituto Francés de Estudios Andinos.
- Mayor, Alberto (2003). *Cabezas duras y dedos inteligentes. Estilo de vida y cultura técnica de los artesanos colombianos del siglo XIX*. Medellín, Hombre Nuevo Editores.
- Niño, Carlos (1991). *Arquitectura y Estado*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Obregón, Diana (1992). *Sociedades científicas en Colombia*. Bogotá, Banco de la República.
- Ospina, Luis (1955). *Industria y protección en Colombia. 1810-1930*. Bogotá, Ed. Santafé.
- OSSO-Observatorio Sismológico del Suroccidente (2002). *Pacífico y valle del alto Cauca* (Mapa Esc. 1:250.000). Cali, CVC y Oficina de Planeación.
- Ortega, Alfredo (1923). *Ferrocarriles colombianos*. Bogotá, Imprenta Nacional.
- Ortiz, Sergio Elías (1948). *Crónicas de la ciudad de San Joan de Pasto*. Pasto, Imprenta Departamental.
- Patiño, Víctor Manuel (1991). *Historia de la cultura material en la América Equinoccial*. Tomo III. Bogotá, Instituto Caro y Cuervo.
- Paz, Pedro Antonio (1997). *Historia del puente del Humilladero de Popayán*. Popayán, Imprenta Departamental.
- Pérez, Alberto (1980). *La génesis y la superación del funcionalismo en arquitectura*. México, Ed. Limusa.
- Picon, Antoine (1989). *Architectes et ingénieurs au siècle des lumières*. Marsella, Parenthèses.
- Poveda, Gabriel (1993). *Ingeniería e historia de las técnicas*. Vols. I y II. Bogotá, Colciencias.
- Ramírez, Carlos (2002). *Caracterización y modelización matemática del río Cauca*. Tomo VIII: Tramo Salvajina-La Virginia. Cali, Universidad del Valle y Corporación Autónoma Regional del Cauca.
- Rodríguez, Carlos Armando (2002). *El Valle del Cauca prehispánico*. Cali, Universidad del Valle.
- Salazar, Jaime (2000). *De la mula al camión. Apuntes para una historia del transporte en Colombia*. Bogotá, TM Editores.
- Sanmartín, J., Cutcliffe, S. H., Goldman, S. L. & Medina, M. (eds.) (1992). *Estudios sobre sociedad y tecnología*. Barcelona, Anthopos.
- Silva, Renán (2002). *Los ilustrados de la Nueva Granada. 1760-1808. Genealogía de una comunidad de interpretación*. Medellín, Fondo Editorial EAFIT y Banco de la República.
- Smith, M. R., & Marx, L. (eds.) (1997). *Historia y determinismo tecnológico*. Madrid, Alianza.

- Sokal, Alan & Bricmont, Jean (1999). *Imposturas intelectuales*. Barcelona, Paidós.
- Tamayo, Eneyda (1980). *Los caminos coloniales en el Valle del Cauca*. Cali, Universidad del Valle, tesis inédita.
- Téllez, Germán (1996). *Popayán. Guía ciudad histórica*. Bogotá, Colcultura.
- Tovar, Hermes (1993). *Relaciones y visitas a los Andes. S. XVI*. Bogotá, Colcultura-Instituto de Cultura Hispánica.
- Vérin, Hélène (1993). *La gloire des ingénieurs. L'intelligence technique du XVI au XVIII siècle*. París, Ed. Albin Michel.
- West, Robert (1952). *Colonial placer mining in Colombia*, Michigan, Louisiana State University Press.

Fuentes secundarias sobre aspectos técnicos (siglo XX)

Artículos de revistas, memorias y papers

- Antoine, A. (1995). "Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory". En *Int. J. Solids Structures*, 2(32), pp. 137-163.
- Begimgil, M. (1997). "Behaviour of restrained 1,25 m span model masonry arch bridge". En *Arch Bridges*. Londres, Thomas Telford.
- Bicanic, N., Stirling, C. & Pearce, C. J. (2002). "Discontinuous Modelling of Structural Masonry". En *Fifth World Congress on Computational Mechanics*. Viena, Rammerstorfer & Eberhardsteiner Eds.
- Block, Philippe (2005). *Equilibrium systems. Studies in Masonry Structure*. Tesis de Maestría. Boston, MIT.
- Boothby, T., Domalik, D. & Dalal, V. (1998). "Service load response of masonry arch bridges". En *J. Struct. Engng.*, 124(1), pp. 17-23.
- Buhan, P. & Felice, G. (1997). "A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry". En *J. Mech. Phys. Solids*, 7(45), pp. 1085-1104.
- Carbone, V. I. & Codegone, M. (2005). "Homogenization Process of Stratified Masonry". En *Mathematical and Computer Modelling*, 42, pp. 375-380.
- Cavicchi, A. & Gambarotta, L. (2005). "Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction". En *Enginnering Structures*, 27, pp. 605-615.
- Clemente, Juan José (s.a.). "Evaluación de puentes de arcos de fábrica: introducción al análisis con MEF". Disponible en http://www.pantecnia.es/publicaciones/Puentes_arco_fabrica_MEF.pdf
- Fanning, P. J. & Boothby, T. E. (2001). "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges". En *Computers & Structures*, 79, pp. 2645-2662.

