



Evaluation of the impact of sediment yield on the sewerage system of Carrera 68 with Calle 10 in Cali - Valle del Cauca

Arbey Eduardo Alvear Daza

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2023

Evaluación del impacto de la producción de sedimentos sobre el sistema de alcantarillado de la carrera 68 con calle 10 de Cali – valle del cauca

Arbey Eduardo Alvear Daza

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Directora:

PhD., Jeannette Zambrano Nájera

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2023

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	VII
Lista de tablas	IX
1 INTRODUCCIÓN	15
1.1 PROBLEMA CENTRAL	18
1.2 ANTECEDENTES.....	25
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	29
2 OBJETIVOS.....	33
2.1 OBJETIVO GENERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
3 MARCO TEÓRICO	34
3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	34
3.2 EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS URBANAS	37
3.2.1 Mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica.....	38
3.2.2 Procesos hidrológicos e hidráulicos	41
3.3 MODELACIÓN HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA.....	46
3.3.1 Tipos de modelos.....	47
3.4 MODELO KINEROS2	50
3.4.1 Modelo hidrológico de KINEROS2	51
3.4.2 Modelo sedimentológico de KINEROS2.....	62
4 METODOLOGÍA	67
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	67
4.1.1 Información climatológica	75
4.1.2 Mapas de geología.....	83
4.1.3 Mapas de cobertura vegetal y usos del suelo.....	91
4.1.4 Mapas de pendientes	95
4.1.5 Condiciones hidrológicas	95
4.2 SIMULACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA.....	97
4.2.1 Delimitación de la cuenca de estudio	99
1.1.1 Discretización de la cuenca de estudio	100
4.2.2 Parametrización de la cuenca	103
4.2.3 Calibración y validación del modelo	110
4.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO/HIDRÁULICO.....	122
4.4 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	123

5	RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN	124
5.1	CONDICIONES HIDROLÓGICAS E HIDRÁULICAS	124
5.2	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE SEDIMENTABILIDAD	128
5.3	RESULTADOS PRODUCCIÓN SEDIMENTOS.....	135
5.4	ANÁLISIS DE LA DEPOSITACIÓN DE SEDIMENTOS	138
5.5	PLANTEAR Y ANALIZAR ESCENARIOS PARA EL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA.....	150
6	CONCLUSIONES.....	159
7	BIBLIOGRAFÍA.....	163

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema árbol de problema con enfoque hacia las causas	18
Figura 2. Esquema árbol de problema con enfoque hacia los efectos generados.....	20
Figura 3. Colmatación de tramo de red de alcantarillado y mantenimientos sobre el sistema de drenaje Fuente: EMCALI (2019)	21
Figura 4. Red hídrica de la zona ladera de Santiago de Cali.	22
Figura 5. Ubicación del área de estudio.....	23
Figura 6. Ubicación del Desarenador, Estructura de Separación y Tramo de red de alcantarillado. Fuente: Elaboración propia mediante software AutoCAD 2020.....	24
Figura 7. Esquema de la separación y transporte de sedimentos por acción de la lluvia	38
Figura 8. Esquema de los procesos involucrados en un modelo perceptual de la hidrología en una ladera. (a) Durante la ocurrencia de un evento, (b) Entre eventos.....	43
Figura 9. Cuenca de drenaje como sistema hidrológico.....	47
Figura 10. Representación esquemática del procedimiento de interpolación de la precipitación en kinos2. Fuente: (Semmens et al., 2007)	52
Figura 11. Esquema de flujo superficial	56
Figura 12. Esquema de diferencias finitas para la solución de la ecuación de Onda Cinemática	59
Figura 13. Planos idealizados con flujo superficial para efectuar las modelaciones.....	62
Figura 14. Tipos de flujo asociados a la microtopografía	64
Figura 15. Localización del área de estudio respecto al municipio de Santiago de Cali y al departamento del Valle del Cauca. Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.	67
Figura 16. Mapa de distribución de las 22 comunas en el perímetro urbano de la ciudad de Santiago de Cali. Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.	68
Figura 17. Delimitación de los subsistemas de drenaje en la zona urbana de Santiago de Cali. Fuente: (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016).....	70
Figura 18. Área de la subcuenca de estudio dentro de los límites sanitarios y urbanos de la ciudad. Fuente: Elaboración propia mediante software AutoCAD 2020.	71
Figura 19. Microcuencas (a) quebrada la Guillermina y (b) quebrada Hospital	72
Figura 20. Ubicación de los desarenadores del área de estudio.....	73
Figura 21. (a) Desarenador Alto Refugio, (b) Desarenador Lourdes, (c) Desarenador Nápoles y (d) Desarenador Limonar Autopista Sur.....	74
Figura 22. Estaciones de la cuenca del río Meléndez y río Cañaveralejo	76

Figura 23. Precipitación promedio mensual estación Siloé para el periodo (2014 a 2020)	77
Figura 24. Precipitación máxima en 24 horas en la estación Siloé	78
Figura 25. Diagrama de cajas y alambres para el parámetro Precipitación (mm), muestra de datos total periodo de análisis 6 años.	79
Figura 26. Estadística descriptiva registro de precipitación anual	80
Figura 27. Comportamiento del registro de precipitación (mm) mes a mes del periodo 2014 a 2019; (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, (d) 2017, (e) 2018 y (f) 2019	82
Figura 28. Formaciones geológicas del área de estudio	84
Figura 29. Formaciones geológicas del área de estudio	91
Figura 30. Cobertura y usos del suelo del área de estudio	92
Figura 31. (a) Suelo desnudo del cerro de La Bandera, (b) Actividades de recuperación de la cobertura vegetal, (c) consolidación de las acciones de mejoramiento de la cobertura del suelo.	94
Figura 32. Mapa de pendientes del área de estudio	95
Figura 33. Esquema metodológico del escenario evaluado	98
Figura 34. Archivos utilizados y generados para la definición de la delineación de la cuenca de estudio, (a) modelo digital de elevación, (b) malla de dirección de flujo, (c) malla de acumulación de flujo.	100
Figura 35. Ortofotografía de la cuenca de estudio	101
Figura 36. Discretización de la cuenca de estudio	102
Figura 37. Discretización cuenca de estudio.	103
Figura 38. Parametrización de la cuenca de estudio.	107
Figura 39. Ubicación de los planos tributarios a los desarenadores en relación con el tipo de suelo de la cuenca.	110
Figura 40. Ubicación del tramo de canal afluente al desarenador Nápoles que cuenta con sensor de niveles.	111
Figura 41. Estructura del desarenador Nápoles y material excedente sobre el canal.	121
Figura 42. Frecuencias altimétricas	126
Figura 43. Curva hipsométrica	127
Figura 44. Desarenador Nápoles, excedentes de material sobre el canal.	132
Figura 45. Redes de alcantarillado con pendientes bajas	133
Figura 46. Representación gráfica de KINEROS2 del caudal generado en el evento de precipitación del día 8/10/2018 en los planos y canales de la cuenca de estudio	135
Figura 47. Representación gráfica de KINEROS 2 de la cantidad de sedimento producido en el evento de precipitación del día 8/10/2018 en los planos (arriba) y detalle de las áreas de mayor producción (abajo)	136
Figura 48. Representación gráfica de KINEROS 2 de la cantidad de sedimento producido y transportado por los canales en el evento de precipitación del día 8/10/2018	137
Figura 49. Gráfica de superficie, variables volumen (m ³), precipitación (mm) y Duración (h)	147
Figura 50. Modificación de la cobertura y usos del suelo de la cuenca de estudio	152

Figura 51. Resultado de la tasa de generación de sedimento en el canal recolector de la microcuenca del área de extracción minera, sin modificación y con modificación del tipo de cobertura del suelo	154
Figura 52. Área tributaria y ubicación de la nueva unidad de retención de sólidos propuesta	155

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores interpretativos de la densidad de drenaje	35
Tabla 2. Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Meléndez y Cañaveralejo	75
Tabla 3. Precipitaciones máximas en 24 horas periodo 2014 a 2019.....	78
Tabla 4. Estadística descriptiva registro total de datos de precipitación	79
Tabla 5. Estadística descriptiva registro anual de datos de precipitación (mm).....	80
Tabla 6. Estadística descriptiva rango de precipitaciones máximas	81
Tabla 7. Características geológicas, de suelos y geomorfológicas del área de estudio..	90
Tabla 8. Características de la cuenca de estudio	102
Tabla 9. Parámetros generales del suelo para el componente hidrosedimentológico....	105
Tabla 10. Parámetros del modelo en K2 utilizados en las áreas tributarias para los desarenadores Alto Refugio y Lourdes.....	107
Tabla 11. Parámetros del modelo en Kineros utilizados en las áreas tributarias para los desarenadores Alto Nápoles y Limonar Autopista Sur.....	108
Tabla 12. Eventos de precipitación utilizados para el ejercicio de calibración del modelo	111
Tabla 13. Eventos de precipitación utilizados para el ejercicio de validación del modelo	112
Tabla 14. Resultados de la calibración de caudales líquidos obtenidos del modelo KINEROS 2 en el canal tributario al desarenador Nápoles.	112
Tabla 15. Resultados de la validación de caudales líquidos obtenidos del modelo KINEROS 2 en el canal tributario al desarenador Nápoles.	113
Tabla 16. Registro de volumen de sedimento retirado utilizado para la calibración de flujo de sólidos	114
Tabla 17. Registro de volumen de sedimento retirado utilizado para la validación de flujo de sólidos	114
Tabla 18. Resultados de la calibración del modelo de generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones máximas	116

Tabla 19. Resultados de la validación del modelo para la estimación de generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones máximas	118
Tabla 20. Resultados del modelo para la generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones bajas.....	121
Tabla 21. Parámetros morfométricos de la cuenca de estudio.....	124
Tabla 22. Resultados Tiempo de Concentración	125
Tabla 23. Cotas y área de la cuenca para representación de la Curva Hipsométrica ...	127
Tabla 24. Dimensiones de los desarenadores que hacen parte del sistema de drenaje de la cuenca de estudio	128
Tabla 25. Caudales medios y máximos afluentes para cada desarenador simulados con K2	128
Tabla 26. Parámetros de diseño del desarenador	129
Tabla 27. Chequeo de parámetros de operación para los tramos 1 y 2	134
Tabla 28. Cantidad de sedimento depositado en los canales tributarios a cada desarenador para los eventos de precipitación utilizados en la calibración del modelo.	139
Tabla 29. Cantidad de sedimento depositado en los canales tributarios a cada desarenador para los eventos de precipitación utilizados en la validación del modelo. .	140
Tabla 30. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el Desarenador Alto Refugio	143
Tabla 31. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Lourdes	144
Tabla 32. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Nápoles.....	145
Tabla 33. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Limonar Autopista Sur	145
Tabla 34. Balance de sedimentos generados a partir de los datos de precipitación utilizados en la calibración del modelo	148
Tabla 35. Balance de sedimentos generados a partir de los datos de precipitación utilizados en la validación del modelo	149
Tabla 36. Cantidad de sedimento generada al modificar el tipo de cobertura del suelo de las áreas de extracción minera	153
Tabla 37. Cantidad de sedimento aportada por el área tributaria asociada a la nueva unidad de retención de sólidos propuesta	156
Tabla 38. Caudales generados por las áreas tributarias de los nuevos desarenadores propuestos	157
Tabla 39. Parámetros de diseño y dimensiones de la nueva estructura de retención de sedimentos	157

RESUMEN

La erosión del suelo provocada por la escorrentía superficial es una de las formas más generalizada de degradación del suelo en todo el mundo, este tipo de erosión ha sido una amenaza importante para la calidad y productividad del suelo, agricultura sostenible y los ciclos globales de carbono, nitrógeno y fósforo. En las zonas urbanas el impacto también es muy fuerte y la impermeabilización del suelo es uno de los principales agentes detonantes ya que aumenta los volúmenes de escorrentía, así como las velocidades de flujo, con lo que el suelo erodable se incrementa.

Estos procesos del arrastre y transporte de sedimento generan impactos sobre la prestación del servicio de transporte y conducción del agua residual y pluvial, haciendo insuficiente su operación, incrementando las labores de mantenimientos de las redes de drenaje, y por tanto generando un aumento en los costos de operación del servicio de recolección de los flujos líquidos y sólidos de la ciudad.

Las condiciones de colmatación de los tramos de red y los mantenimientos realizados a las unidades en este estado generan vertimientos de agua residual hacia las fuentes naturales más cercanas, debido a, que el alcantarillado en el Distrito Especial de Cali es de tipo combinado. Para el caso objeto de estudio, la pérdida de la capacidad hidráulica en las estructuras ubicadas en la carrera 68 con calle 10 deriva en un vertimiento de agua residual hacia el canal Autopista 3, que a su vez descarga sus flujos sobre el río Cañaveralejo. En este documento se muestra los resultados de la modelación de producción de sedimentos en una cuenca urbana mediante el uso del software KINEROS2, con el objetivo de evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del sistema de drenaje.

Una vez estimada la producción de sedimentos, se evaluó el comportamiento hidráulico y de sedimentación de las estructuras retenedoras de sólidos, así como la respuesta de las unidades posteriores, y se plantearon acciones para el control de la generación de sedimentos a nivel de cuenca.

De los resultados del modelo KINEROS 2 es importante señalar que las áreas donde se muestra la mayor cantidad de sedimento producido son las zonas de ladera con mayor concentración de asentamientos humanos de desarrollo incompleto – AHDI y zonas de extracción minera.

Adicionalmente, se encuentra que la empresa prestadora de servicios de acueducto y alcantarillado, deberá atender con diligencia la respuesta del servicio de mantenimientos ante eventos de precipitación con magnitudes superiores a 20 mm y con una intensidad superior a 20 mm/h, ya que la cantidad de sedimento generado asociada a este tipo de precipitaciones genera presiones sobre la capacidad del sistema.

Finalmente, al modificar los parámetros asociados a la cobertura y uso del suelo de las áreas identificadas como zonas de extracción minera, se muestra una reducción significativa en la cantidad de sedimento generada. Se evaluaron las condiciones de generación de sedimento y escorrentía para establecer los parámetros de diseño de dos nuevos desarenadores en el área tributaria del desarenador Nápoles.

Palabras Claves: Erosión del suelo, producción de sedimentos, gestión de sedimentos, erosión hídrica.

SUMMARY

Soil erosion caused by surface runoff is one of the most widespread forms of soil degradation worldwide, this type of erosion has been a major threat to soil quality and productivity, sustainable agriculture and global carbon, nitrogen and phosphorus cycles. In urban areas the impact is also very strong and soil sealing is one of the main triggering agents as it increases runoff volumes as well as flow velocities, thus increasing erodible soil.

The processes of sediment entrainment and transport generate impacts on the provision of wastewater and rainwater transport and conveyance services, making their operation insufficient, increasing maintenance work on the drainage networks, and therefore generating an increase in the operating costs of the city's liquid and solid waste collection service.

The clogging conditions of the network sections and the maintenance performed on the units in this circumstance, generates wastewater discharges to the nearest natural sources, due to the fact that the sewage system in the Special District of Cali is of the combined type. In the case under study, the loss of hydraulic capacity in the structures located on Carrera 68 and Calle 10 results in the discharge of wastewater into the Autopista 3 channel, which discharges its flows into the Cañaveralejo River. This document shows the results of the modeling of sediment production in an urban watershed using KINEROS2 software, with the objective of evaluating the hydrological and hydraulic conditions of the drainage system.

Once the sediment production was estimated, the hydraulic and sedimentation behavior of the solid retaining structures was evaluated, as well as the response of the downstream units, and actions were proposed to control sediment generation at the basin level.

From the results of the KINEROS 2 model, it is important to point out that the areas with the highest amount of sediment produced are the hillside areas with the highest concentration of human settlements of incomplete development (AHDl in spanish) and mining extraction areas.

Additionally, it is found that the water and sewage service provider must diligently attend to the response of the maintenance service to rainfall events with magnitudes greater than 20 mm and with an intensity greater than 20 mm/h, since the amount of sediment generated associated with this type of precipitation generates pressure on the capacity of the system.

Finally, by modifying the parameters associated with land cover and land use in the areas identified as mining extraction zones, a significant reduction in the amount of sediment generated is shown. Sediment and runoff generation conditions were evaluated to establish the design parameters for two new desanders in the tributary area to the Nápoles desander.

Keywords: Soil erosion, sediment yield, sediment management, wáter erosion

1 INTRODUCCIÓN

En Hábitat, conferencia mundial sobre población y cifras de la población urbana mundial se mencionó que se preveía para el 2015 en el mundo unas 360 aglomeraciones urbanas con una población superior a un millón de habitantes. Al respecto, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (2006) señaló que en América Latina y El Caribe, la población pasó de 166 millones de personas en 1950 a 513 millones en el 2000 y se espera que crezca a más de 800 millones en el 2050 (Ocampo, 2017).

Según el Plan de Desarrollo de Santiago de Cali 1998-2010, la ciudad tenía en 1998 una población de 2.017.533 habitantes que equivale a la mitad de la población del departamento y al 5 % del país, en un territorio de 56.400 hectáreas que representa el 2.6 % de la extensión del Departamento y al 5 % de la del país, constituyendo un conglomerado netamente urbano con el 98.2 % de su población residente en la zona urbana y apenas un 1.8 % en el área rural (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 1998).

Este marcado crecimiento y concentración en la zona urbana presenta retos en el componente ambiental y de prestación de servicios. Para la ciudad de Cali el crecimiento poblacional se ha presentado de manera acelerada hacia la zona de ladera, conformándose diferentes asentamientos humanos de desarrollo incompleto (AHDI), urbanizaciones de carácter legal y complejos comerciales (Peña & Ramírez, 2011).

La falta de control en el proceso de urbanización que se ha dado de manera no planificada ha generado como resultado un gran impacto sobre las redes de drenaje a nivel de morfología de cauces y de la calidad del flujo, generando a su vez la pérdida parcial o total de las corrientes hídricas, las cuales, terminan canalizadas o sus franjas de protección ocupadas. Situación que en la zona urbana del municipio de Cali es especialmente compleja (ACODAL, 2016).

Además, los sistemas de drenaje de ciudades con características geográficas particulares, en donde interactúan áreas de drenaje de ladera y áreas receptoras planas presentan un

desafío en el componente hidráulico y de gestión de flujos tanto sanitarios como de escorrentía, debido a, las constantes variaciones del entorno, las cuales suponen cambios en cuanto al transporte del agua de escorrentía y sedimento. Estos componentes, pertenecen a un sistema complejo y dinámico, donde la interacción cuenca hidrográfica y las alteraciones constantes que en esta suceden, están relacionadas con actividades humanas, que resultan en impactos sobre las dinámicas hídrica e hidráulica, y alteraciones en el uso del suelo de la cuenca (Zambrano, 2015; Korgaonkar et al., 2018).

En la ciudad de Cali, específicamente en las comunas 17, 18, 19, y 20, el tipo de alcantarillado es combinado, estas áreas comparten una topografía específica de interrelación entre zona de la ladera y parte plana de la ciudad, es común encontrar que las rondas hídricas presentan una intervención parcial o total, lo que modifica la respuesta hidrológica frente a una determinada lluvia, aumentando la velocidad del agua hacia aguas abajo de la cuenca, incrementando el volumen de escorrentía y el caudal máximo.

Por otra parte, los volúmenes de sólidos también se han incrementado lo que ha conllevado a direccionar los flujos de sólidos generados por la cuenca de manera instantánea a las unidades de control de la red de drenaje en la zona de bajas pendientes. Estos procesos de arrastre y transporte de sedimento generan impactos sobre la prestación del servicio de transporte y conducción del agua residual y pluvial haciendo insuficiente su operación.

Existe la necesidad inherente de investigaciones que permitan realizar un balance de sedimentos a escala de cuenca, en las cuales se formulen y desarrollen sobre cada contexto estrategias efectivas de gestión de los sedimentos. El presente documento tiene como fin evaluar las condiciones hidrológicas, hidráulicas y de producción de sedimentos en un punto específico del sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, en el cual, se pueden evidenciar los efectos de las situaciones ambientales descritas anteriormente sobre el sistema de drenaje y las unidades que lo componen.

Con el objetivo de plantear alternativas para el control de sedimentos generados en la subcuenca de estudio, que afectan el funcionamiento del sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, en los componentes y tramo de alcantarillado ubicado entre la carrera 68 a 65 de la Avenida Autopista sur.

Se presenta como propuesta metodológica estimar la producción de sedimentos de la subcuenca tributaria al sistema de drenaje objeto de estudio y evaluar las condiciones

hidrológicas e hidráulicas de la subcuenca de interés mediante el uso del software KINEROS2.

Una vez estimada la producción de sedimentos, se evaluará el comportamiento hidráulico y de sedimentabilidad de la estructura retenedora de sólidos, la respuesta con las unidades posteriores, también se plantearán y analizarán escenarios para el control de la producción de sedimentos a nivel de cuenca.

1.1 PROBLEMA CENTRAL

En el siguiente esquema se muestra el árbol de problema, técnica utilizada en este trabajo final, con el fin de analizar situaciones existentes para la identificación del problema focal y la formulación de sus soluciones, determinando las causas y efectos del problema.

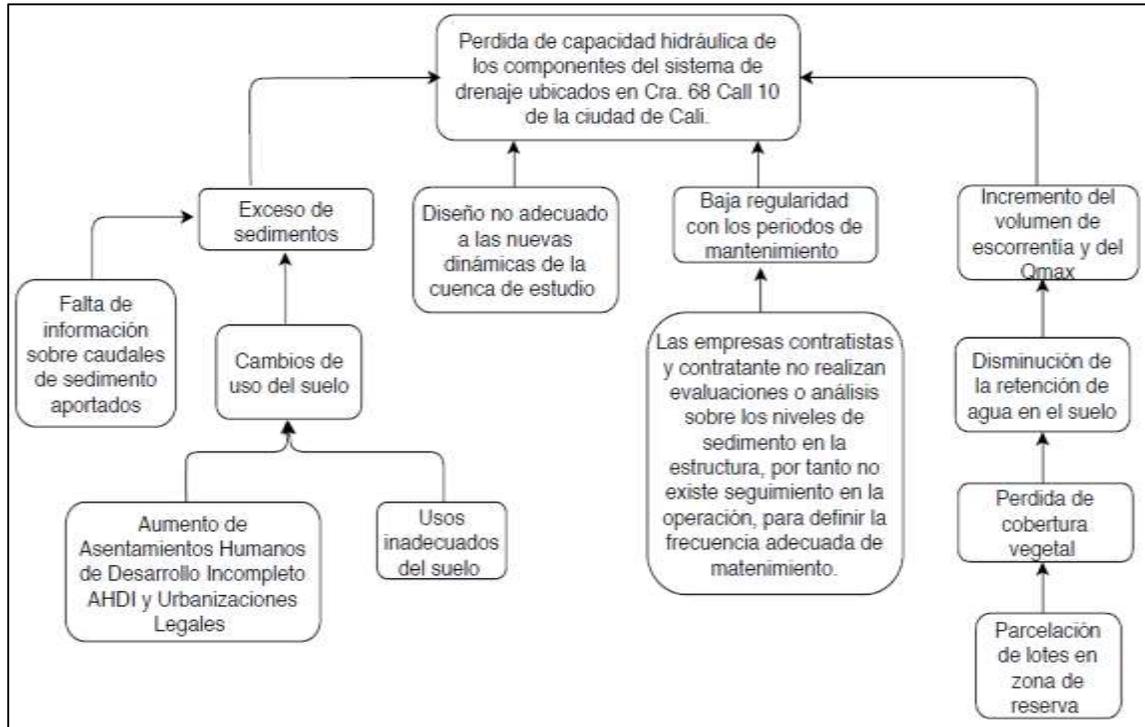


Figura 1. Esquema árbol de problema con enfoque hacia las causas

El problema focal identificado que se propone ser objeto de análisis, es la pérdida de capacidad hidráulica de los componentes del sistema de drenaje ubicados en la carrera 68 con calle 10 de la ciudad de Cali, sobre esta condición, el estudio propuesto busca realizar una evaluación del impacto generado por la producción de sedimentos de la cuenca, el cual, es recolectado y transportado por el sistema de drenaje sur de la ciudad.

El Sistema de Drenaje Sur es un sistema estratégico para la ciudad de Cali, debido a, que el agua transportada por este sistema es descargada aproximadamente 8 km antes de la captación de las plantas de potabilización de Puerto Mallarino y el río Cauca (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016). Dicho sistema presenta situaciones ambientales como: la presencia de sedimentos en los canales y en las redes del sistema de drenaje, generados por el acelerado incremento de los

asentamientos humanos de desarrollo incompleto - AHDI asentados en suelos inestables de la zona de ladera y la presencia de aguas residuales por falta de alcantarillado.

Las malas prácticas urbanísticas de construcción y manejo de residuos de construcción por las empresas consultoras con actividad sobre la zona de ladera. La falta de cultura ciudadana, manifestada por la presencia de residuos sólidos en el sistema de drenaje.

Además, el canal Sur dispone de una baja pendiente, lo que hace que diariamente se vayan almacenando sedimentos contaminados por las aguas residuales domésticas y No domésticas, que luego son arrastrados hacia el río Cauca y conducidas hasta las bocatomas en eventos de fuertes lluvias (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016).

Uno de los principales problemas en el subsistema de drenaje Sur en la zona de ladera, es el drenaje y específicamente son los procesos desencadenados por la consolidación de los AHDI, donde se impermeabilizaron terrenos, se construyeron box culvert y redes de alcantarillado sobre las quebradas que eran utilizadas como sistemas de drenaje de agua residual y fueron conectadas al sistema de drenaje.

Debido al aumento de la escorrentía de aguas lluvias y la incapacidad que tiene el sistema de drenaje natural y las estructuras de paso y conducción que existen en el sector, se generan problemas operativos para la prestación del servicio de transporte y recolección de aguas residuales por parte de las empresas municipales de Cali - EMCALI, ya que, estas unidades presentan condiciones de diseño que no se adecúan a las nuevas dinámicas de la cuenca (DAGMA, ICESI, 2010 tomado de EMCALI EICE ESP, 2016) y (ACODAL, 2016).

Otra causa de la problemática, es la baja regularidad en los periodos de mantenimiento, derivada de la falta de controles, como lo es, la inexistente estimación o determinación de los flujos de sólidos producidos por la cuenca, la no realización de una evaluación y análisis regular sobre los niveles de sedimentos en las estructuras retenedoras de sólidos. Todo lo anterior propicia la colmatación de los tramos de red de alcantarillado y consecuentemente pérdida de la capacidad hidráulica.

A continuación, se muestra el esquema de la identificación de los efectos generados por el problema focal objeto de estudio.