- _____. Boothby, T. E. & Roberts, B. J. (2001). "Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment". En *Construction and Building Materials*, 15, pp. 51-60.
- Ford, T. E., Augarde, C. E. & Tuxford, S. S. (2003). "Modelling masonry arch bridges using commercial finite element software". Disponible en <http://dur.ac.uk/charles.augarde/pubs/c10.pdf>
- Frunzio G., Monaco M. & Gesualdo A. (2001). "3D FEM analysis of a Roman arch bridge". En *Historical Constructions*. Lourenço, P.B. & Roca P. (Eds.), Guimarães, Universidad de Minho, pp. 591-597.
- Gilbert, Mathew (1993). *The behaviour of masonry arch bridges containing defects*. Tesis doctoral. Universidad de Manchester.
- _____. & Melbourne, C. (1994). "Rigid-block analysis of masonry structures", en *The Structural Engineering*, 72, pp. 356-361.
- González, José Luis (1996). "Los tratados históricos como documentos para la historia de la construcción". En *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, CEHOPU-CEDEX-Instituto Juan de Herrera, pp. 254-260.
- Huerta, Santiago (1998). "Estática y geometría: el proyecto de puentes de fábrica en los siglos XV al XVIII". En *Actas del segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, CEHOPU-CEDEX e Instituto Juan de Herrera, pp. 513-526.
- Huerta, Santiago & De la Cuerda, Rafael (1998). "La teoría de bóvedas en el siglo XVIII: la contribución de Philippe de la Hire". En *Actas del segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, CEHOPU-CEDEX e Instituto Juan de Herrera, pp. 233-244.
- Hughes, T. G. & Blackler, M. J. (1997). "A review of the UK masonry arch assessment methods". En *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 122, pp. 305-315.
- Hughes. T. G., Hee, S. C. & Soms, E. (2002). "Mechanism analysis of single span masonry arch bridges using a spreadsheet". En *Proc. Inst. Civ. Engrs*, 152 (4), pp. 341-350.
- Hunt, B. (2003). "Scour Practice in the United States". En *Curso de Formação avançada sobre infraescavação e durabilidade de pontes*. Guimarães, Universidad de Minho.
- López, Gema (1996). "Proyecto y cálculo de cimbras en el siglo XVIII". En *Actas del primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, CEHOPU-CEDEX e Instituto Juan de Herrera, pp. 313-321.
- Martins, João Paulo (2004). *Análise de pontes de alvenaria em arco. Aplicação à ponte do Soeiro*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil. Guimarães, Universidad de Minho.
- Mexe (1963). "Military load classification of civil bridges". En *Solog Study B.38*. Christchurch, Hampshire, UK.

- Molano, M. A. (2005). *Rehabilitación sísmica de mampostería no estructural mediante listones de madera*. Tesis de Maestría. Bogotá, Universidad Javeriana. Disponible en <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis125.pdf>
- Nascé, V. (1986). "Atti e rassegna tecnica società ingegneri e architetti in Torino". En *Nuova Serie*, A. 40, N. 3-4, pp. 63-70.
- Page, J., Ives, D. A. & Ashhurst, D. (1991). "Deterioration and repair of masonry arch bridges". En *Proc. Ninth Intl Brick/Block masonry Confer*, Berlín.
- Ponniah, D. A., Fairfield, C. A. & Prentice, D. J. (1997). "Fill stresses in a new brick arch bridge subject to heavy axle-load tests". En *Proc. Inst. Civil Engineers: Struct Buildings*, 123, pp. 173-185.
- _____ & Premtoce, D. J. (1999). "Long term monitoring of fill pressures in a new brickwork arch bridge". En *Construction and Building Materials*, 13, pp. 159-167.
- Roberts, B. J. (1999). *Transverse Behaviour of Masonry Arch Bridges*. Tesis de Maestría. The Pennsylvania State University.
- Roca, P., Molins, C., González, J. L. & Casals, A. (1995). "Análisis of two medieval stone masonry bridges". En *Structural Studies of Historical Buildings*. Boston, Computational Mechanics Publications.
- Royles, D. & Hendry, A. W. (1991). "Models tests of masonry arches". En *Proc. Inst. Civ. Engrs Part 2*, 91 (6), pp. 299-321.
- Towler, K. D. S. (1985). "Applications of non-linear finite element codes to masonry arches". En *Proc. 2nd International Conference on Civil and Structural Engineering Computing*.