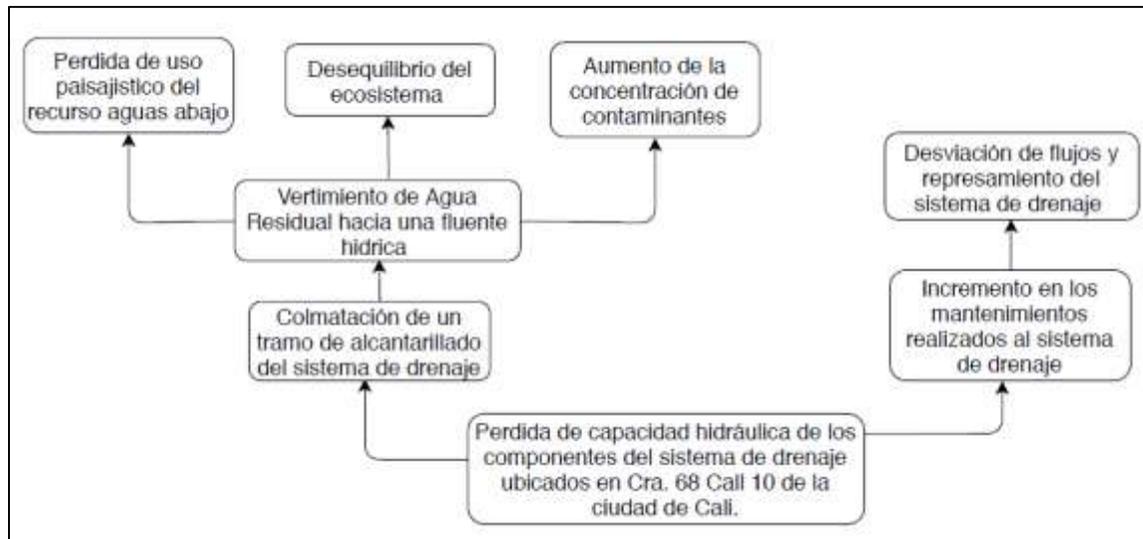


Figura 2. Esquema árbol de problema con enfoque hacia los efectos generados

Uno de los principales efectos generados por la pérdida de la capacidad hidráulica de los componentes del sistema de drenaje ubicado en la carrera 68 con calle 10 de la ciudad de Cali es la colmatación de los tramos de red de alcantarillado receptores de los flujos de la ladera, ya que, al presentarse pérdida de capacidad hidráulica en las estructuras retenedoras de sólidos, la fracción de los sedimentos que no es retenida, se dirige hacia las redes de conducción del alcantarillado de las zonas planas, que al presentar bajas pendientes e inadecuadas condiciones hidráulicas de auto limpieza, se colmatan con mayor frecuencia.

Como resultado, se tiene un incremento en los mantenimientos realizados al sistema de drenaje, tanto de las estructuras retenedoras de sólidos como de los tramos de red de alcantarillado colmatados. A continuación, se muestran los efectos anteriormente descritos.



Figura 3. Colmatación de tramo de red de alcantarillado y mantenimientos sobre el sistema de drenaje Fuente: EMCALI (2019)

Las condiciones de colmatación de los tramos de red y los mantenimientos realizados a las unidades en este estado generan vertimientos hacia las fuentes naturales más cercanas, debido a, que el alcantarillado es de tipo combinado. Para el caso objeto de estudio, la pérdida de la capacidad hidráulica en las estructuras ubicadas en la carrera 68 con calle 10 deriva en un vertimiento hacia el canal Autopista 3, que a su vez descarga sus flujos sobre el río Cañaveralejo.

La zona de ladera de la ciudad de Cali cuenta con una importante red hidrográfica, en la Figura 4 se muestra la red hídrica de la zona ladera de la ciudad.

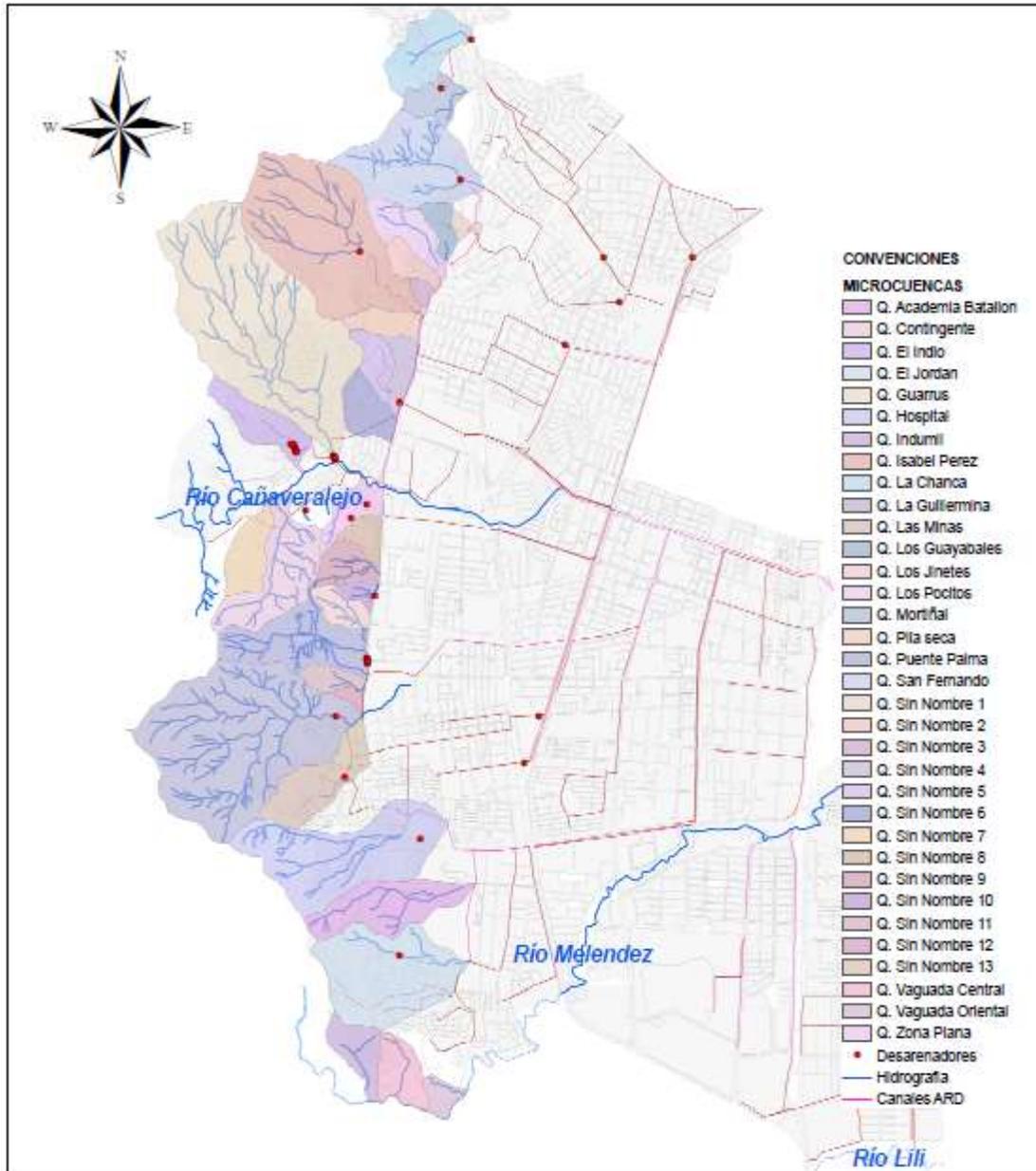


Figura 4. Red hídrica de la zona ladera de Santiago de Cali.
Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

Ante las condiciones del drenaje mencionadas (producción de sedimentos), EMCALI ha tenido que instalar alrededor de 31 estructuras retenedoras de sólidos, que definen un grado de complejidad mayor para la prestación del servicio de transporte de los flujos de agua residual y pluvial (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016).

En el sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, se puede evidenciar de manera detallada los efectos de las situaciones ambientales descritas anteriormente.

A continuación, en la Figura 5 se muestra el área de estudio.

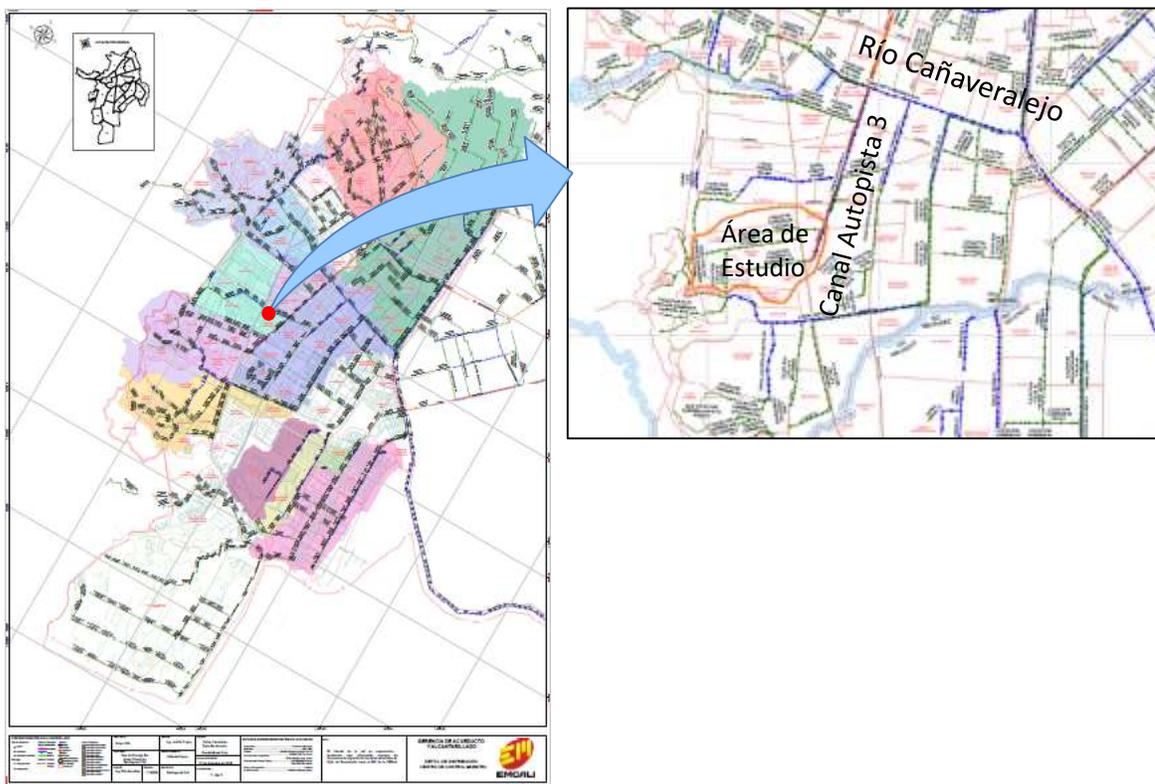


Figura 5. Ubicación del área de estudio

Fuente: (Departamento de distribución Centro Control Maestro, 2018)

El área de estudio se encuentra ubicada en la subcuenca de drenaje al canal Autopista 3, que a su vez drena sobre la cuenca urbana del río Cañaveralejo, este río es interceptado por el canal SUR y finalmente descarga sus aguas al río Cauca.

La elección de este subsistema de drenaje, permitirá simplificar el análisis hidrológico e hidráulico del comportamiento de las unidades que componen el sistema de drenaje de la zona ladera de la ciudad de Cali, sometidas a importantes flujos de sedimentos y presiones sobre las condiciones de diseño. Los componentes existentes del área de estudio son: un desarenador receptor de los flujos de la cuenca que se encuentra ubicado en la carrera 68 con avenida Autopista Sur, una estructura de separación en la misma dirección de flujo a una distancia de 70 metros, un tramo de alcantarillado de tipo combinado ubicado entre la

Carrera 68 hasta la Carrera 65 y tres estructuras retenedoras de sólidos distribuidas en la parte alta de la cuenca de estudio.

En la Figura 6 se muestra un esquema básico de la ubicación de los componentes del sistema a evaluar.

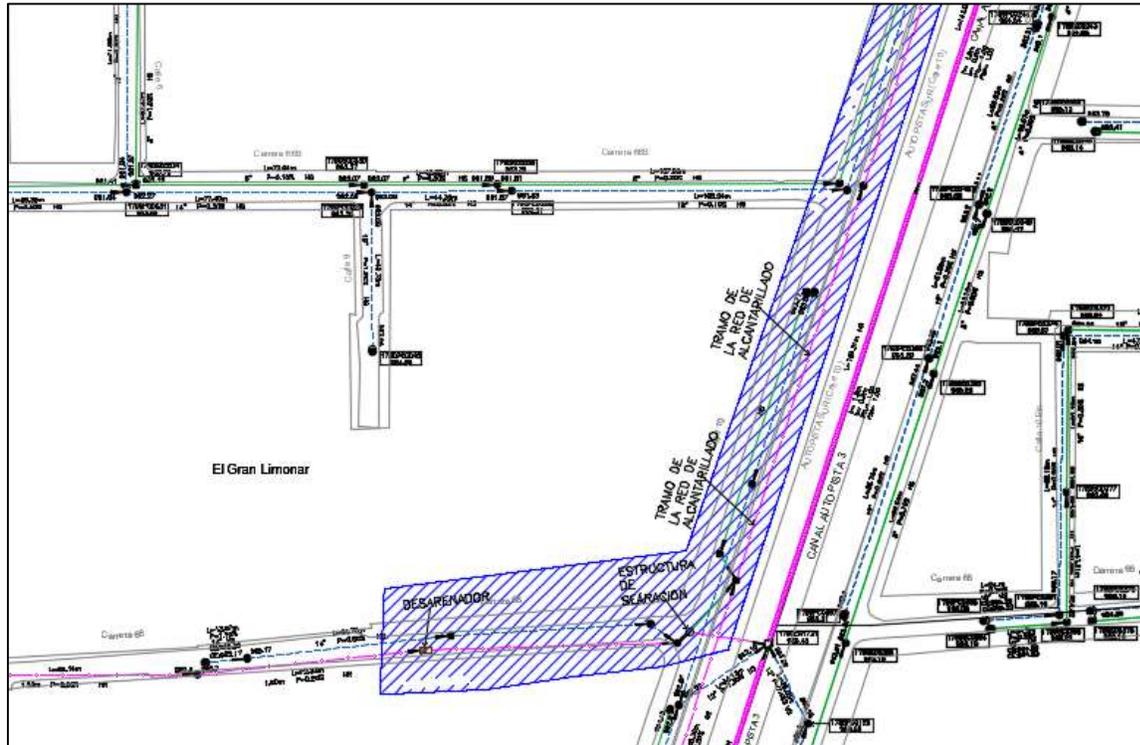


Figura 6. Ubicación del Desarenador, Estructura de Separación y Tramo de red de alcantarillado. Fuente: Elaboración propia mediante software AutoCAD 2020.

El documento tiene como fin, evaluar las condiciones hidrológicas, hidráulicas y de producción de sedimentos en un punto específico del sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, en el cual, se puede evidenciar los efectos de las situaciones ambientales descritas anteriormente sobre el sistema de drenaje y las unidades que lo componen. Con el objetivo de plantear alternativas para el control de sedimentos generados en la subcuenca de estudio, que afectan el funcionamiento del sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, en los componentes y tramo de alcantarillado ubicado entre la carrera 68 a 65 de la Avenida Autopista sur.

El estudio permitirá realizar un análisis del comportamiento de la cuenca para las condiciones de producción y gestión de sedimentos en el sistema de drenaje, con lo cual,

se formularán escenarios donde se establecerán impactos sobre la red, y jornadas de mantenimiento, de esta manera los gestores del sistema de alcantarillado tendrán una herramienta para realizar mantenimientos preventivos que implicará ofrecer un mejor servicio a la ciudad.

La información de producción de sedimentos se obtendrá a partir del análisis de la información histórica de la operación de las unidades de desarenado y componentes del sistema, y a partir de la estimación teórica de pérdida de suelo y tasas de erosión, ya que, no se contará con mediciones de flujo de sólidos.

1.2 ANTECEDENTES

Dada la necesidad de estimar la pérdida de suelo promedio anual, autores como Wischmeier and Smith en 1965 desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Figuroa S. et al., 1991). Tanto la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), como su versión modificada (MUSLE) y revisada (RUSLE), desarrolladas en los años 1975 y 1991 respectivamente (Gvozdenovich, et al., 2018), se han aplicado ampliamente para evaluar la erosión del suelo en el pasado y predecir la erosión del suelo en el futuro en diferentes escalas espaciales (Borrelli et al., 2017a) debido a su estructura simple y base empírica, estas etapas describen la evolución de los modelos empíricos (Xiong & Chen, 2019).

A partir de los años 80's, se inicia la modelación de base física, es decir, representaciones de procesos naturales basadas en modelos matemáticos. Donde se genera gran cantidad de modelos con diferentes fines, como: CREAMS, GLEAMS, o WEPP. Los modelos se separan según su uso a pequeña escala o a gran escala, y desde 1990 en adelante se generan modelos que involucran las características propias de cada zona sujeta a evaluación y se crean más modelos como: EROSION3D, MEDALUS/MEDRUSH, ANSWERS, SEMMED, KINEROS 2, SWAT, etc.

Para el año 2000 se realiza una integración de los sistemas de información geográficos – SIG y la modelación en 2D, que permite un mejor manejo de la información, visualización de resultados y agilidad en procesamiento de datos (Zambrano, 2015).

Los autores (Smith & Goodrich et al., 1990) evaluaron con el modelo KINERO2 la cuenca de Catsop en el sur de Limburgo, Países Bajos, y determinaron que la descarga de sedimentos es bastante sensible a la simulación hidrológica, ya que la cantidad y velocidad de la escorrentía afecta la capacidad de transporte de sedimentos, lo que a su vez determina la entrega de sedimento influenciada por la lluvia.

Además, consideraron que la capacidad general del modelo para reproducir los datos medidos es relativamente buena. KINEROS2 a menudo requiere un esfuerzo considerable para su implementación; es necesario delimitar las cuencas hidrográficas, discretizarlas en elementos de modelado y parametrizarlos. Esta necesidad motivó el desarrollo de la herramienta de Evaluación Automática de Cuencas Geoespaciales (AGWA), herramienta basada en ArcGIS que utiliza capas de datos SIG para parametrizar, ejecutar y visualizar completamente los resultados.

El desarrollo de AGWA se está centrando en aplicaciones de gestión de cuencas hidrográficas y para cuantificar los beneficios ambientales de las prácticas de conservación utilizadas, por otra parte, KINEROS2 se aplica típicamente a escalas de cuenca pequeñas del orden de (<250 km²) con datos de lluvia de alta resolución (Goodrich et al., 2011).

KINEROS2 se diferencia de otros modelos de escorrentía urbana, comerciales y no comerciales como el SWMM, el TR-55 y modelos conceptuales como el Método Racional, por el uso en el modelo para la evaluación de la infiltración los tres parámetros de Smith-Parlange, la integración con AGWA para la parametrización automática del flujo terrestre, los elementos del canal, y dirección flexible de la escorrentía entre las áreas permeables e impermeables (Semmens et al., 2008).

Los autores (Kennedy et al., 2013) presentan un estudio de caso de elementos urbanos de KINEROS2 en el que se simula la escorrentía de un pequeño desarrollo residencial de viviendas, utilizando parámetros identificados a partir de mediciones de campo. El modelo se usa para predecir el aumento en la escorrentía atribuible a los cambios en las propiedades de infiltración del suelo. De lo cual, se observó que es posible representar múltiples viviendas y lotes de modelo urbano en KINEROS2 con poca disminución en el rendimiento del modelo.

KINEROS2 proporciona elementos de modelado urbano y componentes de flujo terrestre que se pueden usar para representar varios tipos de cobertura del suelo que se encuentran comúnmente en el entorno construido, mientras se tratan los procesos de escorrentía y de infiltración de forma física (Korgaonkar et al., 2018; Korgaonkar, Meles, Guertin, Goodrich, & Unkrich, 2020)

Existe una gran cantidad de enfoques cuyo objetivo es la cuantificación e inclusive la simulación, especialmente sobre la dinámica, forma, volumen de material removido en tiempo, espacio y origen. Los modelos de base física, existentes para la modelación de cuencas a escala de eventos y de representación semidistribuida, son de especial relevancia por su utilidad en el estudio de la producción de sedimentos para diferentes condiciones de cuenca y disponibilidad de datos.

La producción de sedimentos es función de un conjunto de parámetros físicos, como la interacción entre parámetros geológicos, hidrológicos y climáticos. Desde una perspectiva específica las variables más eficientes en la explicación de la varianza en la producción de sedimentos están conformadas por el área de la cuenca, alturas máximas, la escorrentía, la temperatura promedio y su variación estacional, así como los cambios introducidos por la actividad antrópica Blum & Törnqvist, (2000).

Este último aspecto representa especial interés en el estudio de la dinámica de las cuencas urbanas. Actividades como la acelerada urbanización provoca un aumento de las superficies impermeables (por ejemplo, techos, entradas de vehículos, estacionamientos y carreteras) al reemplazar la vegetación y las áreas naturales permeables. Como resultado, el área disponible para la infiltración del agua de lluvia se reduce sustancialmente.

Además, la compactación del suelo debido a la construcción puede disminuir la capacidad de almacenamiento de agua en los poros, reduciendo así las tasas de infiltración (Gregory, et al., 2006; Pitt et al., 2009; Woltemade, 2010; Yang & Zhang, 2011; Kennedy, Goodrich, & Unkrich, 2013). Los volúmenes de escorrentía superficial y las descargas máximas pueden aumentar significativamente debido a la reducción de la infiltración y al aumento de las áreas impermeables conectadas (Shuster et al., 2005). El aumento de la escorrentía superficial también puede dar lugar a mayores cargas aguas abajo de contaminantes

urbanos, como plomo, zinc, hierro, sólidos en suspensión, bacterias coliformes fecales, nitrógeno, fósforo e hidrocarburos (Characklis & Wiesner, 1997; Norman et al., 2008; Bedan & Clausen, 2009) tomado de (Korgaonkar et al., 2018).

Determinar la producción de sedimentos causados por la erosión hídrica en las cuencas urbanas, y en los puntos críticos como lo son las zonas de interacción entre ladera y áreas planas, es de vital importancia para la gestión adecuada de los componentes que conforman el sistema hidráulico de las ciudades.

Autores como Fortuño (2014) estimaron la pérdida de sedimentos de cuencas periurbanas en la cuenca AVIAR, localizada en la Comú d'Encamp (Andorra), con un tamaño de menos de un kilómetro cuadrado. En este estudio se compararon los resultados de la simulación de KINEROS2 con cuatro modelos previamente calibrados. De lo cual, se concluyó que KINEROS2 ofrece una idea del orden de magnitud del volumen de material sólido erosionado, comparable con los resultados obtenidos de los modelos en mención.

Zambrano, (2015) desarrolló un modelo conceptual y computacional, implementado en Matlab que simula adecuadamente la producción, erosión, transporte y sedimentación, de manera distribuida espacial y temporalmente, para un evento de lluvia en pequeñas cuencas de áreas urbanas inferiores a 100 ha. Y los resultados son comparados con modelaciones realizadas en KINEROS2, donde se permitió visualizar correctamente la distribución de la erosión y la sedimentación en el área de cuenca Goodwin Creek localizada en el condado Panola, estado de Mississippi, USA.

Los autores (Gupta et al., 2018) exploraron el desempeño del modelo KINEROS2, en la predicción del caudal de agua y la producción de sedimentos, en respuesta a alteraciones en el sistema de drenaje, específicamente cambio de rugosidad en las zanjas a los costados de las carreteras, mediante la implementación de cobertura vegetal normal, media y espesa. Dentro de una cuenca hidrográfica ambientalmente sensible en Ontario, Canadá. Los resultados demostraron que el modelo fue capaz de simular el flujo (flujo máximo y escorrentía directa) y las cargas de sedimentos de manera satisfactoria.

KINEROS2 proporciona un componente urbano que es capaz de modelar la hidrología urbana, incluidas las prácticas de infraestructura verde a varias escalas. El modelo

KINEROS2 suministra 15 parámetros que pueden representar una variedad de estas prácticas. Korgaonkar, Meles, Guertin, Goodrich, & Unkrich, (2020) evaluaron la sensibilidad de las salidas del modelo KINEROS2 (infiltración, flujo máximo, volumen de escorrentía e hidrograma de flujo de salida) a los parámetros que representan las prácticas de infraestructura verde, mediante la realización de un Análisis de sensibilidad global (GSA) utilizando el marco de análisis variograma de superficies de respuesta (VARs).

Como resultados, los autores concluyeron que una mayor intensidad y duración de un evento pueden afectar la sensibilidad de los resultados del modelo, por tanto, sostienen que es importante comprender los parámetros y el impacto que podrían tener en el análisis que se pretende realizar antes de cualquier ejercicio de modelado.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La erosión del suelo provocada por el agua es una de las formas más generalizada de degradación del suelo en todo el mundo (García-Ruiz et al., 2017; Maetens et al., 2012), este tipo de erosión ha sido una amenaza importante para la calidad y productividad del suelo, agricultura sostenible y los ciclos globales de carbono, nitrógeno y fósforo (Li & Fang, 2016).

Borrelli et al., (2017) presentaron un modelo global de erosión potencial del suelo de alta resolución (250 x 250 m), utilizando una combinación de sensores remotos, modelos SIG y datos de censos. Estos autores, estimaron los efectos espaciales y temporales del cambio de uso de la tierra entre 2001 a 2012 y la compensación potencial de la aplicación global de prácticas de conservación.

Como resultado, demostraron un potencial aumento general en la erosión global del suelo, impulsada por la expansión de las tierras de cultivo, además, los autores indicaron que se prevé que los mayores aumentos se produzcan en África subsahariana, América del Sur y el sudeste asiático. Y señalan que son las economías menos desarrolladas las que experimentan las estimaciones más altas de tasas de erosión del suelo.

Posición que, a su vez, es sostenida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Suelo - FAO, (2016), quienes señalan que la degradación debida a los factores de erosión por agua y viento, es considerada una de las más

importantes amenazas, en particular aquellas concentradas en regiones montañosas de los Andes, América Central, México y el Caribe.

El área degradada en el trópico por diferentes procesos es estimada en 915×10^6 hectáreas por erosión hídrica, 474×10^6 hectáreas como erosión por el viento, 50×10^6 hectáreas por degradación física, y 213×10^6 hectáreas, por degradación química (Dumanski, Gameda, & Pieri, 1998).

Los autores OLMOS & MONTENEGRO, (1987), señalan que en Colombia se presentan problemas de erosión que limitan seriamente su capacidad productiva, cerca del 40 % del territorio colombiano presenta erosión de muy ligera a muy severa y la zona andina es la más afectada por erosión hídrica con 88% de su área. Información referenciada por Mena, Benavides, & Castillo, (2010); Diaz M., (2011); IDEAM, U.D.C.A, & MDAS, (2015) y Acevedo O. & Jiménez R., (2019).

Blum & Törnqvist (2000) sostienen que las actividades humanas tienen la capacidad de alterar las condiciones ambientales en escalas de tiempo muy cortas, al punto incluso de ser capaces de modificar sustancialmente el sistema hidrológico. Es por ello que las evaluaciones de erosión del suelo y el mapeo de áreas propensas a la erosión sirven como base científica para la conservación del suelo y el manejo de cuencas hidrográficas. Además, la estimación de las tasas de erosión del suelo, son de suma importancia para los tomadores de decisiones durante los procesos de planificación de la conservación Xiong & Chen, (2019); Ketema & Dwarakish, (2019).

La disminución de los bosques y la expansión de las tierras de cultivo son los principales contribuyentes al aumento de la escorrentía superficial, la reducción del flujo base y la evapotranspiración real, condiciones que generan unos impactos negativos en los recursos hídricos, y en especial con la erosión y la sedimentación. Los aumentos en la escorrentía superficial podrían intensificar aún más la erosión y la sedimentación, que generalmente están directamente relacionadas con el volumen y la velocidad de la escorrentía (Ayele et al., 2016).

El uso del suelo y la cobertura (LUC por sus siglas en inglés) y los recursos hídricos están vinculados (Gyawali et al., 2013). El estrés hídrico está influenciado por el tipo de LUC en un área determinada y por la intensidad de uso que cada tipo de LUC requiere. La calidad y la variación de la cantidad de agua superficial está altamente correlacionada con

prácticas antropogénicas inadecuadas o procesos de degradación de la cubierta vegetal Zhang, Li, & Chen, (2011) y Smith et al., (2013). Entre tanto, la erosión del suelo también es una de las causas de la reducción de la calidad del agua debido a la cantidad de sedimento que llega a los cursos de agua y a las reservas (Nunes et al., 2011; Meneses, 2014).

El rápido y desordenado crecimiento urbano genera unas condiciones hidrológicas adversas, como lluvias muy intensas y cuencas pequeñas con fuerte pendiente (Arandes, 1992). Además de los problemas de inundación, también los contaminantes son arrastrados con el flujo de escorrentía, especialmente los sedimentos que llegan hasta la red de drenaje (Hernández, 2009) citado por (Zambrano, 2015).

Las condiciones anteriormente expuestas, han conllevado a direccionar los flujos de sólidos generados por la cuenca de manera instantánea a las unidades de control de la red de drenaje en la zona de bajas pendientes. Estos procesos del arrastre y transporte de sedimento generan impactos sobre la prestación del servicio de transporte y conducción del agua residual y pluvial, haciendo insuficiente su operación, incrementando las labores de mantenimientos de las redes de drenaje, y por tanto generando un aumento en los costos de operación del servicio de recolección y transporte del agua residual de la ciudad.

El problema focal identificado que se propone ser objeto de análisis, es la pérdida de capacidad hidráulica de los componentes del sistema de drenaje ubicados en la carrera 68 con calle 10 de la ciudad de Santiago de Cali, Valle del Cauca.

Según los análisis de cargas vertidas, realizados en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico PORH del río Cañaveralejo para el año 2018, se encontró, que el canal Autopista 3, es el que mayor carga contaminante aporta al río Cañaveralejo (CVC, DAGMA, PNN, GIAS, & UTP, 2018). Consecuencia de las condiciones de funcionamiento del sistema de drenaje cuando operan bajo restricciones de flujo, las cuales, posiblemente son causadas por la colmatación por sedimentos de las redes de alcantarillado.

Dada la obligación de reducir los impactos negativos de la erosión, existe una necesidad inherente de investigaciones que permitan realizar un balance de sedimentos a escala de cuenca, la cual permita la formulación y desarrollo de estrategias efectivas de gestión de los sedimentos.

Este documento presenta como propuesta, estimar la producción de sedimentos de la subcuenca tributaria al sistema de drenaje objeto de estudio y evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la subcuenca de interés mediante el uso del software KINEROS2, como se ha señalado es una herramienta que ofrece una respuesta óptima en la modelación de escenarios para cuencas urbanas.

Una vez estimada la producción de sedimentos, se evaluará del comportamiento hidráulico y de sedimentabilidad de la estructura retenedora de sólidos y respuesta con las unidades posteriores, y se plantearán y analizarán escenarios para el control de la producción de sedimentos a nivel de cuenca.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear alternativas para el control de sedimentos en el sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, en los componentes y tramos de alcantarillado ubicados entre las carreras 68 a 65 de la avenida Autopista sur.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la subcuenca de interés.
- Analizar comportamiento hidráulico y de sedimentabilidad de las estructuras retenedoras de sólidos y consecuente respuesta con las unidades posteriores.
- Estimar la producción de sedimentos de la subcuenca tributaria al sistema de drenaje objeto de estudio.
- Plantear y analizar escenarios para el control de la producción de sedimentos a nivel de cuenca.

3 MARCO TEÓRICO

El presente documento está enmarcado en la evaluación de los impactos generados por la erosión sobre los sistemas de alcantarillado. Para ello, a continuación, se revisan los conceptos teóricos necesarios para simular los procesos involucrados en la erosión hídrica y estimación de la producción sedimentos.

3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Las características geomorfológicas son establecidas a partir de la recolección de información topográfica y geológica de la zona de estudio y permiten dar una idea de las propiedades particulares de cada cuenca hidrográfica (tales como áreas, pendiente, direcciones de flujo, etc.), las que a su vez son necesarias para el desarrollo del análisis hidrológico.

Las características físicas de una cuenca forman un conjunto de condiciones que influye profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona. Es así que, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad práctica en la ingeniería de la hidrología, pues con base en ellos se puede lograr el reconocimiento y la transferencia de información (Reyes et al., 2010). Dichas características se definen por medio de los siguientes indicadores.

Densidad de drenaje: corresponde al índice que permite determinar si una cuenca cuenta o no, con un drenaje significativo. Cuando su magnitud es mayor o igual a $0.5 \text{ Km}^2/\text{Km}^2$ se puede inferir que la cuenca cuenta con una eficiencia significativa de drenaje (Delgadillo & Paez, 2008). La Tabla 1 muestra las categorías de la densidad de drenaje asociadas a su resultado.

La densidad de drenaje influye en el tipo de escorrentía, por ejemplo, en zonas de alta densidad, la escorrentía recorre la superficie con menores tiempos de concentración incrementando el pico de crecida, asociado a una menor infiltración (Askoa, 2004). Adicional a lo anterior, este indicador permite definir la capacidad transportadora de sedimentos de una cuenca, ya que mayores valores son asociados a mayores pendientes significativas que aumentan la velocidad de la escorrentía (Martínez & Poch, 1998).

La densidad de drenaje se determina como el cociente entre la longitud total acumulada del cauce y el área total de la cuenca, tal como lo indica la Ecuación 1.

$$Dd = \frac{LongC}{1000 * At} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: Dd= Densidad de drenaje (Km*Km⁻²), LongC= Longitud total acumulada del cauce (m) y At= Área total de la cueca (Km²).

Tabla 1. Valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (Km*Km-2)	Categoría
0.1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

Fuente: (Fuentes Junco, 2004)

Tiempo de concentración: corresponde al tiempo requerido para que se alcance un estado estacionario en la cuenca durante un aguacero uniforme. En otras palabras, es el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Este tiempo no es constante en la cuenca, ya que depende ligeramente de las características de la lluvia (Veléz & Botero, 2011).

Para la determinación del tiempo de concentración se emplean diferentes ecuaciones, las cuales se presentan a continuación.

JOHNSTONE-CROSS (1949)

$$T_c = (5 * [L_{rio}/S^{0,5}]^{0,5})/60 \quad \text{Ecuación 2}$$

KIRPICH (1990)

$$T_c = 0,01947 * [L_{cuenca}^{0,77} / S^{0,385}] \quad \text{Ecuación 3}$$

VENTURA-HERAS

$$T_c = a * A^{0,5} / S_{rio} \quad \text{Ecuación 4}$$

GIANDOTTI

$$T_c = 4 * S^{0,5} + 1,5 * L/0,8 * Hm^{0,5} \quad \text{Ecuación 5}$$

TÉMEZ

$$T_c = 0,3 * [L_{rio}/S^{0,25}]^{0,75} \quad \text{Ecuación 6}$$

PASSINI (I)

$$T_c = 0,108 * (A * L_{rio})^{0,3}/S^{0,5} \quad \text{Ecuación 7}$$

PASSINI (II)

$$T_c = \beta * (A * L_{rio})^{1/3}/S^{0,5} \quad \text{Ecuación 8}$$

CALIFORNIA CULVERT PRACTICE (1942)

$$T_c = ([L^{rio^3} * 11,9/H]^{0,385})/60 \quad \text{Ecuación 9}$$

VEN TE CHOW

$$T_c = 0,123 * [L_{cuenca}/L_{rio}^{0,5}]^{0,64} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde: T_c =Tiempo de concentración (horas), L_{rio} = Longitud del cauce principal (millas) (Ec.3 y 10); L_{rio} = Longitud del cauce principal, (Km) (Ec. 6-9); L_{rio} = Longitud del cauce principal (m) (Ec.11), L_{cuenca} = Longitud de la cuenca (m), S = pendiente del cauce principal (m^*m^{-1}), A = Área (Km^2), Hm = Elevación media de la cuenca (m), H = Diferencia de cota máxima y mínima de cauce (pies).

Histograma de frecuencias altimétrica: el análisis de frecuencia altimétrica se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como la altitud de diferentes sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de cumbres o la de áreas de llanos o depresiones (Racca, 2007).

Diagrama área – pendiente: permite definir el área umbral aproximada de la cuenca, es decir el área en la que aproximadamente se comienza la formación de los cauces de agua. Al construir este diagrama se logra identificar el área de la cuenca que corresponde a zona de difusión y el área fluvial, las cuales son diferenciadas a partir del punto de inflexión que se identifique respecto a la línea de tendencia de los datos. Adicional a la división entre área fluvial y área de difusión, el punto de inflexión del diagrama permite evidenciar la zona en la que se cuenta con posibilidad de erosión (Monsalve, 1999).

3.2 EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS URBANAS

Entre los procesos de degradación del suelo el más severo es la erosión, pues en otros procesos el suelo, aunque degradado, permanece en su sitio, y con frecuencia se dispone de técnicas para su recuperación. En tales casos, y desde el punto de vista de la productividad del terreno, el deterioro del suelo se podría considerar como temporal; no así en el caso de la erosión, donde la pérdida del suelo es permanente (Condori, 2018).

La erosión puede ser incrementada por actividades humanas o antropogénicas. En cuencas urbanas se desarrollan actividades antrópicas y se interviene el proceso de escorrentía a causa de la impermeabilización de sus suelos por la presencia de obras de infraestructura, lo que genera variaciones en las características fisiográficas e hidráulicas de la cuenca, como en el caso de las pendientes de las laderas y los tiempos de concentración respectivamente.

Otras características que entran a ser modificadas, tanto de forma directa como indirecta, son las definidas por el uso de los suelos, como las actividades que consisten en desnudar grandes extensiones de terreno para procesos urbanísticos por parte de la comunidad establecida, es por tanto que se determina, que los diferentes usos del suelo afectan el equilibrio hidrológico e hidráulico de los sistemas (Kalantari et al., 2014).

El uso de la tierra se considera uno de los componentes más importantes del sistema terrestre (Y. P. Lin, 2007; W. Lin et al., 2011) ya que afecta la escorrentía superficial, y el transporte de sedimentos influenciados por la interceptación de la lluvia, la evapotranspiración y la conductividad hidráulica del suelo superficial He et al., (2008); Germer et al., (2009); Scheffler et al., (2011) y Yan et al. (2013) tomado de Neupane & Kumar, (2015).

Por otro lado, el aumento del área impermeabilizada y la disminución o eliminación de la cobertura vegetal, ha traído como consecuencia cambios en la hidrología como la disminución de la infiltración y el consecuente aumento del volumen de escorrentía superficial, el incremento de las velocidades del flujo superficial y dentro de la red, así como el aumento del caudal de escorrentía pico y la disminución del tiempo para alcanzar este tiempo pico (Leopold, 1968).

En las cuencas urbanas los caudales punta se incrementan considerablemente, lo que produce grandes cantidades de material debido a la fuerza erosiva del flujo sobre los drenajes naturales (Zambrano, 2015). La cuantificación de la erosión hídrica de los suelos en cuencas hidrográficas, es de vital importancia para conocer el grado de deterioro de la cuenca, y con dicha información poder implementar medidas de conservación que minimicen la pérdida del suelo y sus impactos.

3.2.1 Mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica

El agua erosiona al suelo de dos maneras, por el impacto de la lluvia y por la fricción del escurrimiento superficial con capacidad de movilizar y transportar las partículas de suelo, en ambos casos, la erosión constituye un trabajo físico, y la cantidad de energía de la lluvia o de la esorrentía depende de su masa y de la velocidad de movimiento (Duque & Escobar, 2016).

La erosión hídrica es función de la erosividad del agente activo, que se define como la habilidad del agua para causar erosión; y la erosionabilidad del suelo, como la susceptibilidad del suelo para ser erosionado. La erosividad está determinada por la acción dispersante de la lluvia y la cantidad y velocidad de la esorrentía, éstas a su vez dependen de las características de la lluvia y del suelo. La erosionabilidad del suelo obedece a las características del suelo, topografía y modalidades del manejo: longitud y grado de pendiente, vegetación y modificación de la superficie (Becerra, 1999). A continuación, se muestra un esquema los procesos de separación y transporte de sedimentos (Figura 7).

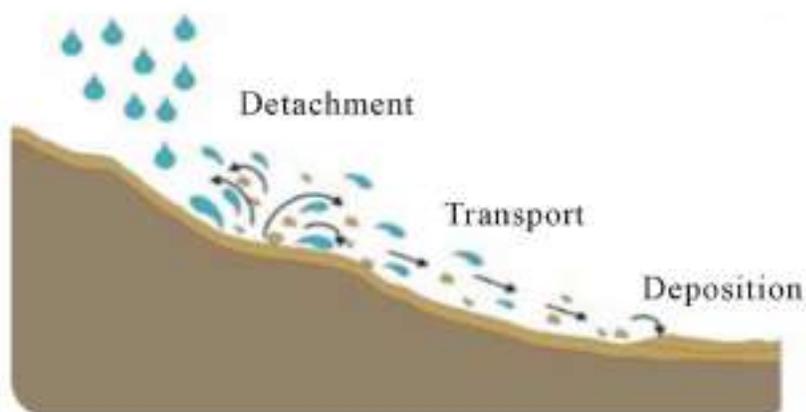


Figura 7. Esquema de la separación y transporte de sedimentos por acción de la lluvia
Fuente: (Al-Taai et al., 2016)

Los principales factores que influyen en la erosión hídrica son el clima, las propiedades del suelo y las características del paisaje. Los principales factores climáticos son la energía asociada con la caída de las gotas de lluvia y la cantidad e intensidad de la lluvia, y la influencia adicional del viento en la energía de las gotas en relación con la pendiente del terreno (Porazinska & Wall, 2013).

La erosión laminar, es la eliminación de una capa delgada y bastante uniforme de tierra del suelo causada por el agua que fluye a través de la superficie. Las gotas de lluvia proporcionan parte de la energía que separa las partículas del suelo, y el flujo sobre la superficie es el principal mecanismo de transporte (Troeh. et al., 2004). El desprendimiento por flujo, es ocasionado por la fuerza del flujo ejercida sobre las partículas, este desprendimiento es controlado por la resistencia límite de las partículas del suelo a ser desprendida, que suele determinarse en términos del esfuerzo de corte crítico.

La erosión por salpicadura es el aflojamiento y salpicadura de pequeñas partículas del suelo causadas por el impacto de las gotas de lluvia sobre una superficie húmeda del suelo. La distancia que las partículas se mueven por la salpicadura es relativamente pequeña, y las partículas pueden o no eliminarse cuando ocurre la escorrentía. Sin embargo, la gota de lluvia es un agente erosivo completo dentro de sí misma y se produce poca o ninguna erosión hídrica cuando las superficies del suelo están protegidas por una amplia cobertura (Hudson, 1995).

3.2.1.1 Producción de sedimentos

La producción de sedimentos de una cuenca hidrográfica se define como la cantidad total o proporción de sedimentos, de cualquier tamaño y origen, desprendidos por la erosión superficial y el movimiento de masas, desde una ubicación determinada de la cuenca y transportados cuesta abajo durante un cierto período de tiempo (año, mes, tormenta, etc.). La producción de sedimentos de la cuenca se puede calcular aplicando las fórmulas (por ejemplo, USLE) calibradas a escala de campo a partir de datos de parcelas experimentales, donde se asumen longitud y pendiente de las laderas naturales, respectivamente, como la inversa de la densidad de drenaje y el relieve de la cuenca.

En este cálculo se aplica el coeficiente de reducción (índice de entrega de pendiente) con lo cual, se tiene en cuenta el efecto de atrapamiento de los sedimentos a lo largo de la

pendiente natural, especialmente cuando la pendiente es bastante larga y su perfil es ondulado (Di Silvo & Basson, 2008).

3.2.1.2 Transporte de sedimentos

Bajo la acción del agua (directa: lluvia, flujo terrestre, flujo canalizado; e indirecta: congelación y fusión, infiltración, etc.) los sedimentos se eliminan de la superficie de la cuenca y se transportan aguas abajo. Dependiendo de la extensión predominante del proceso en tres, dos o una dimensión espacial, el movimiento del sedimento asume tres formas básicas (masa, superficie y lineal), más o menos correspondientes, respectivamente, a (i) deslizamientos de tierra, ocasionalmente producidos en las pendientes más empinadas de la cuenca, incluso si está protegida por la vegetación; (ii) erosión del suelo distribuida que ocurre principalmente en superficies onduladas, con vegetación escasa; y (iii) carga de lecho y transporte suspendido por flujo de agua en la red de corrientes. Los fenómenos físicos relacionados con el movimiento del sedimento son, por lo tanto, extremadamente numerosos y están estrictamente conectados con las condiciones morfoclimáticas (Di Silvo & Basson, 2008).

El transporte de sedimentos en suspensión constituye el mecanismo de mayor importancia en la transferencia de materiales. La carga de sedimentos transportada por un río o arroyo comúnmente representa una mezcla de sedimentos derivados de diferentes lugares y de distintos tipos de fuentes dentro de la cuenca contribuyente, y también las condiciones morfológicas fomentan la eliminación de partículas por el flujo terrestre, por ejemplo, un área relativamente pequeña de la cuenca con un determinado uso del suelo, puede contribuir a la mayor parte de la carga de sedimentos en suspensión en la salida de la cuenca (Rodríguez B. et al., 2011).

La escorrentía traslada el material con tasas altamente variables en el espacio y el tiempo, en función de un forzamiento hidrológico sujeto a un control geomorfológico (Morris & Fan, 2009). En la ladera la erosión se abastece del suelo desprendido debido a la energía de impacto de las gotas de lluvia, atenuada por la vegetación, y aguas abajo por el desprendimiento por esfuerzo cortante del flujo superficial, se puede considerar el impacto de las gotas de lluvia como un proceso de preparación del suelo para la erosión, pero es solamente en los surcos donde efectivamente se presenta la erosión y es la capacidad de

transporte del flujo de agua que se concentra en dichos surcos la que explica la erosión en ladera (Montoya, 2008).

La información sobre el área fuente de sedimentos es de suma importancia para entender la dinámica de los sedimentos en suspensión y el balance de sedimentos de una cuenca (Trimble 1983; Walling et al. 2001), para mejorar la interpretación y modelación de la producción de sedimentos en suspensión (Summer et al., 1996) y para diseñar e implantar estrategias de manejo encaminadas a controlar los problemas ambientales asociados a la exportación de sedimentos (Rodríguez B. et al., 2011).

3.2.1.3 Depósitos de sedimentos

El perfil longitudinal de muchas cárcavas es cóncavo y gradualmente decreciente. Aunque la capacidad de transporte tiende a incrementar cuando el caudal aumenta a lo largo de una cárcava, la disminución en el perfil (se reduce la pendiente) tiende a bajar la capacidad de transporte. El caudal sólido se incrementa a lo largo de la cárcava por los sedimentos añadidos por el flujo superficial adyacente al área de la cárcava y por los sedimentos producidos aguas arriba. Si la pendiente longitudinal decrece significativamente, la capacidad de transporte se iguala al caudal sólido en un punto concreto de la cárcava, en este punto comienza la sedimentación que continúa hasta la salida. Cuando la concavidad del perfil de la cárcava es poca, la sedimentación puede no ocurrir (Montoya, 2008).

Los remansos ubicados a la salida de una cárcava pueden también reducir la capacidad de transporte y causar sedimentación. Cuando la sedimentación ocurre, la producción de sedimentos está controlada principalmente por la capacidad de transporte del flujo cerca de la salida de la cárcava más que por la cantidad de erosión aguas arriba de la salida (Foster, 1982). Si la sedimentación ocurre, esta ocurre a lo largo de la cárcava, justo como ocurre a lo largo de una terraza con pendiente uniforme (Foster & Ferreira, 1981).

3.2.2 Procesos hidrológicos e hidráulicos

Los procesos de erosión hídrica dependen de los cambios en la intensidad de la lluvia, número de días de precipitación, producción de biomasa de plantas, proporción de descomposición de residuos de plantas, actividad microbiana en el suelo, tasas de evapotranspiración y los cambios en el uso de la tierra (Nearing, Pruski, & O'Neal, 2004).

En general los procesos hidrológicos presentes en una ladera son: precipitación, interceptación, transpiración, evaporación (a veces considerados de manera conjunta como evapotranspiración), almacenamiento, percolación (infiltración) y flujos superficial y sub-superficial (Beven, 2012). Es importante tener en cuenta que la precipitación varía espacial y temporalmente, por lo que la respuesta de la cuenca puede ser muy diversa según el punto y el tiempo analizado (Zambrano, 2015).

Por otra parte, las áreas de suelo desnudo serán particularmente vulnerables a la generación de escorrentía por exceso de infiltración, ya que la energía de las gotas de lluvia puede reorganizar las partículas del suelo en la superficie y formar una costra superficial, sellando efectivamente los poros más grandes (R. E. Smith, Goodrich, & Unkrich, 1999). La cobertura vegetal, por otro lado, protegerá la superficie y tiene la capacidad de crear canales de raíz que pueden actuar como vías de infiltración.

En superficies cubiertas con vegetación, la precipitación rara vez excede la capacidad de infiltración antes que el suelo se sature. Pero si la supera, la escorrentía se iniciará en aquellas zonas en las que la permeabilidad es más baja, o donde los contenidos iniciales de agua sean mayores. Por esta razón los suelos desnudos son más vulnerables a este tipo de escorrentía (Beven, 2012).

El almacenamiento en áreas ribereñas (zonas riparias) puede mantenerse mediante flujos de retorno desde capas más profundas, pero también porque los suelos tienden a ser más profundos en los fondos de los valles.

La pérdida de agua por evapotranspiración tendrá un efecto mayor o menor en el perfil de almacenamiento dependiendo de la estación, el clima y el tipo de vegetación y la profundidad de enraizamiento. Sin embargo, muchas plantas pueden extraer agua de una profundidad considerable con raíces que penetran hasta decenas de metros en el suelo y las fracturas del lecho rocoso y los canales radiculares también actúan como vías de infiltración. Estos procesos de evapotranspiración y drenaje serán importantes para controlar la respuesta de la cuenca a la precipitación (Zambrano, 2015).

El flujo superficial también puede ocurrir por el exceso de saturación. Las áreas de suelo saturado tienden a suceder primero donde el déficit de humedad del suelo es menor. Esto será en las áreas del fondo del valle, particularmente en las depresiones donde hay convergencia del flujo y una disminución gradual de la pendiente hacia la corriente. La

saturación también puede ocurrir en áreas de suelos delgados, donde la capacidad de almacenamiento es limitada, o en áreas de baja permeabilidad y baja pendiente, que tenderán a permanecer húmedas durante los períodos de recesión (Beven, 2012).

A continuación, se muestra un esquema de los diferentes procesos hidrológicos presentes en una cuenca.

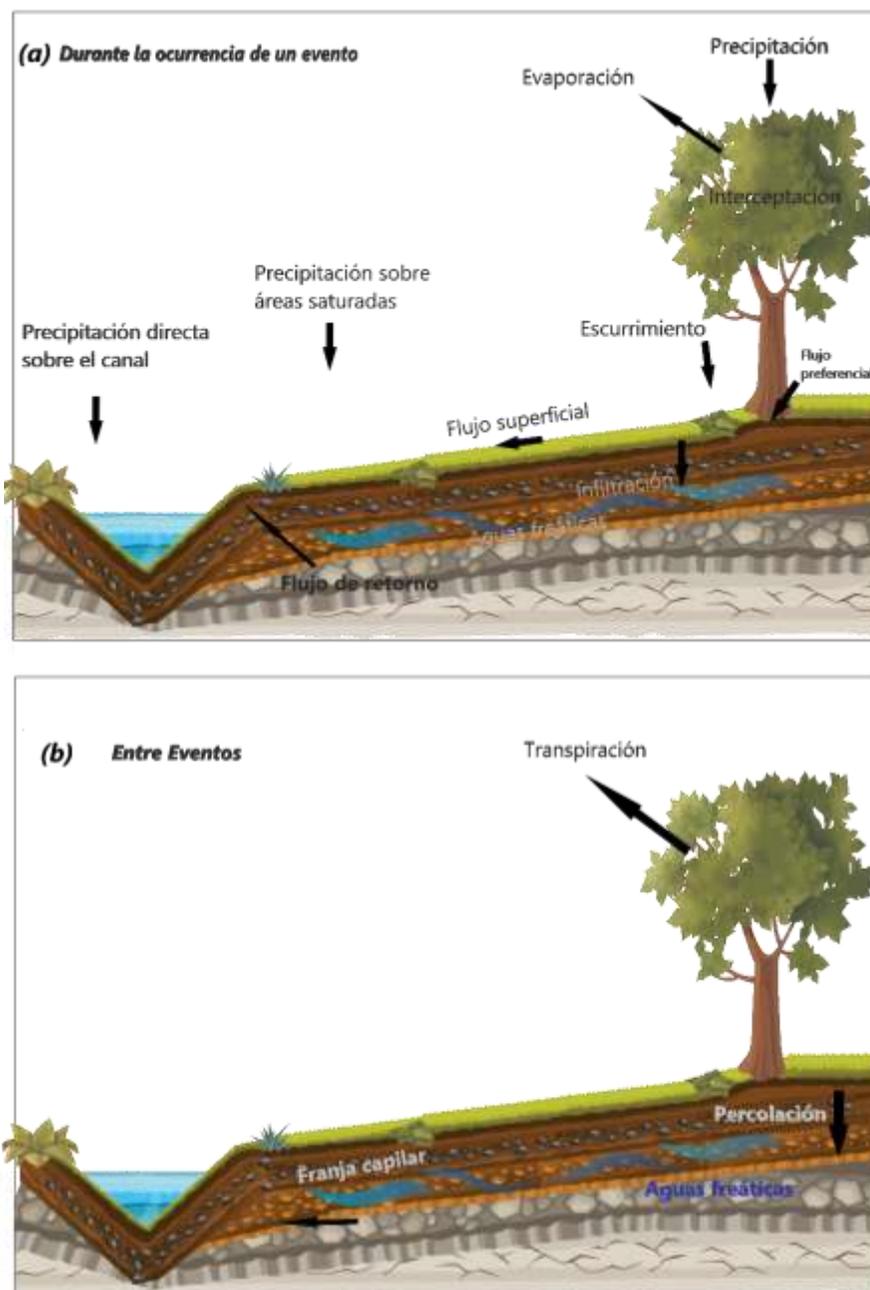


Figura 8. Esquema de los procesos involucrados en un modelo perceptual de la hidrología en una ladera. (a) Durante la ocurrencia de un evento, (b) Entre eventos. Fuente: Adaptado de (Zambrano, 2015).