Libros y manuales

- ACIS (2002). NSR-98. *Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente*. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- ANSYS (1998). *ANSYS Manual Set*. Canonsburg (USA), ANSYS Inc.
- ASTM (2005). *ASTM C20-00 Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, USA.
- Benvenuto, Edoardo (1981). *La scienze delle costruzione e il suo sviluppo storico*. Florencia, Ed. Sansoni.
- Crisfield, M. A. (1985). *Finite element and mechanism methods for the analysis of masonry and brickwork arches*. Londres, Transport and Road Research Laboratory.
- Davis, R. O. & Selvadurai, A. P. S. (1996). *Elasticity and Geomechanics*. Cambridge, Cambridge University Press.

- Eurocode (1995). *Eurocode 6: ENV 1996-1-1*. Londres, EC.
- González, Antoni (1999). *La restauración objetiva. Método SCCM de restauración monumental*. 2 vol. Barcelona, Ed. Diputación de Barcelona.
- González, José Luis; Casals, Albert & Falcones, Alejandro (1997). *Claves del construir arquitectónico*. Barcelona, Ed. Gustavo Gili.
- Heyman, Jacques (1982). *The masonry arch*. England, Ellis Horwood Series in Engineering Science.
- _____ (1995a). *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture*. Cambridge, Cambridge University Press.
- _____ (1995b). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Colección de ensayos. Madrid, Instituto Juan de Herrera-CEHOPU.
- _____ (2001). *La ciencia de las estructuras*. Madrid, Instituto Juan de Herrera-Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- Huerta, Santiago (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid, Instituto Juan de Herrera.
- Icontec (2000). NTC 682: *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en frío y el módulo de ruptura de refractarios*. Bogotá, Icontec.
- Icontec (2002). NTC 674: *Método de ensayo para determinar porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente por agua en ebullición de ladrillos refractarios y piezas refractarias quemadas*. Bogotá, Icontec.
- Mark, Robert (Ed.) (2002). *Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica*. Madrid, Ed. Akal.
- Page, J. (1987). *Load tests to collapse on two arch bridges at Preston, Shropshire and Prestwood*. Staffordshire, Crowthorne (UK), Transport Research Laboratory.
- Page, J. (1993). *Masonry Arch Bridges. Her Majesty's Stationery Office*. Londres, T.T. Eds.
- Silviero, Enzo, Casucci, Stefania & Cecchi, Antonella (1995). *Il ponte e l'architettura*. Milano, Città Studi Edizioni.
- Sowden, Maurice (1990). *The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structure*. London, E. & F.N. Spon.
- Straub, Hans (1949). *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. Basel, Birkhäuser Verlag.

FICHA TÉCNICA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Investigador principal

Arq. Jorge Alberto Galindo Díaz

Profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales
jagalindod@unal.edu.co

Co investigador

Ing. Jairo Andrés Paredes

Profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales
japaredesl@unal.edu.co

Apoyo técnico

Ing. Óscar Correa Calle

Laboratorio de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Fís. Alfonso Devia Cubillos

Laboratorio de Física del Plasma, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Asistentes de investigación

Marisol Caicedo Muñoz, arquitecta constructora

John Carlos Guzmán Suárez, arquitecto

Diego Fernando Mora, ingeniero civil

Edwin Sotelo Zúñiga, estudiante de arquitectura

Dianne Valencia, administradora de sistemas informáticos

Auxiliares de investigación

John Fredy Osorio, estudiante ingeniería civil

Christian David Murillo, estudiante ingeniería civil

Alejandro Trujillo Rivas, estudiante ingeniería civil

Andrés Mauricio Muñoz, estudiante de ingeniería física

Financiación

Dirección de Investigaciones de Manizales (DIMA)
Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales



Puentes de
ARCO DE LADRILLO
en la región del alto Cauca, Colombia

Una tradición constructiva olvidada
(1739-1920)

Se terminó de imprimir en los talleres gráficos de Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia en el mes de febrero de 2008. En esta edición se empleó papel Propalibros beige de 70 g, se utilizaron caracteres Warnock Pro 10.5/13 puntos, en un formato de 16,5 x 24 cm.