Un modelo hidrológico completo de una ladera deberá incluir todos los procesos antes mencionados, pero las condiciones particulares de un área, así como las limitaciones de información permiten realizar ciertas simplificaciones. Es así como en cuencas pequeñas con grandes áreas impermeables y/o poca cantidad de vegetación, los procesos de Interceptación y Evapotranspiración pueden ser omitidos, ya que representan un porcentaje muy bajo de las pérdidas totales, mientras que la Infiltración y Percolación representan casi la totalidad de las pérdidas.

3.2.2.1 Precipitación

La distribución temporal de la precipitación depende de los procesos que se desean modelar. Cuando se requiere modelar procesos erosivos locales en cuencas de pequeña superficie, se requiere una alta resolución de la escala temporal por lo cual se adopta el enfoque general de realizar la evaluación de los eventos detonantes de los procesos erosivos, es decir, modelación por eventos (Zambrano, 2015).

En los estudios de hidrología urbana el intervalo de tiempo para la evaluación de la información de lluvia es mucho más pequeño que el habitual en los estudios hidrológicos de cauces naturales. Los intervalos de tiempo de media hora o una hora, habituales en el estudio hidrológico de una cuenca fluvial no son admisibles en general en zona urbana. Es recomendado operar con periodos de tiempo de 5 a 10 minutos, como norma general, o incluso menores según el tamaño de la cuenca. Lo que supone una información muy detallada de la evolución de la lluvia en el tiempo (Gómez, 2007).

La erosión hídrica es un proceso complejo de preparación y separación del material en partículas individuales (arcilla, limo y arena) y pequeños agregados por acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. Las partículas desprendidas son arrastradas pendiente abajo por el escurrimiento superficial, lo cual produce, a su vez, el desprendimiento de nuevo material. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos) que se mueve con una velocidad mayor y es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos (Gaitán et al., 2017).

Suarez, (2001) estima que en un suelo sin protección vegetal se calculan hasta cincuenta metros cúbicos de suelo removido por hectárea en una lluvia fuerte de una hora de

duración. Este autor sostiene que la erosión es una función del poder erosionante del agua y de la erosionabilidad del suelo, por tanto, la erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma, en consecuencia, cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta la erosión será más rápida

3.2.2.2 Transformación Lluvia-Caudal

La modelación del proceso precipitación – escorrentía por la metodología convencional agregada para eventos se fundamenta en la obtención de caudales máximos o de crecientes a la salida de una cuenca para una tormenta específica, en un rango de tiempo determinado. Este caudal máximo se estima a partir de los datos de precipitación máxima; considerando como primer paso el cálculo de la precipitación neta (agua que se transforma en escorrentía superficial) que resulta de la resta entre la precipitación y las pérdidas por infiltración, evapotranspiración, interceptación y almacenamiento superficial.

Este paso genera un nuevo hietograma de precipitación neta o efectiva que debe ser transformado a un hidrograma (respuesta de la cuenca ante los excesos de precipitación) siguiendo diferentes metodologías para ello, ya sean, el método racional, hidrogramas unitarios sintéticos, empíricos o conceptuales. La variabilidad espacial en estos modelos se tiene en cuenta al dividir la cuenca en subcuencas Fattorelli & Fernández, (2011).

Los hidrogramas obtenidos en cada subcuenca se agregan y se transportan hidráulicamente hacia aguas abajo hasta la confluencia de salida por medio de diferentes metodologías, como la formulación con base en modelo de depósitos, o los modelos basados en las ecuaciones de movimiento del fluido, como las aproximaciones a las ecuaciones de Saint Venant, las cuales muestran la evaluación temporal de los caudales de respuesta.

Debido a que en varios contextos la solución de las ecuaciones de Saint-Venant presenta dificultades para encontrar una respuesta satisfactoria o que en ocasiones no es necesario utilizar todos los términos de las ecuaciones, existen tres simplificaciones básicas conocidas como onda dinámica, onda difusiva y onda cinemática; adicionalmente, existen

otros métodos como el Muskingum, Muskingum-Cunge, y Puls Modificado (Botero et al., 2012).

3.3 MODELACIÓN HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA

Si se sustituye el mundo real por un sistema complejo, entonces un modelo es una representación simplificada de un sistema complejo. Un modelo siempre describe los componentes básicos y más importantes de un sistema complejo, por lo tanto, un modelo trata de representar cierta semejanza y algunas, pero no todas, características del sistema real que simula (Pascual, 2016).

Inicialmente, se deben representar los procesos hidrológicos. Los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio (generalmente una cuenca) y que transforman, en principio, una precipitación en escorrentía. El objetivo de un modelo y del análisis del sistema hidrológico es estudiar y comprender su funcionamiento de manera que se pueda predecir su salida: un modelo del sistema hidrológico es una aproximación del actual sistema; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura se basa en el concepto de simplificación del sistema (Pascual, 2016).

En una cuenca de drenaje se desarrollan los procesos de un sistema hidrológico. Las condiciones de límite del sistema están dibujadas alrededor de la cuenca: estos límites se establecen al considerar la cuenca como un elemento aislado de manera que sus divisorias se extienden verticalmente, hacia arriba y hacia abajo, mediante la proyección de la divisoria de aguas entre cuencas y por medio de planos horizontales en sus límites superior e inferior (Ver Figura 9).

De esa manera, la precipitación incidente es la entrada al sistema, y queda definida como la distribuida en el plano superior del espacio de la cuenca; el caudal es la salida, y es el resultante de la interacción de los distintos planos dentro de los límites de la cuenca: el flujo que se concentra en el espacio del sistema hidrológico y se cuantifica a la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo subsuperficial también son salidas, pero si no intervienen como componentes que contribuyen al caudal modelado, se consideran pérdidas que escapan de los límites de la cuenca (Pascual, 2016).

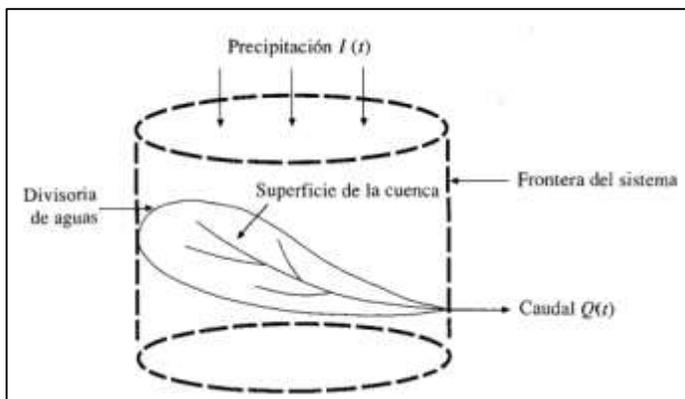


Figura 9. Cuenca de drenaje como sistema hidrológico
Fuente: (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Los modelos de erosión del suelo son descripciones matemáticas utilizadas para representar los procesos de erosión complejos de forma simplificada y se aplican para la estimación de las tasas de pérdida de suelo en una amplia gama de condiciones para la planificación y evaluación del rendimiento de las medidas de conservación de suelos y agua (Tiwari et al., 2000). Modelar la erosión del suelo es vital para aclarar los factores que controlan la erosión, comprender los procesos de conducción y su interacción, evaluar las consecuencias en el sitio y fuera del sitio sobre la productividad del suelo y la calidad del agua, y seleccionar medidas adecuadas de conservación de suelos Tiwari et al., (2000) y Blanco-Canqui & Lal, (2010).

3.3.1 Tipos de modelos

En la modelación hidrosedimentológica existen dos vertientes ampliamente documentadas y definidas según el objetivo de modelación: esto es la modelación empírica y la basada en la física. A continuación, se describen las diferencias entre ambas.

3.3.1.1 Modelos empíricos

Un modelo empírico se basa en observación o experimento y no es derivado de la teoría. Se ajusta a los hechos observados y permite predecir lo que sucederá en ciertas circunstancias porque se sabe lo que sucedió antes de las situaciones evaluadas (Hudson, 1995). Los modelos empíricos no consideran los procesos intrínsecos involucrados ni cómo funciona el sistema.

Estos modelos solo se pueden operar en la dirección de diseño, donde las entradas van a un lado de la ecuación y la salida al otro lado. Se han desarrollado parámetros bajo circunstancias ambientales particulares, y por esa razón, los parámetros son apropiados solo para esa situación, aunque los modelos empíricos son rápidos para predecir la erosión del suelo, son aplicables dentro de los límites evaluados y necesitan datos plausiblemente extensos (a largo plazo). Los modelos empíricos de erosión hídrica más utilizados son: el modelo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y sus derivados (USLE modificado [MUSLE] y USLE revisado [RUSLE]) (Ketema & Dwarakish, 2019).

3.3.1.2 Modelación en base física

Los modelos en base física se derivan de una comprensión de los procesos básicos de erosión, teniendo en cuenta las leyes de conservación de la masa y la energía. Estos modelos indican los procesos naturales al explicar cada proceso físico y subprocesos del sistema relevantes para la erosión, la depositación y combinación de procesos en un sistema complejo. Este enfoque necesita una gran cantidad de datos de alta resolución. Sin embargo, tienen la capacidad de adaptar la dinámica espacio-temporal del proceso natural en curso, que no puede realizarse a través de modelos empíricos (Tiwari et al., 2000).

Además, los procesos físicos no varían de un entorno a otro y, por lo tanto, en teoría, estos modelos se pueden utilizar en entornos nuevos. Por lo general, se emplean modelos basados físicamente para dilucidar la mecánica de la erosión del suelo. Entre los ejemplos de modelos físicos se incluyen; el modelo cinemático de escorrentía y erosión (KINEROS), el proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP), modelo de contaminación de fuentes agrícolas no puntuales (AGNPS), la herramienta de evaluación de hidrología y erosión hídrica (SWAT), el modelo de simulación de respuesta ambiental de cuencas hidrográficas de fuentes no puntuales (ANSWER), el modelo para evaluar la escorrentía química y la erosión debido a los sistemas de gestión agrícola (CREAMS), el modelo europeo de erosión de suelos (EUROSEM), entre otros (Montoya, 2008; Ketema & Dwarakish, 2019).

3.3.1.3 Factores que influyen en la erosión

Erodabilidad

La erodabilidad define la resistencia del suelo tanto al desprendimiento como al transporte. Aunque la resistencia de un suelo a la erosión depende en parte de la posición topográfica, la inclinación de la pendiente y la cantidad de perturbación, como durante la labranza, las propiedades del suelo son los determinantes más importantes. La erodabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad del agregado, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración y el contenido orgánico y químico.

Las partículas grandes son resistentes al transporte debido a la mayor fuerza requerida para arrastrarlas mientras que las partículas finas son resistentes al desprendimiento debido a su cohesión. Las partículas menos resistentes son limos y arenas finas. Así, los suelos con un contenido de limo superior al 40 por ciento son altamente erosionables (Richter & Negendank, 1977).

Autores sostienen que la erodabilidad debería examinarse en términos de contenido de arcilla, ya que los suelos con un contenido de arcilla entre 9 y 30 por ciento son los más susceptibles a la erosión. El uso del contenido de arcilla como indicador de erodabilidad es teóricamente más satisfactorio porque las partículas de arcilla se combinan con materia orgánica para formar agregados o terrones del suelo y es la estabilidad de estos lo que determina la resistencia del suelo (Morgan, 2005).

Pendiente

Se espera que la erosión aumente con el incremento en la inclinación de la pendiente y su longitud, como resultado de los respectivos aumentos en la velocidad y el volumen de la escorrentía superficial. Además, mientras que, en una superficie plana, las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo al azar en todas las direcciones, en un terreno inclinado se salpica más tierra cuesta abajo que cuesta arriba, y la proporción aumenta a medida que la pendiente se inclina.

La erosión también puede disminuir al aumentar la longitud de la pendiente si, a medida que la pendiente se inclina, el suelo se vuelve menos propenso a la formación de costras y las tasas de infiltración permanecen más altas que en la tierra de pendiente más suave en la parte superior (Fox, Bryan, & Price, 1997). Del mismo modo, si la pendiente disminuye

en ángulo a medida que aumenta la longitud, la pérdida de suelo puede disminuir como resultado de la depositación. Claramente, con una gama tan amplia de posibles condiciones, no puede existir una relación única entre la pérdida de suelo y la longitud de la pendiente (Morgan, 2005).

Cobertura del suelo

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguador entre la atmósfera y el suelo. Los componentes sobre el suelo, como las hojas y los tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia que caen, de la escorrentía y del viento, de modo que se dirige menos al suelo, mientras que los componentes subterráneos, que comprenden el sistema de raíces, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo. La efectividad de una cubierta vegetal para reducir la erosión por el impacto de las gotas de lluvia depende de la altura y la continuidad del dosel, y la densidad de la cubierta del suelo (Blanco-Canqui & Lal, 2010).

La altura del dosel es importante porque las gotas de agua que caen desde 7 m pueden alcanzar más del 90 por ciento de su velocidad terminal. Además, las gotas de lluvia interceptadas por el dosel pueden unirse en las hojas para formar gotas más grandes, que son más erosivas. La cubierta vegetal disipa la energía de la escorrentía al impartir rugosidad al flujo, reduciendo así su velocidad, variable que se suele representar como un valor n de Manning, que representa la suma de la fricción impartida por las partículas del suelo, la microtopografía de la superficie y la vegetación, que actúan de forma independiente entre sí (Morgan, 2005).

3.4 MODELO KINEROS2

KINEROS2 es un modelo cinemático de escorrentía y erosión orientado a eventos y basado en principios físicos, que describe los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía y erosión de cuencas hidrográficas. Este modelo no tiene componentes que describan la evapotranspiración, ni el movimiento del agua del suelo entre tormentas y, por lo tanto, no puede mantener el equilibrio del ciclo hidrológico a largo plazo. Dadas las condiciones iniciales de humedad del suelo, calcula la escorrentía superficial y erosión para un solo evento (R. E. Smith et al., 1999).

El modelo divide la cuenca en varias subcuencas con características de precipitación, infiltración y rugosidad particulares. Luego, KINEROS2 calcula la tasa de lluvia e infiltración para cada subcuenca. La escorrentía se transporta por cada subcuenca a través de los canales (y sitios de almacenamiento, que estén presentes) hasta la salida de la cuenca; de igual modo se transportan los sedimentos a través del sistema. De esta manera, las subcuencas se representan a partir de elementos planos conectados entre sí por medio de canales hasta el punto de salida de la cuenca; transportando el flujo de plano a plano o de canal a canal.

3.4.1 Modelo hidrológico de KINEROS2

3.4.1.1 Precipitación

La precipitación se ingresa como datos pareados profundidad incremental de precipitación (mm) – tiempo, y el programa obtiene intensidad de precipitación y precipitación acumulada, según el intervalo de cálculo indicado por el modelador. La precipitación será considerada uniformemente distribuida en el espacio (sobre cada elemento), a menos que se utilicen más pluviómetros. La variabilidad espacial y temporal de la lluvia se expresa mediante la interpolación desde ubicaciones de pluviómetros a cada plano, estanque o elemento urbano (y opcionalmente canales).

La ubicación de un elemento está representada por un solo par de coordenadas x , y , como su centroide aéreo. El interpolador intenta encontrar los tres pluviómetros más cercanos que encierran las coordenadas del elemento; si tal configuración no existe, busca los dos medidores más cercanos para los cuales las coordenadas del elemento se encuentran dentro de una franja delimitada por dos líneas (paralelas) que pasan a través de las ubicaciones de los medidores y son perpendiculares a la línea que conecta los dos puntos. Finalmente, si dos de estos puntos no existen, se usa solo el instrumento más cercano. A continuación, en la Figura 10 se muestra el esquema del proceso de interpolación.

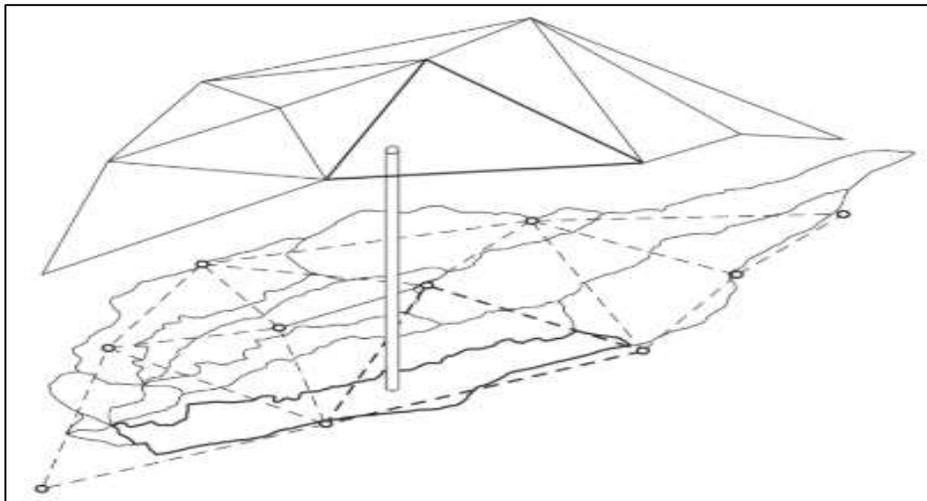


Figura 10. Representación esquemática del procedimiento de interpolación de la precipitación en kineros2. Fuente: (Semmens et al., 2007)

3.4.1.2 Interceptación

La interceptación es la porción de lluvia que inicialmente se acumula y se retiene en las superficies vegetales. El efecto de la interceptación se controla mediante dos parámetros: profundidad de interceptación y la fracción de la superficie cubierta por la vegetación interceptadora. El parámetro de profundidad de interceptación refleja la profundidad promedio de lluvia retenida por el tipo de vegetación particular o la mezcla de tipos de vegetación presentes en la superficie. La tasa de precipitación se reduce en la fracción de cobertura (es decir, una fracción de cobertura igual a 0,50 da una reducción del 50 %) hasta que la cantidad retenida alcanza la profundidad de interceptación (Wheater, Sorooshian, & Sharma, 2007).

El modelo KINEROS2 utiliza el modelo original de Gash, (1979) de interceptación analítica, que proporciona una solución simplificada al modelo de Rutter, Morton, & Robins, (1975), en este último, se agrega al modelo un módulo de flujo de tallo, en el cual una fracción de la entrada de lluvia se desvía directamente a un compartimento que comprende los troncos.

El modelo Gash representa la entrada de lluvia como una serie de tormentas discretas que están separadas por intervalos lo suficientemente largos para que el dosel y los tallos se sequen por completo; esta suposición es posible debido al secado rápido de los doseles del bosque. Cada tormenta individual se divide en tres fases posteriores: humectación del dosel, saturación y secado. Esta separación enfatiza la importancia relativa del clima contra

la estructura de la planta. Para las primeras dos de estas fases, las tasas reales de evaporación y precipitación se reemplazan por sus tasas medias para todo el período que se está modelando (Muzylo et al., 2009).

3.4.1.3 Infiltración

La infiltración puede ocurrir por la lluvia directamente en el suelo o por el agua superficial acumulada creada por el exceso de lluvia anterior.

Tasa de infiltración puntual

Está basada en tres parámetros: la Conductividad Hidráulica Saturada K_s , la Capilaridad G , y un tercer parámetro que describe el comportamiento del suelo. El modelo determina la infiltrabilidad f_c del suelo en términos del tiempo durante una precipitación constante. Sin embargo, también puede expresarse en términos de la infiltración acumulada I cuando la intensidad de la precipitación es variable $r(t)$. La función es representada mediante la Ecuación 11.

$$f_{c^*} = 1 + \frac{\gamma}{\exp(\gamma I_*) - 1} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde: f_{c^*} : Capacidad máxima de infiltración del suelo o infiltrabilidad normalizada (L/T), I_* : Infiltración acumulada normalizada (L), γ : Parámetro que describe el comportamiento del suelo

Como casos límite se incluyen los modelos de infiltración de Green-Ampt ($\gamma = 0$) y Smith Parlange ($\gamma = 1$)

$$f_{c^*} = \left[\frac{1 + I_*}{I_*} \right] \quad \text{Ecuación 12 Green-Ampt}$$

$$f_{c^*} = [1 - \exp(-I_*)]^{-1} \quad \text{Ecuación 13 Smith Parlange}$$

La Ecuación 11 se escribe mediante variables adimensionales que representan todos los parámetros normalizados Ecuación 14:

$$r_* = \frac{r}{k_s}; f_* = \frac{f}{k_s}; I_* = \frac{I}{G\Delta\theta_i}; t_* = \frac{tk_s}{G\Delta\theta_i} \quad \text{Ecuación 14a, 14b, 14c, 14d}$$

Donde (*) representa el parámetro normalizado, f : Tasa de infiltración (L/T), k_s : Conductividad hidráulica saturada (L/T), r : Intensidad de precipitación (L/T), I : Infiltración acumulada (L), G : Capilaridad (L), $\Delta\theta_i$: Índice de saturación inicial del suelo (L), t : Tiempo (T).

La tasa de infiltración f , durante una tormenta será la menor entre la infiltrabilidad f_c y la intensidad de precipitación r . Las relaciones entre el tiempo, f e I ; pueden ser encontradas resolviendo las Ecuación 11 y Ecuación 14, substituyendo $I = f dt$.

$$(t_* - t_{p*})(1 - \gamma) = \frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{(f_* - 1 + \gamma)(r_{p*} - 1)}{(f_* - 1 + \gamma)(f_* - 1)} \right] - \ln \left[\frac{(f_*(r_{p*} - 1))}{r_{p*}(f_* - 1)} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde: t_* : Tiempo normalizado (T), t_{p*} : Tiempo de encharcamiento normalizado (T), f_* : Tasa de infiltración normalizada (L/T) y r_{p*} : Intensidad de precipitación en el momento del encharcamiento, normalizada (L/T).

El subíndice p indica situación de encharcamiento. Esta situación se da cuando la infiltrabilidad es igual a la precipitación; $f_c = r$. La variable base del método es el contenido inicial de agua, que se presenta como el déficit de saturación del suelo $G\Delta\theta_i$. El parámetro G es definido en términos de Capacidad de absorción o Capilaridad S del suelo. Sin embargo, puede ser calculado a partir de la conductividad hidráulica característica para condiciones no saturadas $K(h)$.

$$G = \frac{S^2}{2K_s\Delta\theta_i} \cong \int_{-\infty}^0 K(h)dh \quad \text{Ecuación 16}$$

$\Delta\theta_i$: Índice de saturación inicial del suelo, es igual a $\Delta\theta_i = \theta_s - \theta_i$, donde θ_s es el contenido de humedad en la saturación.

3.4.1.4 Transformación lluvia – caudal

Los modelos de tránsito hidráulico pueden utilizarse para describir la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para producir el hidrograma de flujo a la salida de ésta, y luego tomar este hidrograma como la información de entrada en el extremo aguas arriba de un río o un sistema de tuberías y transitarlo hacia el extremo aguas abajo.

La aplicación de los principios físicos de continuidad y de conservación de momento (m.v) a un volumen elemental de agua que discurre por una superficie permite obtener un juego de ecuaciones diferenciales denominadas modelo hidrodinámico completo de flujo variable unidimensional o ecuaciones de Saint Venant. De la resolución de dichas ecuaciones se obtienen hidrogramas de escorrentía basados en parámetros físicos obtenidos en las condiciones de aplicación concretas.

Este método es de aplicación general, desde el punto de vista teórico y al estar basado en la aplicación de principios físicos universales. El medio físico (cuenca) se representaría como una sucesión de planos donde al producirse un exceso de lluvia durante una tormenta se genera flujo superficial hacia una red de cauces que drenan el agua hasta la boca de la cuenca. Las ecuaciones de Saint-Venant consideran las propiedades hidráulicas del medio distribuidas a lo largo del camino del agua (pendiente, rugosidad de la superficie, forma de los canales, radio hidráulico, etc.).

KINEROS2 simula el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía, mediante las ecuaciones de Saint-Venant, y su simplificación de Onda Cinemática. Esta aproximación solo tiene en cuenta las fuerzas gravitatorias y las de fricción; además, el modelo no puede reproducir la influencia del flujo desde aguas abajo y no es capaz de simular el proceso de laminación. El método de Onda Cinemática se utiliza para modelar dos tipos de fuentes de flujo de escorrentía, flujo superficial y flujo en canal (Fortuño, 2014).

3.4.1.4.1 Flujo superficial

La aparición de agua libre en la superficie del suelo se encharca y da lugar a la escorrentía en la dirección de la pendiente local (ver Figura 11).

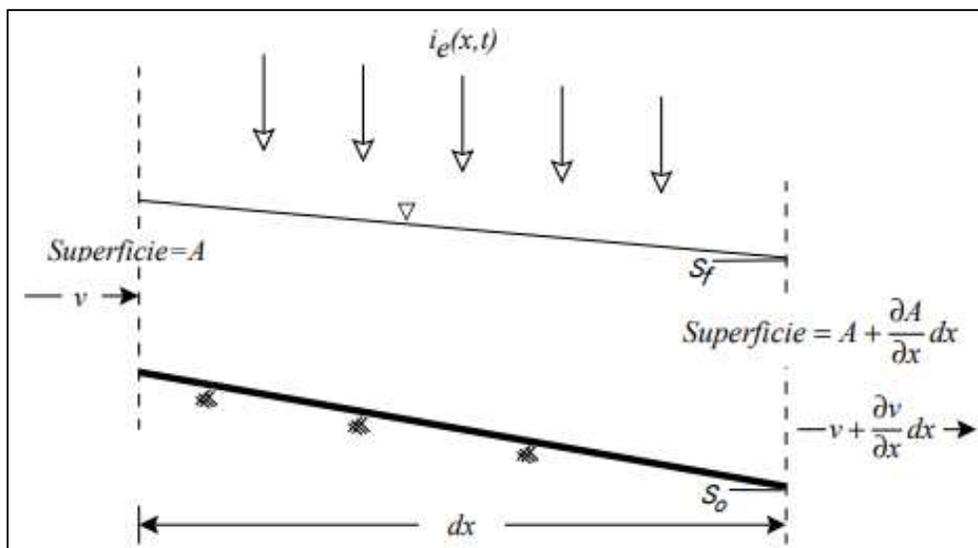


Figura 11. Esquema de flujo superficial
Fuente: (Muñoz Carpena, 2014)

La lluvia puede producir encharcamiento por dos mecanismos. El primer mecanismo implica una tasa de lluvia, que excede la infiltrabilidad del suelo en la superficie. El segundo mecanismo es cuando una capa de suelo más profunda restringe el flujo descendente, y por tanto se llena la porosidad disponible de la capa superficial.

La forma general de la ecuación de Onda Cinemática para flujo Hortoniano, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i(x, t) \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde: A es el área de la sección transversal del canal (m^2), Q : el caudal que pasa por dicha sección (m^3/s) y q_i el flujo lateral por unidad de ancho ($m^3/m.s$).

En los planos, donde se considera flujo Hortoniano, el análisis se realiza por unidad de ancho, ya que, se considera una sección transversal rectangular con ancho constante. Adicionalmente, el caudal lateral considerado es la intensidad de precipitación neta, i , estimada como la diferencia entre la tasa de precipitación, r , y la tasa de infiltración, f . Este tipo de flujo se representa en la Figura 11 y se puede reescribir como:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i = r - f \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde: y : es el nivel del agua en la sección transversal (m), q : el caudal por unidad de ancho, $i(x,t)$: es la intensidad de precipitación neta (m/s) y x y t : las variables independientes de espacio y tiempo

El flujo Hortoniano ha sido ampliamente estudiado y se ha obtenido la aproximación de Onda Cinemática que consiste en una simplificación de las ecuaciones completas de Saint-Venant o ecuaciones dinámicas, donde, las fuerzas inerciales y de presión pueden ser despreciadas puesto que las fuerzas gravitacionales y las de fricción se puede demostrar que gobiernan el flujo.

De acuerdo a lo anterior, la aproximación de Onda Cinemática considera que la pendiente de fondo es pequeña de modo que $S_0 = S_f$ y que se pueden utilizar coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente como por ejemplo la ecuación de Manning (Haan, Barfield, & Hayes, (1994); Nanía & Gómez Valentín, (2004) Citado por Zambrano, (2015)).

Teniendo en cuenta la ecuación de cantidad de movimiento con las simplificaciones indicadas, se puede utilizar la ecuación para flujo uniforme de Manning, que representa el equilibrio entre las fuerzas actuantes de gravedad y fricción. La velocidad se puede obtener como:

$$v = \frac{1}{n} S_0^{1/2} \cdot R_h^{0,67} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde: S_0 es la pendiente del plano (m/s), R_h el radio hidráulico (m) y n el coeficiente de rugosidad de Manning.

En flujos superficiales, el ancho del flujo es considerablemente mayor que la profundidad, de modo que, el Radio Hidráulico puede ser reemplazado por el calado en los elementos planos:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{w \cdot y}{w} \cong y \quad \text{Ecuación 20}$$

Adicionalmente, se conoce que:

$$y = \alpha q^\beta \quad \text{Ecuación 21}$$

De manera que al realizar las sustituciones apropiadas en la ecuación de continuidad Ecuación 18 queda expresada como:

$$q = vy = \left(\frac{1}{n} S_0^{0.5}\right) \cdot y^{5/3} \quad \text{Ecuación 22}$$

Al despejar la altura y se tiene:

$$y = \left(\frac{n}{S_0^{1/2}}\right)^{3/5} \cdot q^{3/5} \quad \text{Ecuación 23}$$

Se deduce de la Ecuación 21 los valores de α y β

$$\alpha = \left(\frac{n}{S_0^{1/2}}\right)^{3/5} ; \beta = \frac{3}{5}$$

Al derivar la Ecuación 23 y sustituir el término en la Ecuación 18 se tiene:

$$\alpha\beta q^{\beta-1} * \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i \quad \text{Ecuación 24}$$

La Ecuación 17 y Ecuación 21 se conocen como ecuaciones de la onda cinemática y son muy utilizadas para el cálculo de escorrentía superficial en laderas. Existen limitaciones en su uso (reflejadas en el número cinemático) que físicamente se traducen en la no existencia de efectos de remanso en la corriente (pendientes excesivamente bajas o no descendentes en todos sus segmentos). La ecuación de onda cinemática permite obtener resultados satisfactorios para pendientes superiores al 10 % (Singh, 2002 y Muñoz Carpena, 2014).

Para poder considerar un medio complejo como el natural (teniendo en cuenta los cambios de pendiente y vegetación que normalmente se pueden encontrar a lo largo de una ladera) es necesario acudir al uso de métodos numéricos como los denominados de diferencias finitas. La solución de las ecuaciones de onda cinemática permite determinar la distribución del flujo como una función de la distancia, x , y del tiempo t (Montoya Velilla, Toro Botero, Carvajal Serna, & Vélez Upegui, 2006).

El objetivo de la solución numérica es resolver las ecuaciones anteriormente citadas para determinar el hidrograma de salida $q(x, t)$ en cada uno de los puntos de la malla x - t , dados los parámetros del canal α y β , el flujo lateral $i(t)$ y las condiciones iniciales y de contorno o frontera. La solución numérica puede manejar con mayor facilidad las variaciones en las propiedades del canal y en las condiciones iniciales y de frontera. Ya que Q depende de x y t , se establece un sistema cartesiano t vs. x , y se dibuja un elemento diferencial.

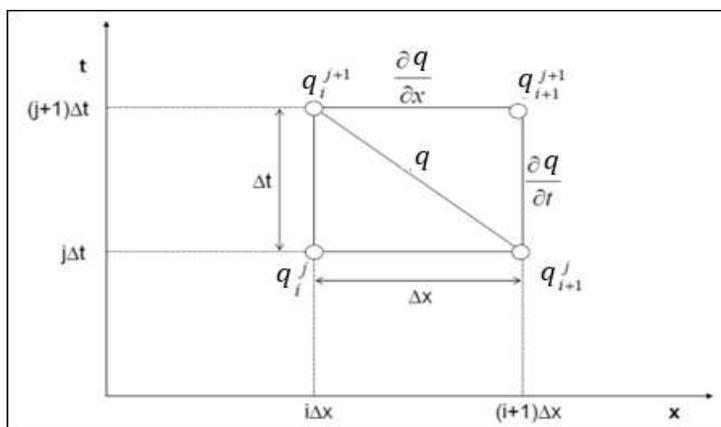


Figura 12. Esquema de diferencias finitas para la solución de la ecuación de Onda Cinemática
Fuente: (Ven Te Chow et al., 1994)

Para resolver la ecuación de forma numérica, la derivadas espaciales y temporales de q se aproximan en la malla x - t , tal como se muestra en la Figura 12. El valor desconocido es q_{i+1}^{j+1} . Los valores de la j -ésima línea de tiempo se han determinado previamente, lo mismo que q_i^{j+1} . A continuación, se describe el esquema lineal de discretización para plantear las ecuaciones en diferencias finitas, en el cual q_{i+1}^{j+1} se calcula como una función lineal de los valores conocidos de q .

Con el fin de plantear las ecuaciones de diferencias finitas se usa un método de diferencias regresivas. La forma de diferencias finitas de la derivada espacial de q_{i+1}^{j+1} se encuentra sustituyendo los valores de q en la $(j+1)$ -ésima línea de tiempo. La forma en diferencias finitas de la deriva temporal se encuentra de manera similar al sustituir los valores de q en la $(j+1)$ -ésima línea de distancia.

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \alpha \cdot (q_{i+1}^{j+1})^\beta \cdot \frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta x}$$

Ecuación 25

Si se utilizara el valor q_{i+1}^{j+1} en lugar de q en el término $\alpha\beta q^{\beta-1}$ de la ecuación de onda cinemática, la ecuación resultante sería no lineal en q_{i+1}^{j+1} . Para crear una ecuación lineal, el valor de q usado debe ser el promedio de los valores de la diagonal:

$$q \cong \frac{q_{i+1}^j + q_i^{j+1}}{2}$$

La forma de diferencias finitas de la ecuación de onda cinemática será:

$$\frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta x} + \alpha\beta \frac{q_{i+1}^j + q_i^{j+1}}{2}^{\beta-1} * \frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta t} = i$$

Ecuación 26

Si el plano que se está considerando recibe aportes de otros planos aguas arriba, la condición de frontera en el extremo aguas arriba será:

$$y(0, j) = \frac{\sum_1^{c \text{ aportantes}} q(\text{nodo final}, t)}{\alpha \cdot w}$$

Ecuación 27

3.4.1.4.2 Flujo en canales

El flujo de la superficie libre en los canales también está representado por la aproximación cinemática a las ecuaciones de flujo uniforme y gradualmente variadas. Los segmentos de canal pueden recibir una entrada lateral uniformemente distribuida pero variable en el tiempo, en uno o ambos lados del canal, desde uno o dos canales en el límite aguas arriba, y / o desde un área de tierras altas en el límite aguas arriba. Las dimensiones de los elementos de flujo, se eligen para cubrir completamente la cuenca, por lo que la lluvia en el canal no se considera directamente (Semmens et al., 2007).

La ecuación de continuidad para canales es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l(x, t)$$

Ecuación 28

Dónde: A : es el área de la sección transversal (m^2), Q : el caudal en el canal (m^3/s), $q_l(x, t)$: es el flujo lateral por unidad de longitud del canal ($m^3/m.s$), x, t : las variables independientes de espacio y tiempo.

Se utiliza la ecuación de Manning para obtener una relación entre el área y el caudal, pero a diferencia de la simplificación realizada para el radio Hidráulico en el caso de flujo Hortoniano (Ecuación 20), en este caso sí debe ser considerado la geometría del canal:

$$Q = v.A = \frac{1}{n} S^{1/2} . R_h^{2/3} . A = \frac{1}{n} S^{1/2} . \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} . A$$

Ecuación 29

Se había definido la relación entre área y caudal como:

$$A = \alpha . Q^\beta$$

Ecuación 30

De donde se deduce que:

$$\alpha = \left(\frac{n . P^{2/3}}{S_0^{1/2}} \right)^{3/5}$$

$$\beta = \frac{3}{5}$$

Como se explicó en el ítem de flujo superficial, se utiliza el esquema numérico de diferencias finitas para solución de la ecuación de onda cinemática:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_i^{j+1}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x}$$

$$q_l(x, t) = (r_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^{j+1}) . L$$

Ecuación 31

Si el canal que se está considerando tiene flujos tributarios, la condición de contorno será:

$$Q(0,j) = \frac{\sum_1^{c \text{ aportantes}} Q(\text{nodo final}, t)}{\alpha \cdot w}$$

Ecuación 32

Se utiliza el método de iteraciones de Newton-Raphson para hallar el calado. Posteriormente se calcula el área mojada y el perímetro mediante las propiedades hidráulicas para la geometría de un canal trapezoidal y el caudal se estima mediante la Ecuación 30. La velocidad se calcula dividiendo el caudal entre el área mojada (Zambrano, 2015).

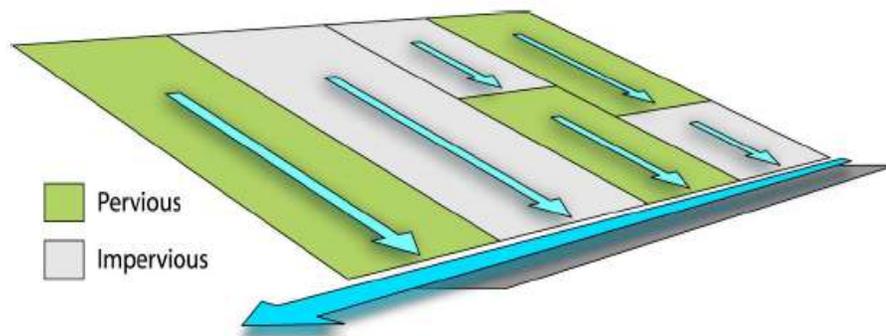


Figura 13. Planos idealizados con flujo superficial para efectuar las modelaciones.
Fuente: (Semmens et al., 2007)

Para realizar la modelación hidrodinámica con las ecuaciones anteriormente descritas, se requiere dividir la cuenca en planos idealizados con flujo superficial que tributan a una serie de canales. La superficie de escorrentía puede estar compuesta por superficies rectangulares, que permite la simulación de áreas de flujo convergente, o áreas de pendiente no uniforme, resistencia hidráulica o suelos. La escorrentía Hortoniana se simula para la red de elementos, lo que culmina en la producción de un hidrograma simulado en la salida. Los procesos simulados y las ecuaciones involucradas se describirán en orden general de ocurrencia en el proceso de generación de escorrentía y erosión (R. E. Smith et al., 1990).

3.4.2 Modelo sedimentológico de KINEROS2

El modelo KINEROS2 simula el transporte y la sedimentación de partículas producidos en la superficie del suelo y a través de la red de drenajes (R. E. Smith et al., 1990). El modelo se divide en dos componentes de manera análoga al modelo hidrológico: elementos planos

y elementos canales. En los elementos planos se considera la erosión causada por la energía de las gotas de lluvia y por el flujo una vez superada la tensión crítica. En los elementos canales se considera la erosión causada en la red de drenajes debida a la erosión por flujo. En ambos casos los procesos erosivos y de transporte están controlados por la variación de las características del flujo (caudales, velocidad, profundidad y esfuerzo cortante) y se permite el aporte de los elementos tributarios (Zambrano, 2015).

La ecuación utilizada para describir la dinámica de los sedimentos es la ecuación de balance de masa.

$$\frac{\partial(A \cdot C_S)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_S)}{\partial x} - e(x, t) = q_{sL}(x, t) \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde: C_S : Concentración de sedimentos locales en la corriente $C_S = C_S(x, t)$, $\left(\frac{L^3}{L^3}\right)$, Q : Descarga de agua $\left(\frac{L^3}{T}\right)$, A : Área de la sección transversal del flujo (L^2) , e : Tasa de erosión del suelo $\left(\frac{L^2}{T}\right)$, q_{sL} : Caudal sólido lateral por unidad de longitud de los canales $\left(\frac{L^3}{T \cdot L}\right)$.

La tasa de erosión del suelo (e) puede ser positiva (erosión) o negativa (deposición). La erosión neta se halla sumando la erosión por impacto con la erosión por flujo.

$$e = e_s + e_h \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde: e_s : Erosión por impacto, e_h : Erosión por flujo

Mediante la siguiente ecuación se estima la **erosión por impacto**:

$$e_s \begin{cases} C_f \cdot k(h) \cdot r^2 & q > 0 \\ 0 & q < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde: C_f : Constante relacionada al suelo y a las propiedades superficiales (T^{-1}) , $k(h)$: Factor de reducción que representa la reducción en la erosión causado por un incremento de la profundidad del agua. Toma el valor 1 antes del inicio de la escorrentía 0 para flujos muy profundos. La variable $k(h)$ es igual $e^{(-C_h \cdot h)}$ donde C_f es la efectividad de amortiguamiento de la superficie del agua y tanto C_h como h son valores positivos.

La **erosión por flujo** se estima mediante la siguiente ecuación:

$$e_h = c_g \cdot (C_m - C_s) \cdot A$$

Ecuación 36

Donde: c_g : Coeficiente de transferencia de sedimentos, cuando ocurre la deposición c_g es igual a la velocidad de asentamiento de la partícula sobre la profundidad hidráulica (h); $c_g = V_s/h$ (T^{-1}), C_m : Concentración en el equilibrio de la capacidad de transporte ($\frac{L^3}{L^3}$), C_s : Concentración de sedimentos locales en la corriente $C_s = C_s(x, t)$, ($\frac{L^3}{L^3}$), A : Área de la sección transversal del flujo (L^2).

La micro-topografía también interactúa con la erosión ya que la erosión hidráulica está definida por la profundidad hidráulica media efectiva y la velocidad relacionada a esta. En la Figura 14 ilustra algunas de las posibles configuraciones que el flujo puede asumir en relación con la microtopografía de pendiente transversal local.

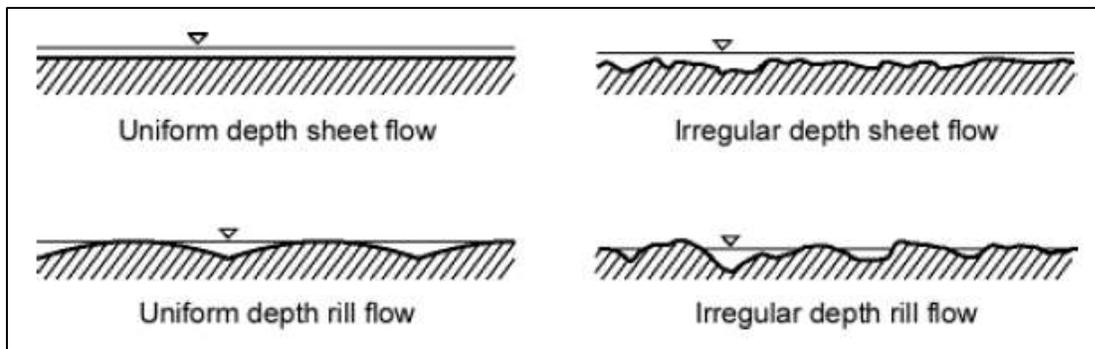


Figura 14. Tipos de flujo asociados a la microtopografía

Fuente: (Semmens et al., 2007)

La velocidad de asentamiento es calculada teniendo en cuenta la densidad y tamaño de la partícula, aproximando la forma de las partículas a una esfera (condiciones de arrastre y velocidades de caída análogas), mediante la siguiente ecuación (R. E. Smith et al., 1990).

$$v_s^2 = \frac{4 \cdot g \cdot (S_s - 1) \cdot d}{3 \cdot c_D}$$

Ecuación 37

Donde: v_s : Velocidad de sedimentación de las partículas ($\frac{L}{T}$), S_s : Gravedad específica de la partícula, c_D : Coeficiente de arrastre de la partícula, d : Diámetro de la partícula, g : Aceleración de la gravedad

El coeficiente de arrastre (C_D) es función del Número de Reynolds como se muestra en la Ecuación 38.

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad \text{Ecuación 38}$$

En KINEROS2 para determinar la capacidad de transporte se utiliza la ecuación de Engelund y Hansen (1967).

$$C_m = \frac{0,05 \cdot u \cdot u_*^3}{g^2 \cdot d \cdot h \cdot (S_s - 1)^2} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde: C_m : Concentración en el equilibrio de la capacidad de transporte $\left(\frac{L^3}{L^3}\right)$, u : Velocidad de sedimentación de las partículas $\left(\frac{L}{T}\right)$, u_* : Velocidad de corte definida como $\sqrt{ghS} \left(\frac{L}{T}\right)$, d : Diámetro de la partícula, h : Profundidad del agua, S_s : Gravedad específica de la partícula

El modelo KINEROS2 puede realizar estimaciones de erosión para diferentes tamaños de partículas, hasta 5 diámetros (Semmens et al., 2007).

En los canales se desprecia la erosión por impacto. El q_{SL} caudal sólido lateral por unidad de longitud de los canales, en un elemento importante por los flujos laterales, mientras que para las 'upland areas' (superficies en la parte alta) q_{SL} será cero.

Las ecuaciones son resueltas para $C_s(x, t)$ comenzando aguas arriba teniendo en cuenta las condiciones de contorno. Si no hay flujo en el extremo superior del canal, cualquier entrada de sedimento lateral será sedimentada. La condición de contorno superior será:

$$C_s(0, t) = \frac{q_{SL}}{q_c + v_s W_B} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde: C_s : Concentración de sedimentos locales en la corriente $\left(\frac{L^3}{L^3}\right)$, q_{SL} : Flujo de sólidos lateral en los canales por unidad de longitud $\left(\frac{L^3}{T \cdot L}\right)$, q_c : Flujo de agua lateral neto en el canal por unidad de longitud $\left(\frac{L^3}{T \cdot L}\right)$, v_s : Velocidad de sedimentación de las partículas $\left(\frac{L}{T}\right)$, W_B : Ancho del fondo del canal (L) .

Dirección de sedimentos a través de estructuras de detención.

Para un flujo rápido y poco profundo donde la erosión es generalmente más importante que la depositación, el uso de un diámetro medio de partícula generalmente puede justificarse para fines de simulación. Sin embargo, cuando los depósitos son elementos importantes en la cuenca, KINEROS2 requiere que se especifique una distribución del tamaño de partícula, porque la depositación es el único proceso de sedimentación, y la velocidad de sedimentación es muy sensible al tamaño de partícula. La distribución se caracteriza por una desviación media y estándar y se supone normalmente distribuida en varias clases de tamaño de partícula especificadas por el usuario.

El enfoque para la sedimentación en las zonas de depósito en KINEROS2 es similar al de la sedimentación de tanques, y las velocidades de caída de partículas y las velocidades de flujo se utilizan para encontrar las trayectorias que cruzan el fondo del depósito. Las velocidades de caída de las partículas se calculan para cada clase de tamaño de partícula utilizando la Ecuación 37.

Las partículas se distribuyen uniformemente a través de la profundidad del depósito en la primera sección en el extremo de entrada, y la caída relativa frente a las velocidades laterales desde ese punto en adelante determina la proporción de cada tamaño de partícula que se deposita entre secciones transversales sucesivas. En secciones sucesivas, cada clase de tamaño de partícula tendrá una profundidad conceptual desde la superficie hasta la parte superior del área que aún contiene sedimentos de ese tamaño (R. E. Smith et al., 1990).

4 METODOLOGÍA

A continuación, se realiza una descripción de las actividades realizadas para dar alcance al desarrollo de la propuesta de trabajo de grado.

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en una microcuenca del municipio de Santiago de Cali, la que es la capital del Valle del Cauca, la ciudad posee una superficie total de 560.3 km², y su área urbana es la tercera más poblada del país con 2'319.655 habitantes, se encuentra ubicada al suroccidente colombiano, recostada sobre la cordillera occidental y su límite oriental es el río Cauca. A continuación, se describirá la ciudad y por último se encuentra el detalle de la microcuenca (ACODAL, 2016).

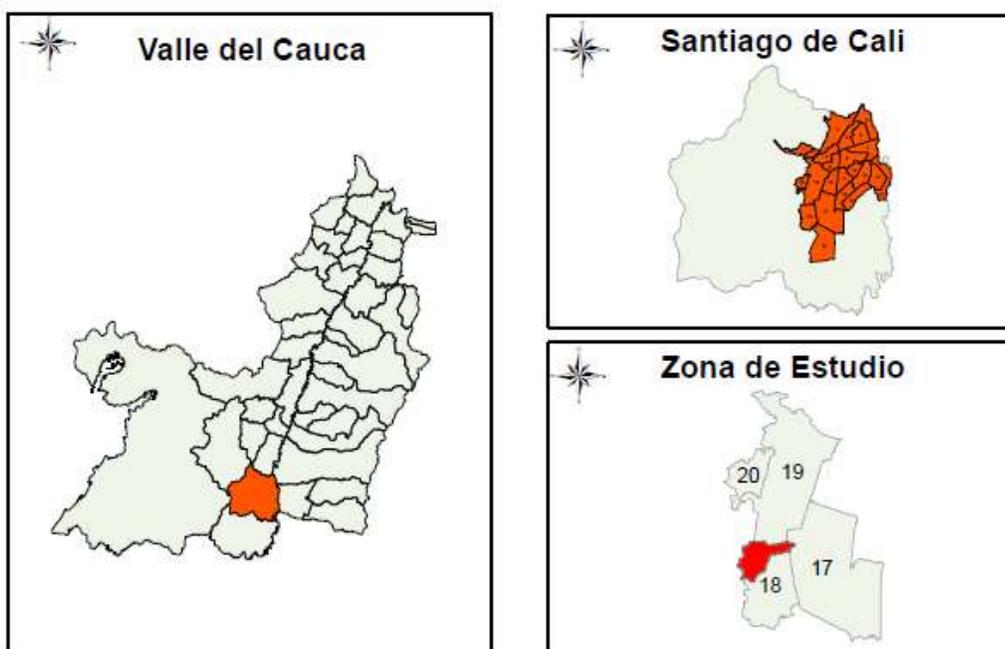


Figura 15. Localización del área de estudio respecto al municipio de Santiago de Cali y al departamento del Valle del Cauca. Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

La zona urbana de Santiago de Cali está conformada por 22 comunas, en ellas existen 335 barrios que en total ocupan un área de 11.923,87 hectáreas, siendo la comuna 22 la de mayor extensión con 1.160,26 hectáreas a pesar de tener sólo 5 barrios, mientras la comuna 19 tiene el mayor número de barrios con 33 y ocupa un total de 1.076,55 hectáreas (ACODAL, 2016).

El municipio de Santiago de Cali presenta una subdivisión en las características de su geografía que permite reconocer dos zonas de marcada diferencia topográfica: la zona del Valle del río Cauca y la zona de montaña de la cordillera occidental (DAPM, 2014). En la Figura 16 se presenta la distribución de las 22 comunas en el perímetro urbano de la ciudad de Santiago de Cali.

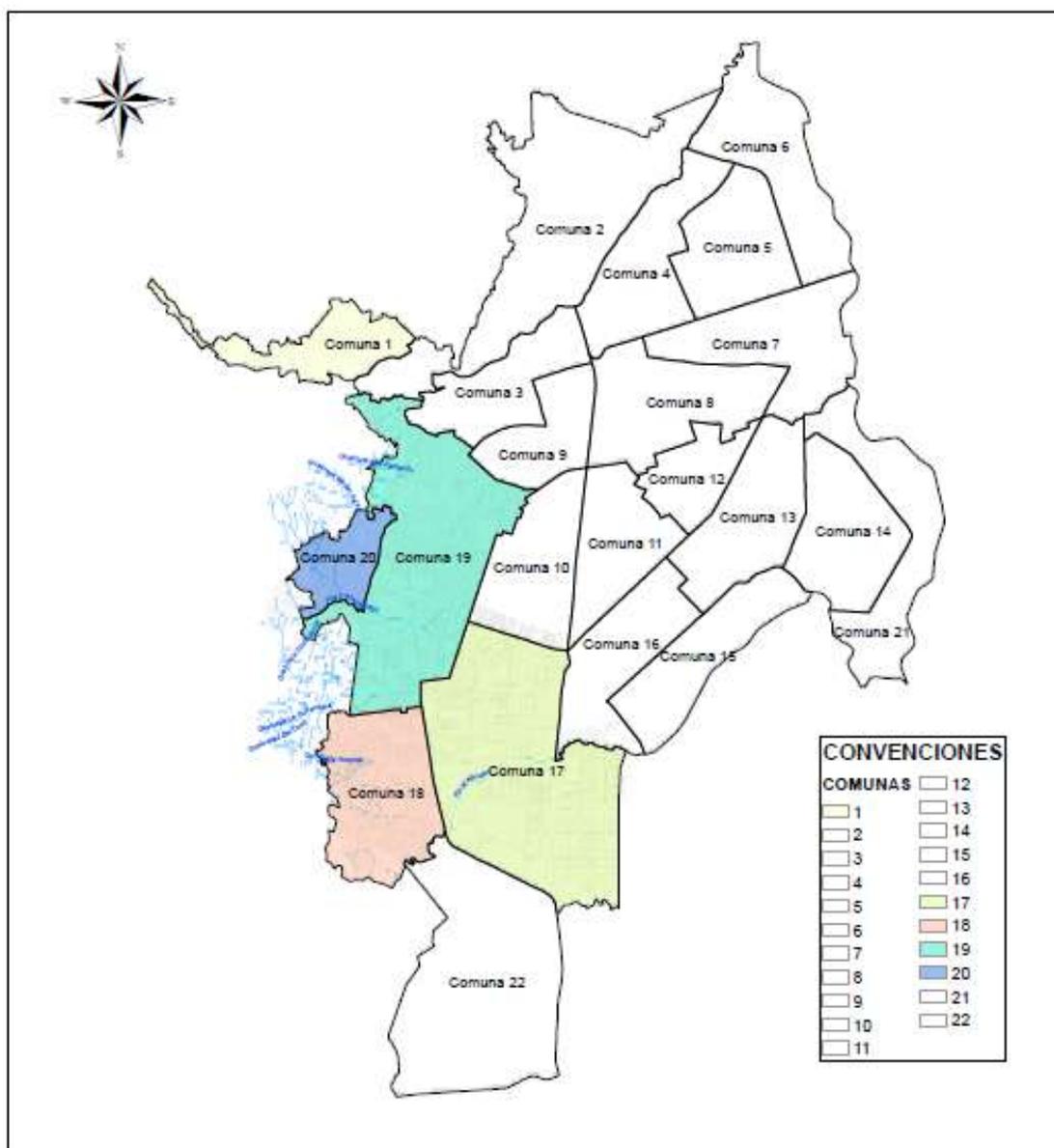


Figura 16. Mapa de distribución de las 22 comunas en el perímetro urbano de la ciudad de Santiago de Cali. Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

Las comunas de la ciudad de Cali que presentan características topográficas de montaña contiguas a la cordillera occidental y que hacen parte de la ladera son las Comunas 1, 18, 20 y parte de la comuna 17 y 19 (ACODAL, 2016).

La ciudad de Santiago de Cali cuenta con diez ríos, de los cuales siete pasan o bordean la zona urbana en un sistema complejo que drena a través de tres (3) cuencas hacia el río Cauca, o como son denominados por la empresa prestadora de servicios públicos - EMCALI, tres (3) subsistemas de drenaje, compuestos por tres tipos de alcantarillado sanitario, pluvial y combinado. Los sistemas de drenaje se denominan, subsistema de drenaje sur, subsistema de drenaje nor-occidental y subsistema de drenaje oriental.

De acuerdo con información consignada en el plan de saneamiento y manejo de vertimientos - PSMV (2016-2030) el sistema de drenaje de la ciudad está compuesto por 3.448,1 km de redes; 92,75 km de canales, 68.667 cámaras de inspección; 115.000 sumideros, 31 estructuras retenedoras de sólidos y 823 estructuras de separación, 65.000 sumideros, sistemas de derivaciones, sub-derivaciones y ramificaciones de los ríos que hacen parte fundamental del sistema de drenaje. En la Figura 17 se especifica la distribución de los subsistemas de drenaje de la ciudad de Cali (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016).

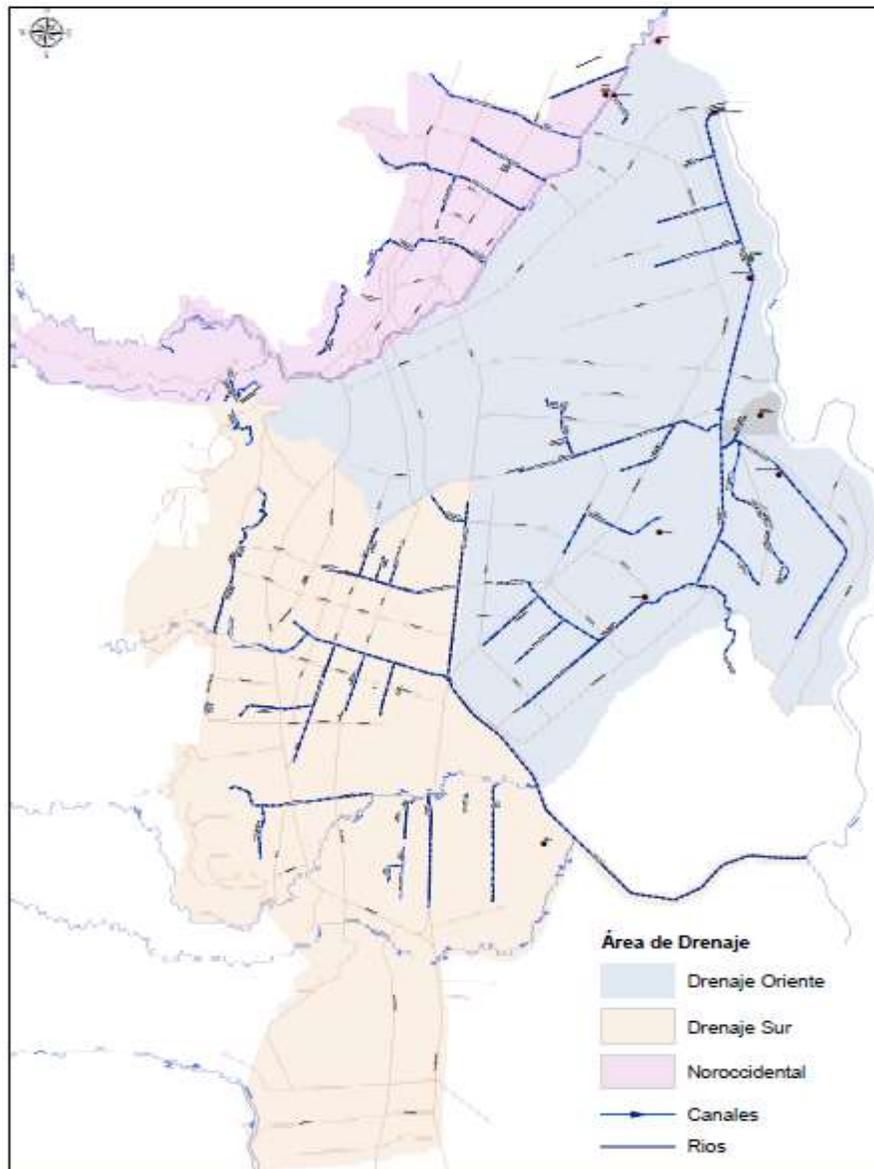


Figura 17. Delimitación de los subsistemas de drenaje en la zona urbana de Santiago de Cali. Fuente: (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016)

La subcuenca de estudio se encuentra ubicada en el sistema de drenaje sur de la ciudad, hace parte de las áreas tributarias que aportan sus flujos pluviales y sanitarios hacia el canal autopista 3 y el interceptor oriental primer sector. El flujo generado en esta subcuenca drena hasta el desarenador denominado “gran limonar” ubicado en la carrera 68 con calle 10. En la Figura 18 se muestra la subcuenca propuesta como área de estudio, ubicada en el perímetro urbano y sanitario de la ciudad.

A continuación, en la Figura 18 se muestra el área de estudio donde se señalan las redes de la empresa prestadora del servicio de alcantarillado que define el límite de prestación del servicio para el área de estudio, además se muestra que en la cuenca hay una red hídrica importante, donde se identifican dos quebradas principales, denominadas La Guillermina y Hospital con un área de 1,6 Km² y 0,85 Km² respectivamente.

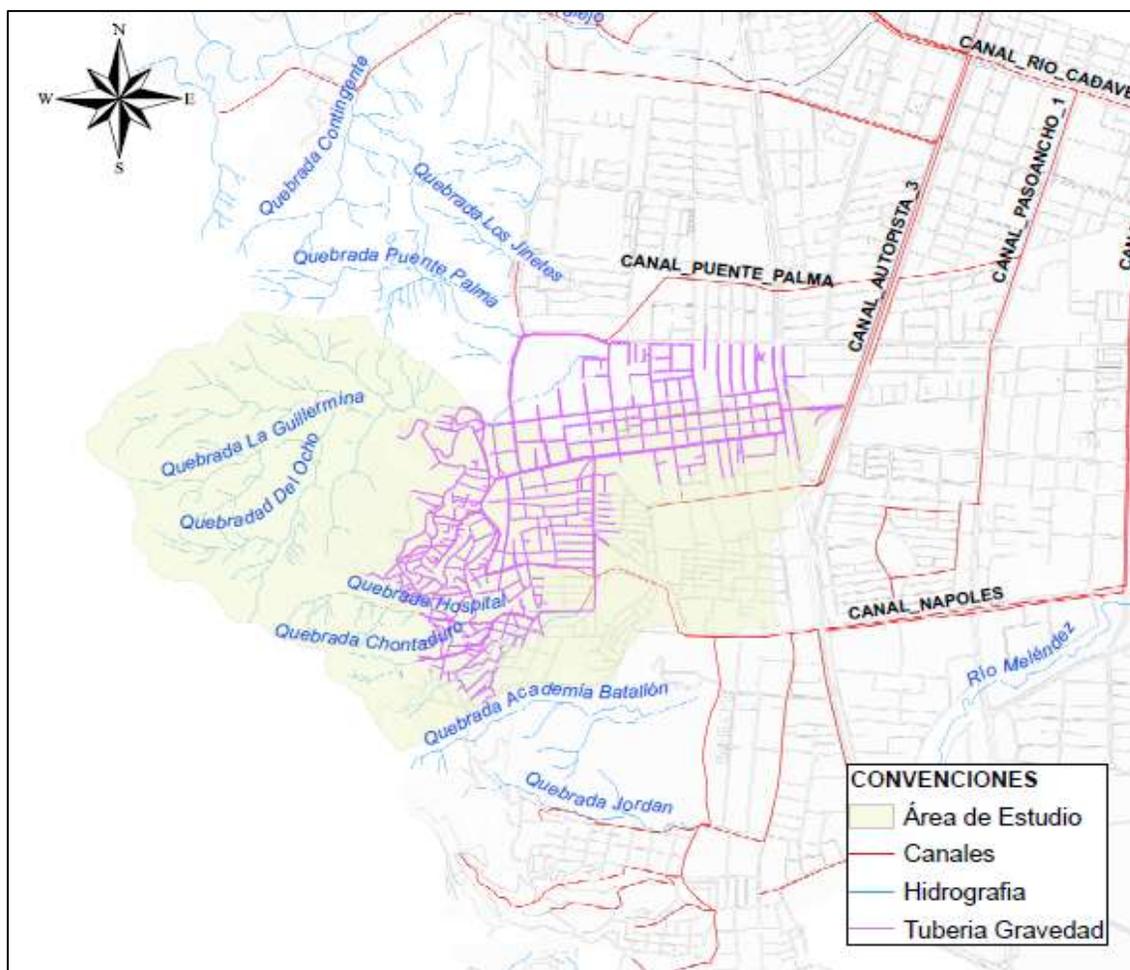


Figura 18. Área de la subcuenca de estudio dentro de los límites sanitarios y urbanos de la ciudad. Fuente: Elaboración propia mediante software AutoCAD 2020.

En la Figura 18 se muestra, que una vez inicia el perímetro urbano, los cauces de las quebradas La Guillermina y Hospital son conducidos hacia la red de alcantarillado. Este sistema de alcantarillado se interrelaciona con cuatro unidades desarenadoras y un conjunto de estructuras de separación, antes de su descarga sobre el punto objeto de estudio ubicado sobre la carrera 68 con calle 10. En esta ubicación se encuentra una estructura retenedora de sólidos final, denominada Gran Limonar, y una estructura de

separación que deriva los flujos hacia el canal autopista 3 y hacia el interceptor oriental primer sector.

Las microcuencas de la quebrada la Guillermina y la quebrada Hospital, ubicadas sobre el área rural de la ciudad; se encuentran fuera del perímetro sanitario, es decir, que la gestión en la prestación del servicio de recolección y transporte de los flujos de agua residual y pluvial producidos en estas áreas no son de responsabilidad de EMCALI, aunque, se ha evidenciado que generan un impacto sobre la operación del sistema de drenaje receptor. A continuación, en la Figura 19 se muestran las áreas de las microcuencas de las quebradas La Guillermina y Hospital.

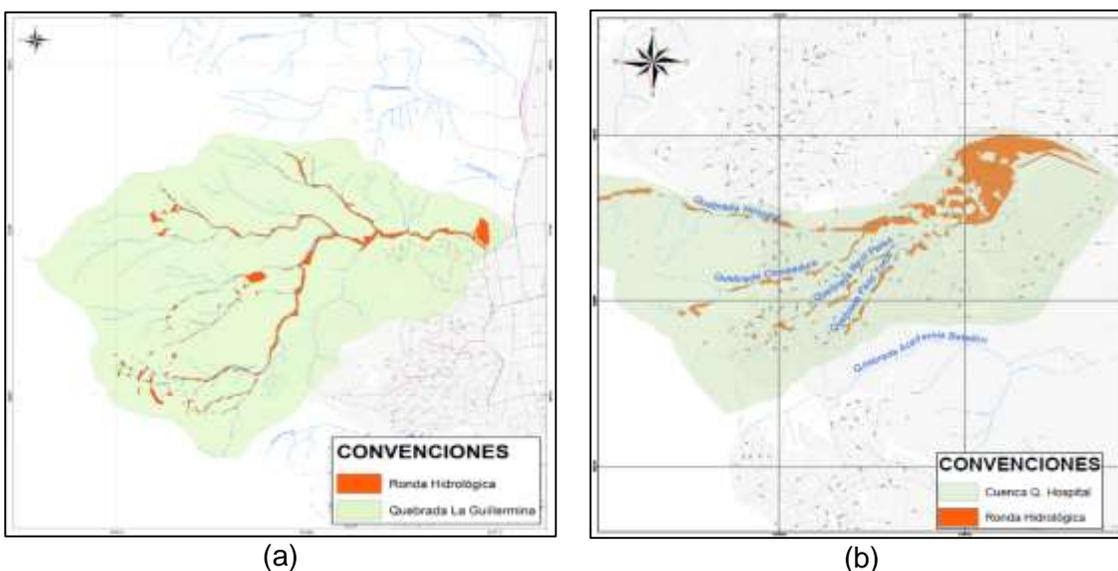


Figura 19. Microcuencas (a) quebrada la Guillermina y (b) quebrada Hospital
Fuente: (ACODAL, 2016)

Las microcuencas señaladas presentan cerros de topografía ondulada, orientados en la dirección de la estratificación y fallamiento con pendientes moderadas a suavemente empinadas en la zona alta y media, se presentan cimas y colinas inclinadas disectadas por los drenajes y en algunos sectores se presenta acumulación de materiales provenientes de procesos de remoción en masa antiguos y actuales depositados sobre las laderas (ACODAL, 2016). En la zona media son suavemente empinadas y ligeramente disectadas. Las pendientes de la cuenca fueron intervenidas en múltiples sectores.

La orientación de laderas predominante es al norte, coincidiendo con las zonas de pendientes altas, lo que favorece el rápido escurrimiento (ACODAL, 2016). De las condiciones mencionadas se puede inferir que estas áreas son de drenajes susceptibles de presentar avenidas torrenciales, aportando caudales líquidos y sólidos considerables en tiempos cortos (ACODAL, 2016).

El proceso de revisión de resultados se realizará en función de los 4 desarenadores que se muestran en la Figura 20.

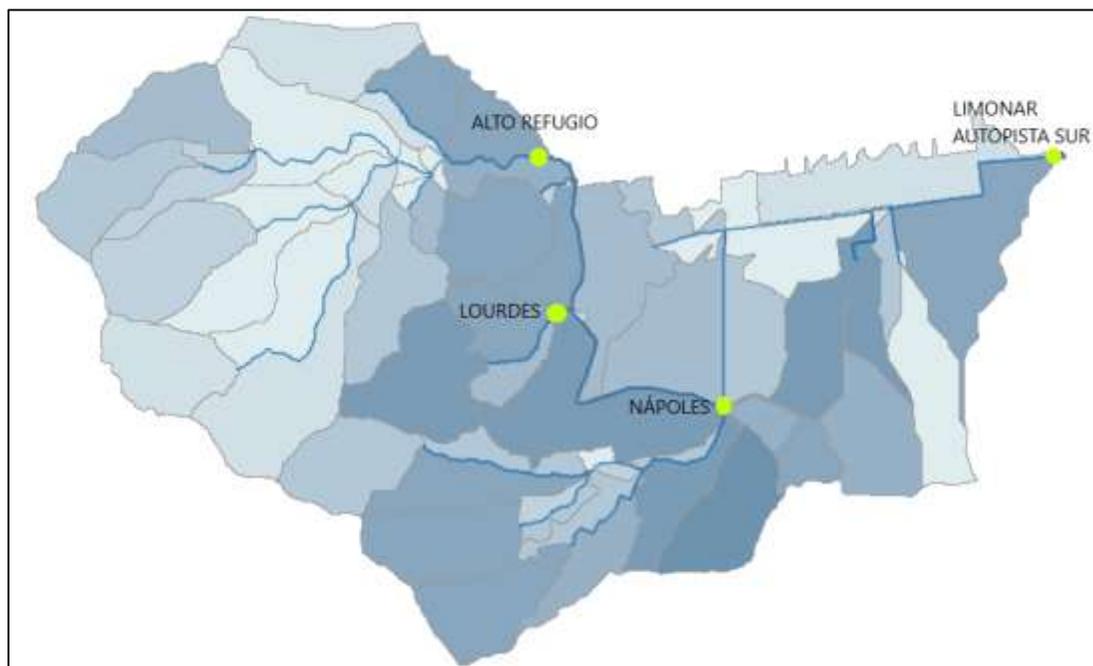


Figura 20. Ubicación de los desarenadores del área de estudio

En las siguientes figuras se muestra de manera ilustrativa el registro fotográfico de cada uno de los desarenadores objeto de análisis en el presente estudio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21. (a) Desarenador Alto Refugio, (b) Desarenador Lourdes, (c) Desarenador Nápoles y (d) Desarenador Limonar Autopista Sur.

4.1.1 Información climatológica

A continuación, se muestra el número y tipo de estaciones cercanas a la subcuenca de estudio.

Tabla 2. Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Meléndez y Cañaveralejo

Nombre Estación	Categoría	Inicio	Suspensión	Coordenadas		Cota
				Norte	Este	
Corea	Pluviométrica	1964	1986	863633.29	1046530.55	2580
Alto Iglesias	Pluviográfica	1981	-----	864790.62	1050686.96	1705
La Fonda	Pluviométrica	1964	-----	866787.33	1054080.38	1298
Universidad del Valle	Climatológica	1965	-----	865290.36	1060338.35	985
Cañaveralejo	Pluviográfica	1968	-----	868987.29	1055421.41	1056
Edificio CVC	Pluviográfica	1984	-----	868389.06	1059854.91	985
Nápoles	Pluviográfica	2015	-----	865839.83	1058136.92	-----
La Riverita	Pluviográfica	2015	-----	863572	1057648	-----
Siloé	Climatológica	2014	-----	870441.38	1057455.91	1238
La Ladrillera	Pluviográfica	1982	2001	862988.43	1056107.31	-----

Se establece que la información de precipitación a ser usada para el proyecto, deberá presentarse a partir de registros con frecuencia minutal. Bajo esta condición, la información que será procesada, será la de la estación Siloé, ya que presenta registros automáticos de precipitación con frecuencia de 10 minutos, además se encuentra ubicada en la zona de ladera, entre las comunas 18 y 19, áreas que presentan similares características topográficas y climáticas. En la Figura 22 se muestra la ubicación de las estaciones mencionadas en la Tabla 2. Entre tanto, no se considera el uso de los datos de la estación pluviográfica de Nápoles, ya que, aunque se encuentre en una ubicación más cercana a la cuenca de estudio, la información de esta estación se presenta en una escala temporal diaria.

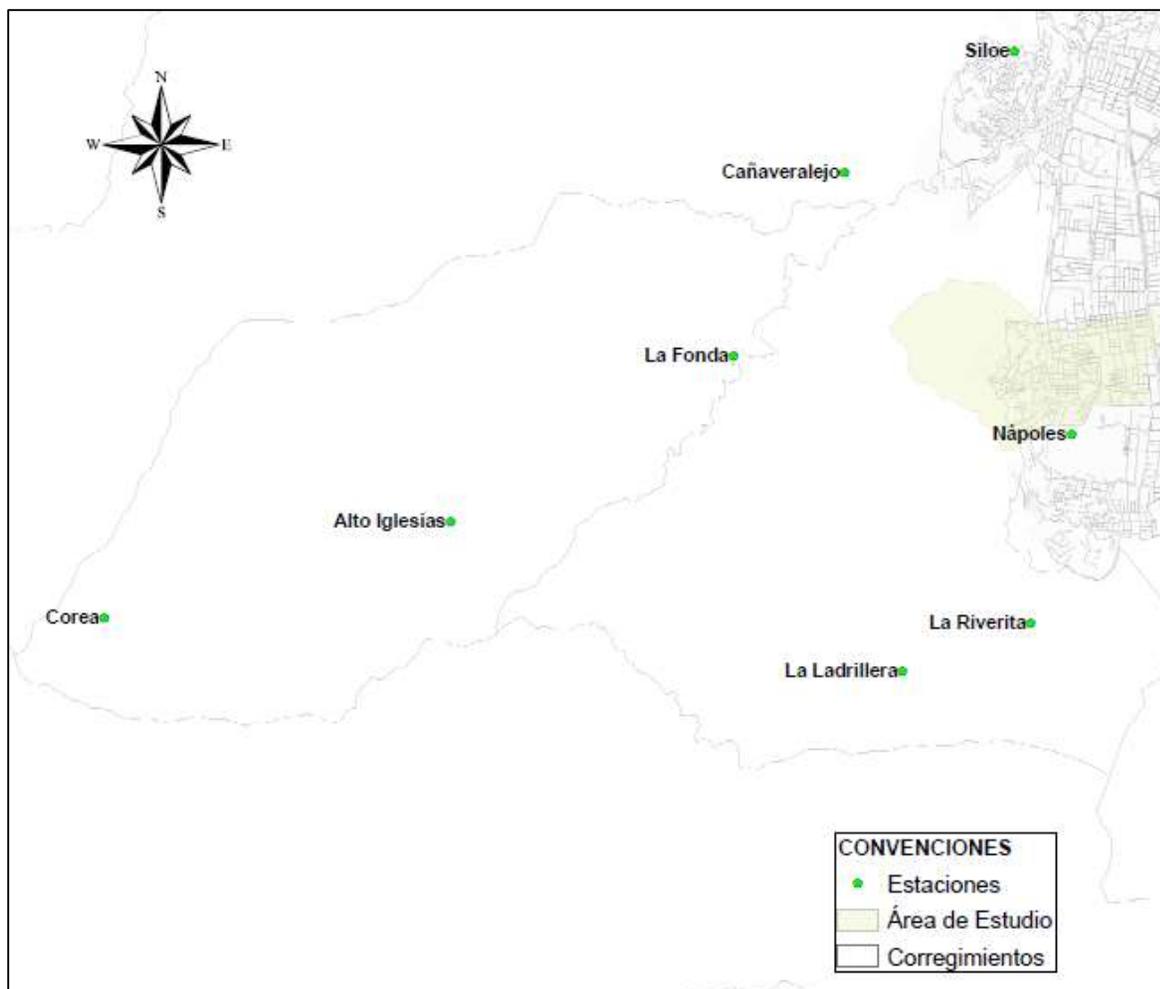


Figura 22. Estaciones de la cuenca del río Meléndez y río Cañaveralejo

a) Precipitación: La precipitación será considerada uniformemente distribuida en el espacio

El área de estudio presenta un régimen de lluvias bimodal, donde los periodos lluviosos ocurren entre marzo-mayo y septiembre-noviembre (Figura 23). A continuación, se muestra el comportamiento del registro de precipitaciones mensuales para el periodo 2014 a 2020.

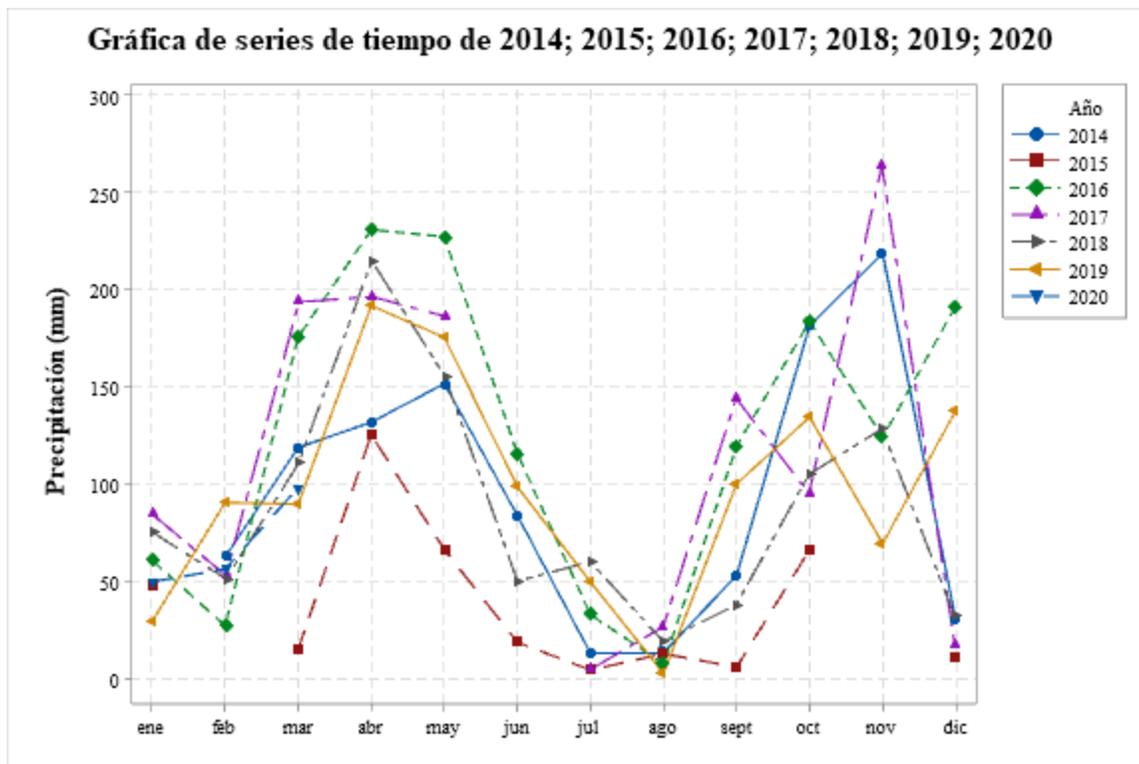


Figura 23. Precipitación promedio mensual estación Siloé para el periodo (2014 a 2020)
Fuente: Elaboración propia mediante software Minitab 19

La precipitación máxima en 24 horas es un parámetro de importancia hidrológica, ya que permite definir a partir de un análisis estadístico la tormenta de diseño para una obra. Para el caso de estudio, este análisis permite inferir para una condición máxima de precipitación, cuál podría ser la cantidad de sedimento generado por la cuenca y de esta manera establecer las capacidades de las estructuras de control bajo una condición extrema. A continuación, en la Tabla 3 se muestran los registros de precipitación máxima diaria. La máxima precipitación en 24 horas registrada en la estación Siloé corresponde a 127.8 mm (Figura 24).

Tabla 3. Precipitaciones máximas en 24 horas periodo 2014 a 2019

Mes	Máxima precipitación diaria (mm)					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
enero	-	17.1	30.5	37.9	32.4	13.6
febrero	39.7	-	8.8	28.7	10.1	23.7
marzo	29.8	8.1	41.3	25.8	52.5	34.3
abril	29.7	31.9	42.3	35.2	76.6	29.3
mayo	60.4	21.1	53.8	27.2	27.6	41.9
junio	29.9	6.0	52.7	-	21.0	37.1
julio	5.3	4.6	20.4	4.4	16.4	18.3
agosto	2.9	10.0	2.7	8.4	8.0	1.3
septiembre	15.6	6.2	19.0	24.4	15.3	41.9
octubre	29.1	24.1	45.9	26.3	32.2	31.6
noviembre	50.1	-	33.1	127.8	23.6	18
diciembre	6.6	9.1	43.0	4.2	15.0	43.7

A continuación, se presenta el comportamiento de los datos mediante gráfica de serie de tiempos.

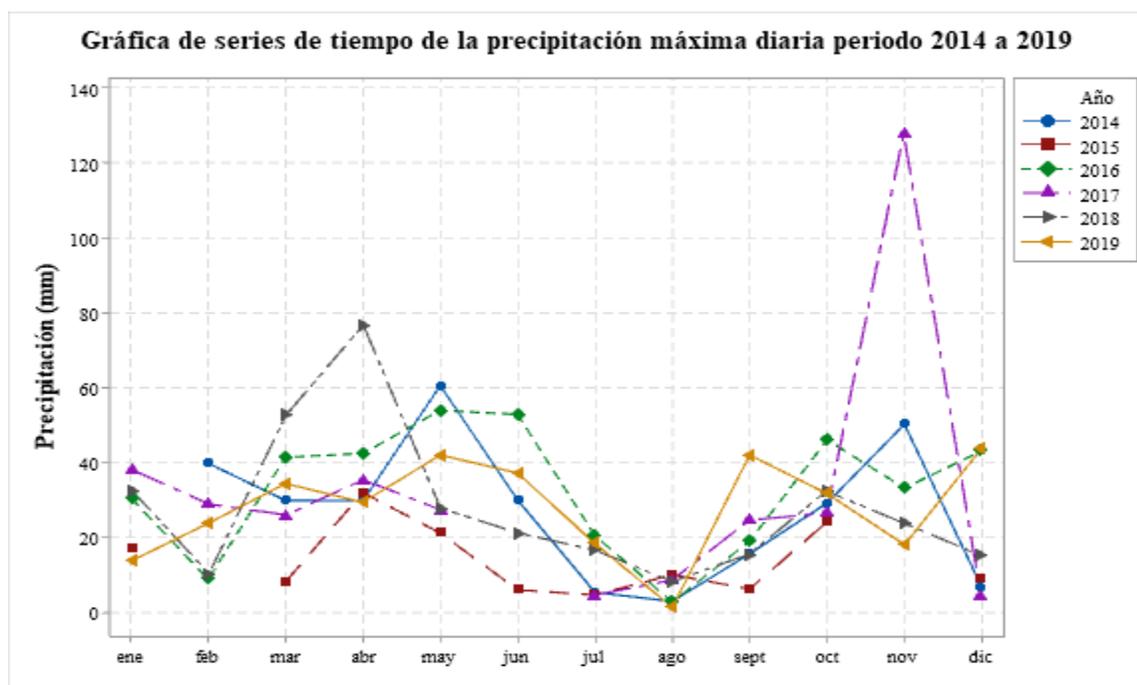


Figura 24. Precipitación máxima en 24 horas en la estación Siloé
Fuente: Elaboración propia mediante software Minitab 19

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de la estadística descriptiva para el registro de la precipitación (mm), el periodo de evaluación fue de 2014 a 2019, los datos fueron evaluados como una muestra conjunta, discretizados por años y por meses como se muestra a continuación.

Tabla 4. Estadística descriptiva registro total de datos de precipitación

Variable	Conteo				Media	Mínimo	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 3	Máximo
	total	N	N*							
Precipitación diaria (mm)	2130	901	1229	7.13	0.10	0.70	3.30	8.80	127.80	

En la Figura 25 se muestra el comportamiento gráfico de la distribución de los datos de precipitación diaria por medio del diagrama de cajas y alambres.

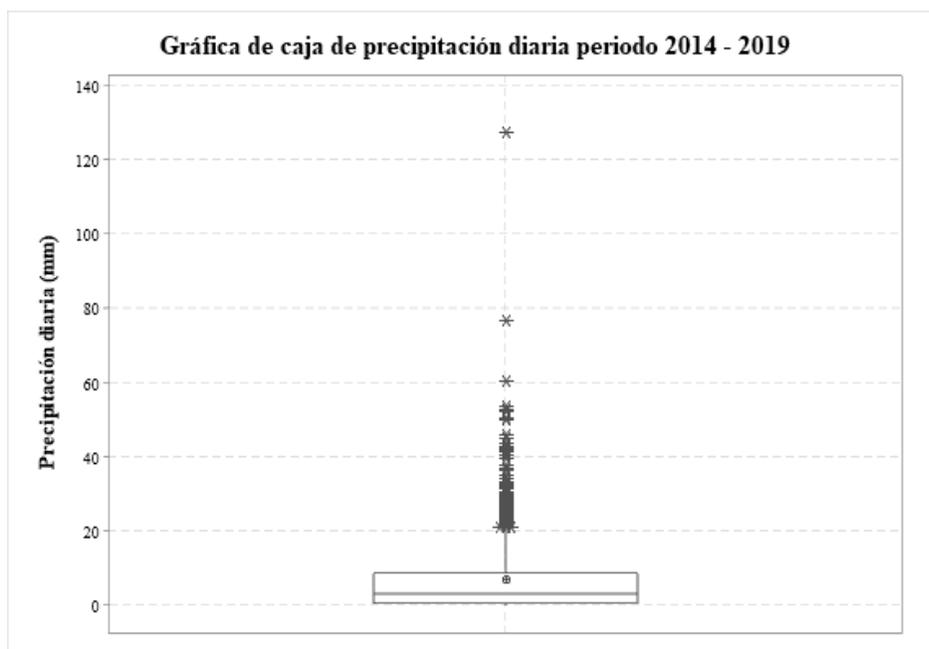


Figura 25. Diagrama de cajas y alambres para el parámetro Precipitación (mm), muestra de datos total periodo de análisis 6 años.

Se observa un comportamiento homogéneo para el 75 % de los datos (alambre inferior hasta el cuartil 3) registrados para el periodo 2014 – 2019. Se realiza especial énfasis sobre el rango de datos agrupado entre el cuartil 3 y los datos considerados como atípicos,

ya que, estos describen las condiciones de máxima precipitación que se relacionan con los eventos de máxima generación de sedimentos.

En la siguiente tabla se muestra el análisis estadístico del registro de precipitación por año para el periodo 2014 – 2019.

Tabla 5. Estadística descriptiva registro anual de datos de precipitación (mm)

Año	Conteo		Media	Mínimo	Cuartil1	Mediana	Cuartil3	Máximo
	total	N N*						
2014	334	146 188	7.27	0.10	0.50	2.75	8.70	60.40
2015	335	62 273	6.07	0.10	0.40	2.55	7.55	31.90
2016	366	183 183	8.19	0.10	0.70	3.50	10.60	53.80
2017	365	155 210	8.17	0.10	1.20	4.30	10.50	127.80
2018	365	186 179	5.60	0.10	0.50	2.00	7.15	76.60
2019	365	169 196	6.94	0.10	0.70	3.30	8.50	43.70

En la Figura 26 se muestra el comportamiento gráfico de la distribución de los datos de precipitación diaria, para cada año del periodo 2014 – 2019, por medio del diagrama de cajas y alambres.

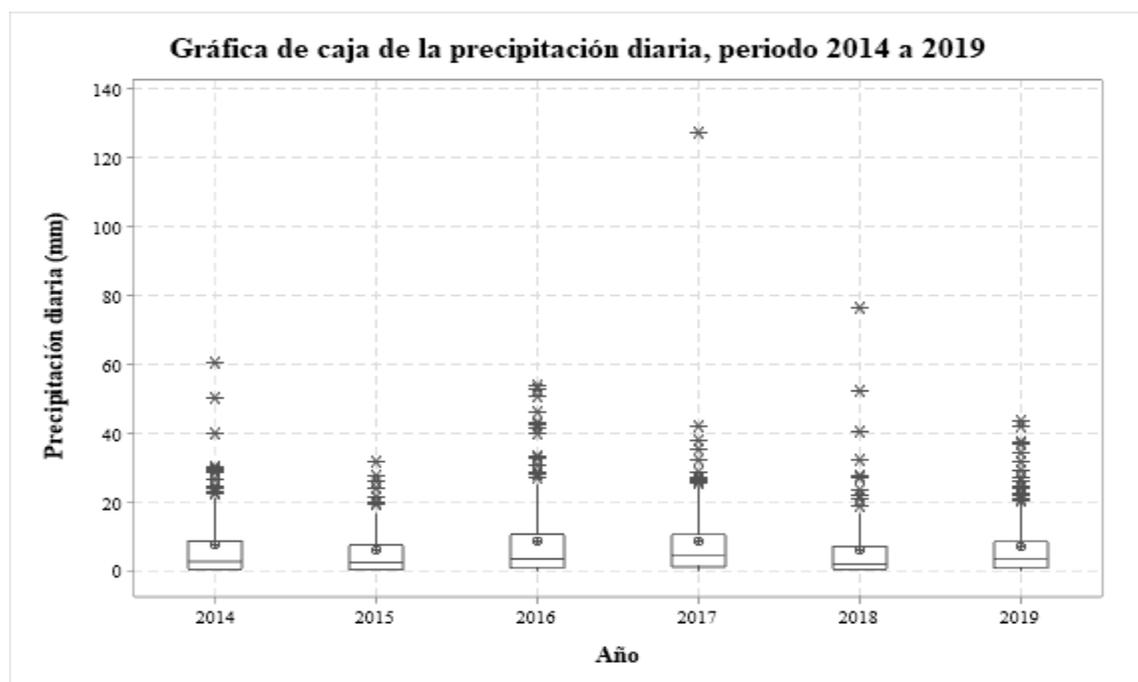


Figura 26. Estadística descriptiva registro de precipitación anual.

Se debe señalar que los años con registro de bajas precipitaciones, como el año 2015 y 2018, interfieren en el ejercicio para establecer un rango típico de precipitaciones para la muestra de datos, es por lo anterior, que con el fin de seleccionar los eventos de lluvia que serían utilizados en el ejercicio de modelación se evaluaron los eventos de lluvia entre los cuartiles 1 y 3 de los años 2014, 2016, 2017 y 2019. En cuanto a la condición de máxima precipitación se evaluó el registro de los datos considerados como atípicos para el total de datos del periodo 2014 a 2019. Como se muestra en la Figura 27 los eventos de precipitaciones altas son significativos y recurrentes para el periodo de evaluación.

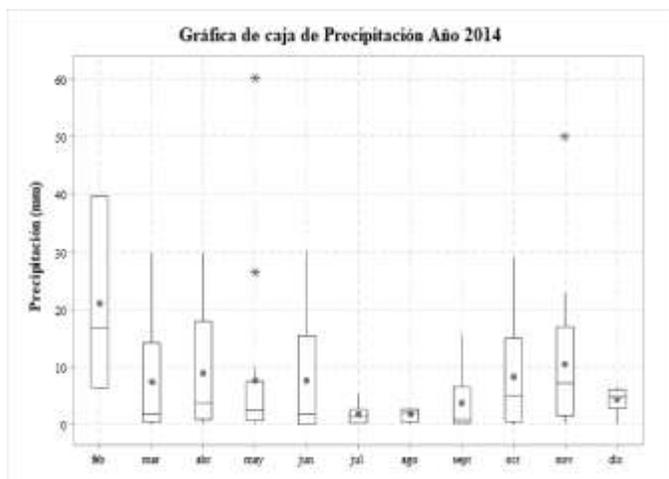
A continuación, se detalla el comportamiento del registro de precipitaciones máximas, definidas en el cuartil 3 y el registro de máxima precipitación para el periodo de evaluación (2014-2019), con lo cual se muestra la relevancia del análisis de la generación de sedimentos asociada a las precipitaciones máximas.

Tabla 6. Estadística descriptiva rango de precipitaciones máximas

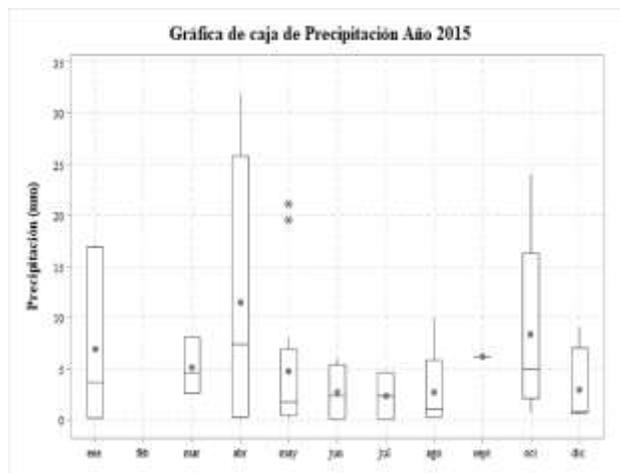
Rango									
Precipitación		Conteo							
Máxima (mm)	total	N	N*	Media	Mínimo	Cuartil1	Mediana	Cuartil3	Máximo
8.8 – 127.8	227	227	0	20.79	8.80	12.00	17.50	25.80	127.80

Como se observa el 25 % de los datos registrados para el periodo de evaluación, representan los eventos de alta precipitación, es por ello, que a partir de este grupo de datos se seleccionaron los eventos para el ejercicio de modelación, para representar la generación de sedimento de la cuenca de estudio para las condiciones de alta precipitación.

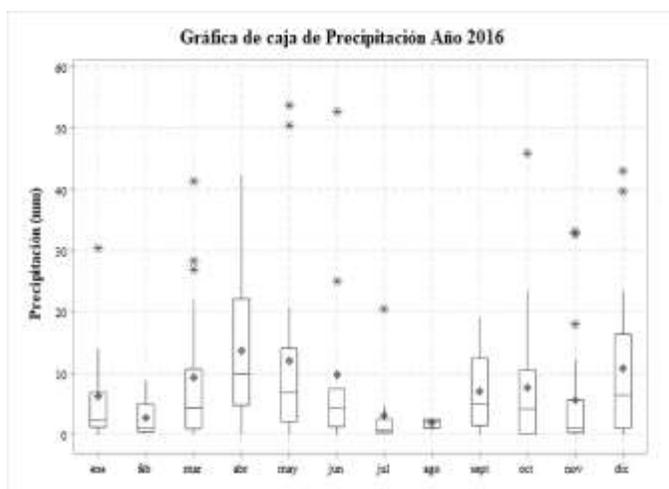
Con el objetivo de mostrar ocurrencia de los eventos de máxima precipitación, y de la importancia de analizar estos eventos en el ejercicio de modelación de producción de sedimentos, a continuación, se muestra el comportamiento mensual de las precipitaciones diarias para el periodo evaluado 2014 – 2019.



(a)



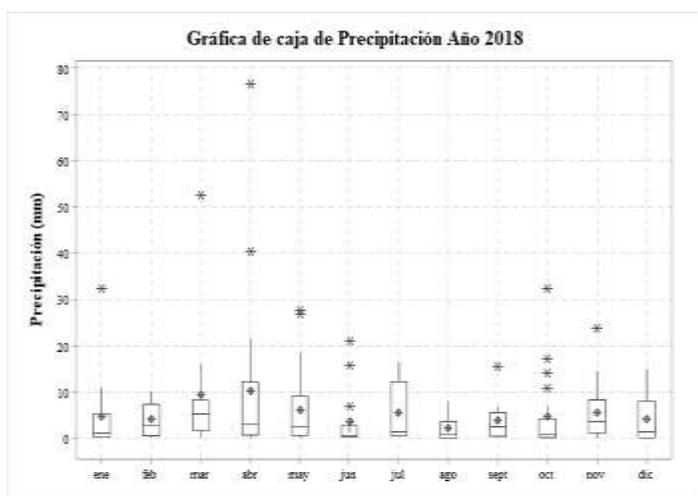
(b)



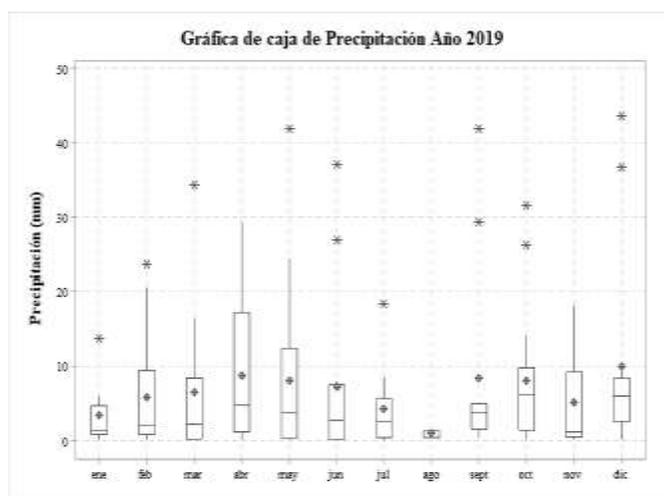
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 27. Comportamiento del registro de precipitación (mm) mes a mes del periodo 2014 a 2019; (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, (d) 2017, (e) 2018 y (f) 2019.

Como se observa en los diagramas de cajas y alambres de la Figura 27, en el periodo de 6 años de referencia, se detalla la bimodalidad estacional de las precipitaciones, lo que sugiere una representación acertada de la precipitación típica mensual para la cuenca de estudio.

4.1.2 Mapas de geología

El departamento del Valle del Cauca se localiza al suroccidente de Colombia, sobre los Andes Septentrionales, donde interaccionan las placas tectónicas de Suramérica, Nazca y del Caribe, haciendo que los terrenos que lo conforman sean altamente dinámicos y complejos desde el punto de vista geológico, representados en metamorfismo, plegamientos, fracturamientos, zonas de cizalla, entre otras (INGEOMINAS, 2005).

La comuna 18 de la ciudad de Cali, donde se encuentra ubicada el área de estudio, tiene una composición del 50 % de rocas sedimentarias (T), compuesta por fragmentos y nódulos de rocas de arcillas rojas y amarillas con poco a baja estabilidad, ocurrencia de deslizamientos puntuales originados por mal manejo de aguas superficiales y por cortes sobre empinados en las laderas (ACODAL, 2016).

A continuación, se muestra el plano de las condiciones geológicas del área de estudio.

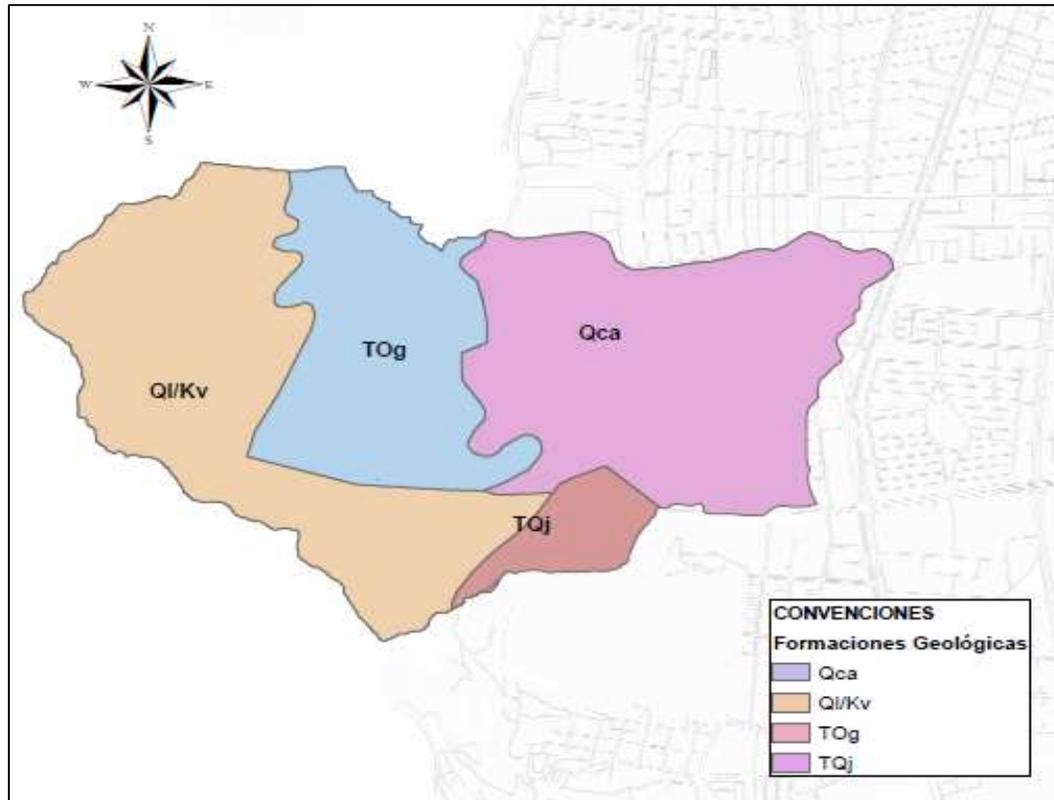


Figura 28. Formaciones geológicas del área de estudio
Fuente: elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

Las unidades litoestratigráficas aflorantes, señaladas en el área de estudio se muestran a continuación, así como sus propiedades y límites espaciales dentro del área municipal.

Rocas ígneas - Formación volcánica (Kv)

Definida por Apsden & Nivia, (1985), como una serie de rocas volcánicas básicas que afloran en la Cordillera Occidental, al occidente de la falla Cali-Patía y que constituyen la mayor parte de los cerros occidentales de Santiago de Cali.

Esta unidad está conformada por lavas basálticas almohadilladas y columnares, diabasas e intrusiones de gabro. En general estas rocas están afectadas intensamente por fallamiento y gran cantidad de fracturamiento que muchas veces se encuentra relleno con cuarzo y epidota. Los basaltos son de color verde a verde grisáceo, con textura afanítica, aunque en ocasiones presentan textura porfirítica con fenocristales de piroxeno. También se presentan intercalaciones de niveles delgados de rocas sedimentarias conformadas por limolitas silíceas, lodolitas y cherts; en algunos sectores estas rocas se encuentran

intensamente mezcladas con los basaltos, conformando “zonas de melange” (Nivia, 2001 citado por INGEOMINAS, 2005).

La unidad presenta diferentes relieves de acuerdo al grado de meteorización; es así como en los sectores donde la roca es fresca y moderadamente meteorizada predominan lomos alargados con pendientes fuertes. En las zonas donde estas rocas presentan alto grado de meteorización, desarrollan suelos rojizos espesos y la morfología se hace más suave, como es el caso de gran parte de la cuenca del río Cañaveralejo y algunos sectores al sur, nororiente del cerro de Cristo Rey y límite norte de la ciudad sector de Menga (INGEOMINAS, 2005).

El drenaje desarrollado sobre esta unidad geológica es de tipo subparalelo a subangular (cuencas de las quebradas Menga, El Bosque, Chipichape, y de los ríos Aguacatal y Cali), y subdendrítico (cuenca del río Cañaveralejo). La mayoría de los drenajes se dirigen hacia el oriente, desembocando al río Cauca.

Rocas y depósitos sedimentarios - Formación Guachinte (TOg)

Forma parte del Grupo Cauca, en (Nivia, 2001 citado por INGEOMINAS, 2005) describen tres miembros para esta formación de la siguiente manera:

- Miembro basal La Cima: Consistente en bancos muy gruesos de areniscas cuarzosas, blancas grisáceas, de grano fino a conglomeráticas, interestratificadas con bancos de espesor medio a grueso de limolitas grises oscuras y lentes delgados de conglomerados.

- Miembro Los Chorros: Secuencia de intercalaciones menores de 4 metros de espesor que decrecen en tamaño de grano de base a techo, desde areniscas de grano grueso y medio, a limolitas, lodolitas y shales; presentándose capas de carbón hacia la parte superior de la secuencia. En la zona de la antigua mina La Cascada, al oeste de la Calle 1ª, entre la Av. Guadalupe y la carrera 66, el espesor de estos mantos de carbón varía de 0,5 a 2,0 metros, alcanzando localmente 3,7 m.

- Miembro superior La Rampla: su base está marcada por el horizonte marino La Leona, localizado 10 a 15 metros por encima del último estrato de carbón del Miembro Los

Chorros. Al norte de Cali, este miembro se encuentra directamente reposando sobre la Formación Volcánica, ya que los miembros La Cima y Los Chorros se encuentran ausentes. En la antigua mina La Cascada, las areniscas de este miembro varían en tamaño de grano, de fino a muy grueso, y consisten esencialmente de cuarzo, y en menor proporción de feldespatos y fragmentos de roca que constituyen menos del 10% del porcentaje total de la roca.

Geomorfológicamente las rocas de la Formación Guachinte se presentan comúnmente como cerros alargados y aislados, que afloran entre Menga y Polvorines, hacia la parte más baja del flanco oriental de la Cordillera Occidental; aunque hacia la parte norte-centro del área (Cerro de las Tres Cruces), se presenta con una morfología abrupta a moderadamente abrupta que contrasta con las geoformas típicas de esta unidad. La red de drenaje típica para esta unidad es de tipo subparalela, con un notable control en dirección noreste, marcado por el rumbo de la estratificación (INGEOMINAS, 2005).

Rocas y depósitos sedimentarios - Formación Jamundi (TQj)

Correspondiente a depósitos no consolidados denominados inicialmente por (Keiser, 1954) como "Abanico de Jamundi", y fue definida formalmente en 1984 por Verdugo y Nivia con el nombre actual, para referirse a depósitos de abanicos aluviales no consolidados que afloran al suroccidente de Cali, y que suprayacen discordantemente al Grupo Cauca. Generalmente se encuentra dispuesta en niveles horizontales, aunque se observan algunos sectores donde éstos buzcan al este, tal como se aprecia al occidente del barrio Meléndez, donde los estratos presentan un rumbo N22°E y buzcan 57°SE.

El origen de estos depósitos ha sido explicado por Keiser (1954) a partir de los cambios ocurridos durante ciertos períodos en el Pleistoceno, cuando las partes altas de la Cordillera Occidental estaban cubiertas por hielo y nieve. Con la descongelación se soltaron inmensas masas de agua cuya sección erosiva ensanchó y ahondó los cauces de los drenajes superficiales, ante todo en las regiones altas de la Cordillera. Las aguas de fusión transportaron los bloques y cantos erráticos con una masa arenácea más fina en suspensión, mezclada con cantidades de arcilla roja laterítica hacia la planicie de la cuenca geológica del Cauca, depositándose como abanicos fluviotorrenciales.

Según (INGEOMINAS, 2005), esta formación consiste en depósitos de gravas y cantos no consolidados, pobremente seleccionados, compuesta por materiales de derivación local como basaltos, chert, gabros, limolitas, conglomerados y areniscas que varían en tamaño desde unos pocos centímetros hasta 3 metros. La matriz que envuelve estos clastos es de tipo predominantemente arcillosa y de colores rojizos. Hacia la parte superior de la formación se presentan horizontes arcillosos y arenosos bien estratificados. Se aprecian además niveles de arcillas grises, muy compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición, tal como se observa hacia los sectores conocidos como Polvorines y Altos de Ciudad Jardín; en este último sector mencionado se encuentran taludes de hasta 10 metros de altura.

Estos depósitos generan morfologías principalmente suaves a ligeramente onduladas, donde se localiza gran parte del Batallón Pichincha y los barrios El Jordán, Polvorines, Las Palmas, Las Pampas, Altos de Ciudad Jardín y La Riverita. También se observan pendientes fuertes en el barrio Los Chorros. El drenaje asociado a esta unidad es de tipo dendrítico y subparalelo, con moderada a alta disección.

Suelos y Geomorfología

Los suelos se han originado de rocas sedimentarias clásticas arenosas, como areniscas y limo arcillosas como lutitas y limolitas. Son bien drenados y algunos excesivamente drenados, muy superficiales a moderadamente profundos limitados por material compactado y fragmentos de roca, texturas moderadamente finas y finas, algunas muy granillosas, muy baja y baja fertilidad y la mayoría con alta saturación de aluminio (> 60%).

La mayor parte de la vegetación natural ha sido intervenida, la poca existente está representada por especies propias del clima medio seco, como chipaca, helecho, chilco, rabo de zorro, mortiño y gramíneas como puntero, guinea y paja mona.

Las principales limitantes que presentan los suelos de esta unidad para su uso y manejo son las fuertes pendientes, la presencia de afloramientos rocosos poca profundidad radicular, alta saturación de aluminio, escasas lluvias y erosión moderada generalizada (IGAC, 2004).

Suelos Fluvio-torrenciales (Sft)

Esta unidad incluye los depósitos de la Formación Jamundí y de Terrón Colorado; genéticamente son de origen fluvio-torrencial, pero con aporte volcánico en el área de Terrón Colorado. Estos suelos están conformados por bloques, cantos y gravas, de formas subredondeadas a subangulares, compuestos por diabasas, gabros y areniscas esporádicas, altamente meteorizadas, embebidas dentro de una matriz de arena, limo y arcilla. Son predominantemente clastosoportados y medianamente compactos.

Estos suelos exhiben geformas profundamente disectadas por los drenajes superficiales, presentando un relieve ondulado, suave a moderadamente empinado. Estos suelos conforman la mayor parte de los terrenos donde se localizan los barrios Terrón Colorado, San Antonio, Bellavista, Belalcázar, Los Chorros, El Jordán y el Batallón Pichincha

Abanicos Aluviales (Sal2)

Se trata de todos los materiales asociados a flujos torrenciales dejados por los principales afluentes del río Cauca al llegar a la planicie aluvial de éste, debido a una pérdida repentina en la capacidad de arrastre de las corrientes, al encontrar una disminución en la pendiente. Estas unidades tienen forma de abanico, cuya parte más distal está conformada por materiales finos y mejor seleccionados que los ubicados hacia el ápice, donde son más gruesos y mal calibrados. Estos depósitos son medianamente compactos, matriz soportados; se componen principalmente de cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas con presencia esporádica de rocas sedimentarias, de formas angulares a subredondeadas, en matriz areno-arcillosa.

Estos abanicos son de tipo coalescente, es decir, presentan contactos laterales interdigitados por su crecimiento conjunto, por lo cual se cartografiaron como una sola unidad con límites aproximados entre ellos, así como el contacto con la llanura aluvial del río Cauca. En la cartografía de estos depósitos se tuvieron en cuenta los cambios topográficos, análisis de fotografías aéreas antiguas y recientes, las características morfológicas del terreno y pequeños cambios en la dirección de los drenajes.

Una fracción de la zona de estudio se ubica sobre parte del abanico del río Meléndez, caracterizado por la presencia de una capa superficial de materiales limosos de consistencia dura de unos 10 m de espesor suprayaciendo a estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas de formas angulares a subredondeadas, en matriz areno-arcillosa con intercalaciones de materiales finos predominantemente arcillas duras.

El área aproximada de esta zona es de 14.3 Km², donde se encuentran los barrios: Alférez Real, Ciudad Capri, Las Quintas de Don Simón, El Limonar, El Ingenio, Univalle y parte de Ciudad Jardín. Se compone esta zona principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente, donde cerca del 18% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 24% de grava y 32 % de arena. La humedad natural se encuentra entre 20 y 60%, con un valor representativo del 38%.

Suelos Fluvio-arcillosos (Sfa)

Esta unidad incluye los depósitos de la Formación Jamundí, genéticamente de origen fluvial de baja energía, compuestos por niveles horizontales a sub- horizontales de limos arenosos y arcilla laterítica de color rojo, con esporádicos niveles de flujos torrenciales intercalados, de poco espesor. Se aprecian, además, niveles de arcillas grises, compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición, tal como se observa en el barrio Ciudad Jardín, donde se observan taludes de hasta 10 metros de altura.

En general estos materiales son ligeramente compactos y presentan buena estabilidad en laderas de pendientes suaves. Desarrollan una morfología similar a la de los abanicos aluviales, aunque tienen una disección más profunda. Estos suelos conforman la mayor parte de los terrenos localizados sobre la margen izquierda de la quebrada Cañas Gordas y los barrios Ciudad Jardín y La Riverita.

Del convenio desarrollado por (INGEOMINAS, 2005) se realiza especial hincapié en la Zona 2b. Flujo Alto Nápoles, por ser parte del área de estudio del presente proyecto. Esta zona está conformada por depósitos de origen fluviotorrencial conformados por bloques, cantos y gravas, de formas subredondeadas a subangulares, compuestos por diabasas, gabros y areniscas esporádicas, altamente meteorizadas, embebidas dentro de una matriz

de arena, limo y arcilla de color pardo a rojizo. Son predominantemente matriz soportados y medianamente compactos. En esta zona se localizó la perforación realizada en los tanques de agua potable en Nápoles. Estos suelos conforman la mayor parte de los terrenos donde se localizan los barrios de Nápoles, Los Chorros, El Jordán y el Batallón Pichincha.

La composición de los materiales superficiales presentes en esta zona está dada principalmente por MH y CH, las muestras corresponden a suelos limo arcillosos con un promedio de 11 % de grava y 35 % de arena. La humedad natural está en un rango entre 30 y 60 %, con un valor representativo del 40 %. El límite líquido presenta una distribución sesgada a la derecha, entre 50 y 90 % con un valor promedio de 72 %.

El límite plástico posee una distribución normal entre el 30 y 60 % con valores representativos del 50 %. Los índices de plasticidad poseen una distribución normal entre 20 y 50 % con un valor promedio de 30 %. Los pesos unitarios total y seco tienen valores representativos de 1.8 y 1.2 gr/cm³ respectivamente. Los valores de resistencia a la compresión simple tienen un valor promedio de 1.7 kg/cm².

A continuación, se muestra un resumen de la información geológica del área de estudio.

Tabla 7. Características geológicas, de suelos y geomorfológicas del área de estudio

Unidades litoestratigráficas		Unidad geológica superficial	Materiales típicos	Descripción
Rocas ígneas	Formación volcánica (Kv)	Suelo Fluvio-torrencial (Sft)	MH y CH	Arcilla limosa y limo arcilloso, colores café, amarillo y gris, consistencia firme, muy sobreconsolidada, con presencia de materia orgánica, material superficial.
Rocas y depósitos sedimentarios	Formación Guachinte (TOg)		ML y CL	Arenitas limolitas.
	Formación Jamundí (TQj)	Suelos Fluvio-arcillosos (Sfa)	MH	Limo arcilloso, colores amarillento y rojizo por oxidación, consistencia firme, con presencia de gravas y materia orgánica.
	Formación (Qca)	Suelos Abanicos Aluviales (Sal2)	MH, CH y ML	Estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas de formas angulares a

Unidades litoestratigráficas	Unidad geológica superficial	Materiales típicos	Descripción
			subredondeadas, en matriz arenarcillosa con intercalaciones de materiales finos predominantemente arcillas duras.

A continuación, se muestra el mapa de suelos del área de estudio.

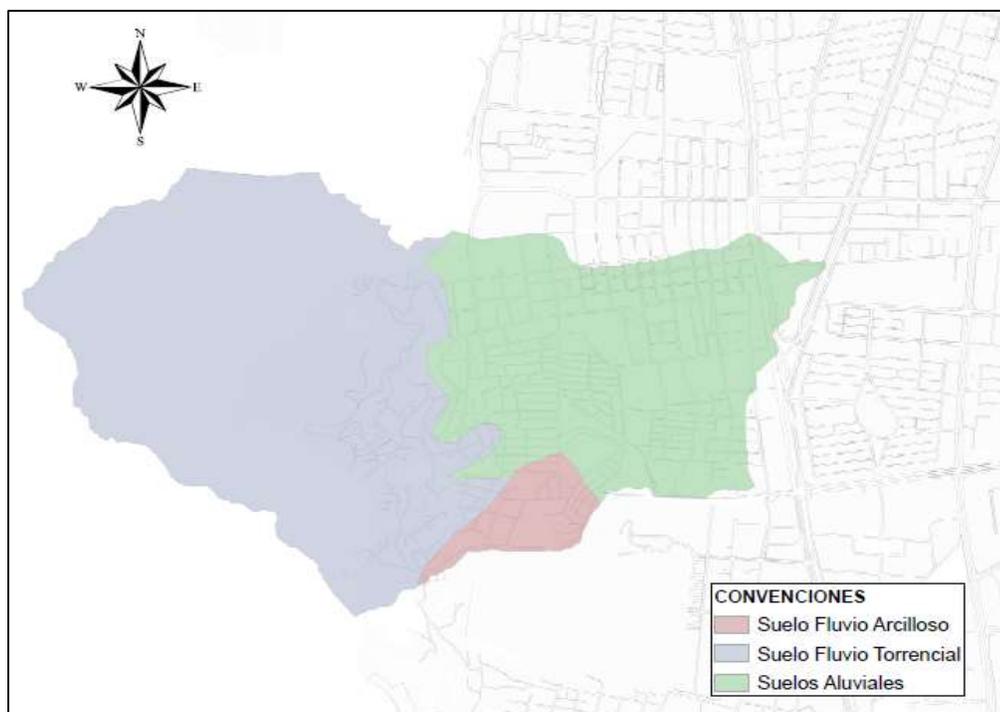


Figura 29. Formaciones geológicas del área de estudio
Fuente: elaboración propia mediante software AcrMap 10.5.

4.1.3 Mapas de cobertura vegetal y usos del suelo

Para la estimación del Uso de Suelo o Cobertura vegetal se ha tomado como referencia de material cartográfico del estudio de Delimitación de Franjas de Protección de Corrientes de Agua Localizadas en las comunas 17, 18, 19 y 20 de Santiago de Cali (ACODAL, 2016). A partir de la información suministrada por la autoridad ambiental DAGMA se realizaron las operaciones necesarias utilizando las herramientas de ArcGis para procesar la información de coberturas y uso de suelo, para el área rural y urbana. Esta información es necesaria para realizar la modelación hidrológica de transformación de la lluvia en escorrentía.

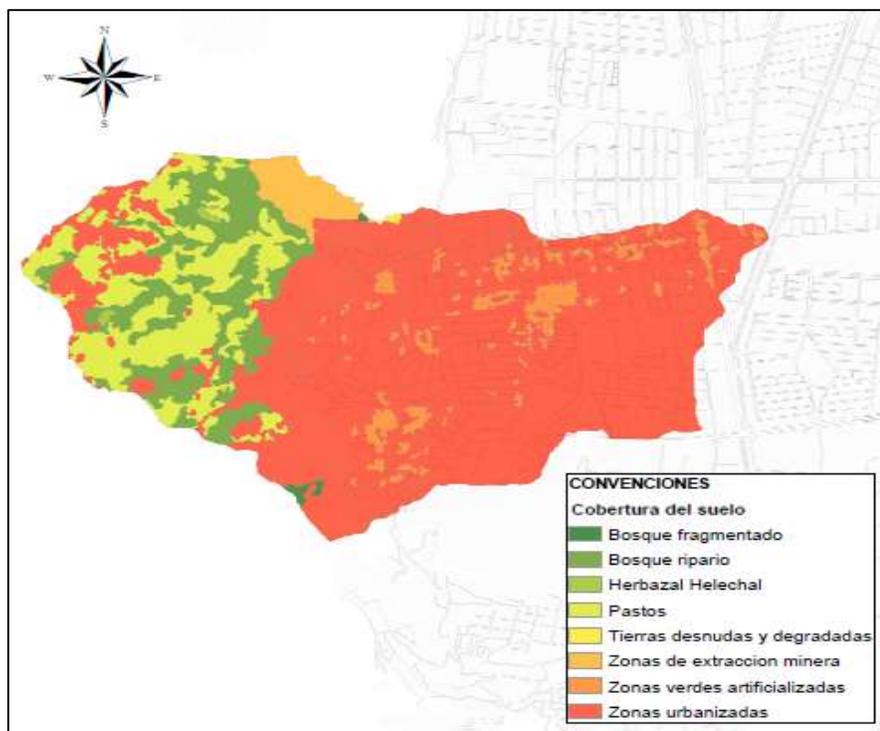


Figura 30. Cobertura y usos del suelo del área de estudio
Fuente: elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

El área de la cuenca denominada “Zona de extracción minera” se refiere al cerro de La Bandera, que fue un sitio de minería desde 1927 cuando se extraía carbón para el funcionamiento de los Ferrocarriles Nacionales y luego para la Termo eléctrica de Anchicayá. En 1970 se deja de operar la mina de manera oficial, sin embargo, se intensifican las actividades de minería ilegal con alrededor de 143 bocaminas.

En el año 2000 el cerro de La Bandera fue delimitado como un ecoparque, en la actualidad cuenta con un área de protección ambiental de 264,3 hectáreas. Se ubica en el corregimiento de La Buitrera y colinda con las comunas 18 y 19, El cerro de ‘La Bandera’ fue transferido al Municipio de Cali el 16 de marzo de 2015 bajo la resolución 1.355.

En el año 2013 la corporación regional del valle del cauca – CVC inició la recuperación geomorfológica con maquinaria que configuró nuevamente formaciones montañosas. Las bocaminas se cerraron y empezó la mitigación del impacto de la minería ilegal. También inició la siembra de árboles de la especie *Acacia Mangium*, escogida por prosperar aún en los suelos más áridos.

En el periodo 2015 – 2019 se han invertido en el cerro de La Bandera 8,000 millones de pesos provenientes de la sobretasa ambiental y se han sembrado más de 40,000 árboles. También, se han construido obras de bioingeniería (en las que se usan guaduas, en vez de concreto) para control de la erosión por precipitaciones mediante la construcción de terrazas (Bolaños, 2019).

En el año 2021, se realizó una inversión de 1,820 millones de pesos por parte de la CVC, con estos recursos se construyeron 956 metros de senderos con huella, contrahuella, descansos, rampas y bordillos en piedra y concreto, en la parte alta del ecoparque. Además, la construcción del sendero de ingreso, que posibilita el acceso de vehículos de emergencia, con su respectivo canal de agua lluvia (CVC, 2021).

A continuación, se muestra el panorama del cerro de La Bandera, antes y después de las intervenciones realizadas en relación con las acciones para el mejoramiento de la cobertura vegetal y recuperación del suelo.



(a)



(b)



(c)

Figura 31. (a) Suelo desnudo del cerro de La Bandera, (b) Actividades de recuperación de la cobertura vegetal, (c) consolidación de las acciones de mejoramiento de la cobertura del suelo.

El Plan de Ordenamiento Territorial - POT de la ciudad de Cali establece dentro de sus proyectos estratégicos los diseños y adecuación del ecoparque cerro de La Bandera. Que tiene como objetivo “Adecuar la zona del ecoparque Cerro de La Bandera aportando a la conservación de los cerros tutelares de Cali, su biodiversidad y el sistema hídrico, mitigando a la vez los riesgos y potencializando su aporte como espacio público efectivo. Recuperar el Cerro de La Bandera desde el punto de vista geomorfológico y paisajístico, desestimulando las actividades mineras ilegales y activando la apropiación del ecoparque como espacio público con usos recreativos y lúdicos para la ciudadanía caleña.

Entre las acciones prioritarias este proyecto deberá realizar senderos ecológicos e interpretativos, acompañado de procesos puntuales de intervención consistentes en obras de estabilización y mitigación de los riesgos asociados a los movimientos en masa y la subsidencia por efectos de la minería. Se deberán generar puntos de encuentro y disfrute paisajístico. El proyecto consistirá en ejecutar los estudios geotécnicos, geomorfológicos y paisajísticos correspondientes, el Plan de Restauración Ecológica en el Cerro, obras de mitigación de riesgo, y los diseños arquitectónicos y paisajísticos para adecuar parte del parque como espacio público efectivo.

En dicho plan se establece la ejecución del proyecto en corto plazo con un costo aproximado de 600 mil millones, con lo cual, se proyecta como meta recurrar y restaurar el 100% del cerro tutelar, adecuar al menos 60% del área del ecoparque como espacio

público y contar con un plan de manejo adoptado y en funcionamiento (Concejo Municipal de Santiago de Cali, 2014).

4.1.4 Mapas de pendientes

Como fuente de información cartográfica se emplearon los datos de elevación del terreno en formato GIS de almacenamiento de datos ráster nativo de ESRI, el modelo de elevación digital utilizado corresponde a una resolución de 1m x 1m. A partir del MED se elaboró una cartografía de pendientes de la zona de estudio. El área de estudio presenta relieve ligero a fuertemente escarpado, con pendientes mayores del 25 %, rectas, largas y fuerte disección (ver Figura 32).

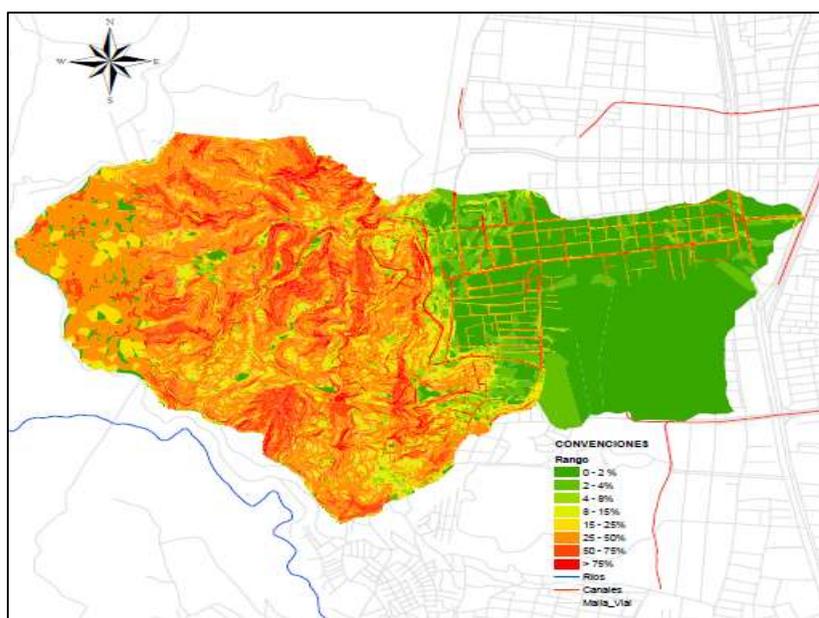


Figura 32. Mapa de pendientes del área de estudio
Fuente: elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

4.1.5 Condiciones hidrológicas

Las características físicas de una cuenca forman un conjunto que influye profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona. Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad práctica en la ingeniería de la Hidrología, pues con base en ellos se puede lograr una transferencia de información de un sitio a otro, donde exista poca información (Reyes, Barroso y Carvajal, 2010).

La determinación de las características geomorfológicas de una cuenca hidrográfica es facilitada con el uso de herramientas computacionales que se basan en técnicas multimodelos. Entre dichas herramientas, se destaca el uso de modelos de elevación digital, los cuales corresponden a representaciones matemáticas y visuales de magnitudes de alturas con respecto al nivel del mar de determinadas zonas (FRAU, PINO, ROJAS, & HERNÁNDEZ, 2011).

Empleando las herramientas computacionales de ArcGis, se determinó la información base necesaria para el establecimiento de indicadores geomorfológicos e hidrológicos que permitieran analizar las condiciones de funcionamiento de una cuenca hidrográfica definida. A continuación, se indican aspectos importantes para dicho análisis.

Modelo de Elevación Digital (MED): Se emplea un modelo de elevación digital correspondiente a la zona, al cual se le asignan las coordenadas MAGNA_Cali_Valle_del_Cauca_2009. El MED empleado cuenta con una resolución de celdas de 1 m de ancho por 1 m de largo. Este modelo fue cargado al ArcGis, en donde se realizó la preparación inicial, buscando la estabilidad hidrológica.

Se realizó el ajuste general del área, la corrección de áreas planas (consideradas zonas sumideros de agua), se ajustó la red de drenaje (eliminando endorreísmos) además de las pendientes tomando como base la información del catastro de las redes de alcantarillado, todo lo anterior buscando como se ya se había mencionado, que el modelo se estabilizará hidrológicamente, para posteriormente definir la cuenca de estudio.

Los flujos superficiales de agua que se presentan en una cuenca hidrográfica específica, están influenciados por diferentes condiciones meteorológicas y geomorfológicas que controlan los diferentes procesos del ciclo del agua. Los flujos líquidos y sólidos, están influenciados por diferentes condiciones meteorológicas y geomorfológicas que controlan los procesos del ciclo del agua en una cuenca. La geomorfología de la cuenca condiciona su respuesta ante diferentes eventos de precipitación.

Por lo anterior, también se establece realizar un análisis de los parámetros morfométricos, los cuales, permiten realizar una descripción de la cuenca en función del sistema de drenaje, los parámetros a evaluar son: el tiempo de concentración, la densidad de drenaje, el histograma de frecuencias altimétricas y el diagrama de pendientes.

4.2 SIMULACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA

A continuación, se realiza una descripción metodológica para el establecimiento de la delimitación de la cuenca, la discretización de los elementos planos y canales, y su parametrización junto con la cobertura vegetal y los suelos. En el desarrollo del presente trabajo, la delimitación de la subcuenca de estudio en el área urbana estará regida por la dirección del flujo del sistema de alcantarillado.

En relación con el flujo de sólidos, es pertinente precisar lo siguiente: KINEROS 2 cuenta con una herramienta que denomina estanques, que fue desarrollada para evaluar la gestión de los flujos con puntos de amortiguación hidráulicos, el modelo permite ubicar elementos con características definidas por el usuario como el volumen de almacenamiento y el área superficial. Esta herramienta ha sido utilizada en escenarios para la evaluación de inundaciones, donde el objetivo principal ha sido la evaluación de almacenamiento de excesos de escorrentía pluvial y la descarga a tasas acordes con las de la cuenca hidrográfica (Goodrich et al., 2010).

Aunque el modelo KINEROS 2 realiza la estimación de la cantidad de sedimento que puede depositarse en estos puntos de almacenamiento, las características que el modelo permite especificar sobre estos, no describen las condiciones hidráulicas que debería garantizar una estructura de retención de sólidos.

Se realizó una primera exploración de los resultados del modelo, con lo cual, fue posible concluir que esta herramienta no representa la hidráulica de una estructura retenedora de sólidos. Se observó que el flujo de sedimentos generados antes de cada punto de almacenamiento no era retenido en los puntos de almacenamiento, entre tanto, para esta condición se evidenció que una fracción significativa del sedimento se deposita en el sistema de drenaje.

Bajo esta condición, el presente estudio muestra la evaluación de un escenario crítico, donde, se evalúa la respuesta del sistema de drenaje ante una inadecuada operación de las estructuras de desarenado, para la situación en la que a estas unidades no se les haya efectuado el mantenimiento requerido.

Es importante señalar que este es un escenario que se ha evidenciado en el desarrollo de la prestación del servicio, ocasionado por la baja disponibilidad de equipos para el retiro de sedimentos lo que genera atrasos en los periodos de mantenimiento. En este estudio se obtuvieron los registros de operación para un periodo de 5 años y se establecieron periodos de mantenimiento específicos que permiten describir el escenario anteriormente planteado.

A continuación, se presenta mediante un esquema la configuración del sistema de estructuras desarenadoras y se señalan los puntos que son sujetos de calibración directa y un punto que se calibró de manera indirecta a partir del balance de masas que genera el modelo.

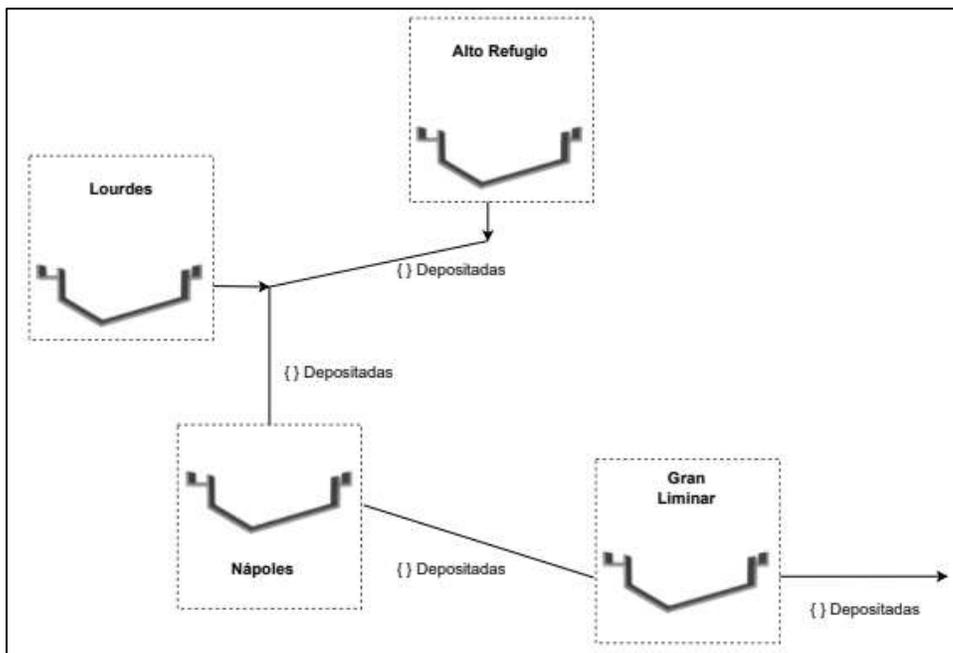


Figura 33. Esquema metodológico del escenario evaluado

Para el escenario planteado, fue posible realizar una validación y calibración de la cantidad de sedimento que se genera en cada área tributaria a los desarenadores, además se seleccionaron registros de mantenimiento donde se cuente con datos en el cierre de la cuenca, sin haber realizado retiro de material en las demás estructuras o que se haya hecho en simultáneo.

4.2.1 Delimitación de la cuenca de estudio

Revisión de información del catastro de redes

La empresa prestadora de servicios EMCALI suministró la información del área de influencia del sistema de drenaje tributario al desarenador Limonar ubicado en la carrera 68 con calle 10, esta información se obtuvo, a partir de un aplicativo de la herramienta ArcGis, denominado "Training Aguas Arriba", el cual, asocia la dirección de flujo de las redes con un punto de interés y los suscriptores de las red de agua potable, ya que los clientes del servicio de agua potable se encuentran georeferenciados en su totalidad, de esta manera se generó una malla de toda el área que presenta una interacción directa con el punto de interés, para el caso de estudio será el desarenador gran limonar, que también identifica el punto de cierre de la cuenca.

La modelación de la precipitación y la escorrentía sobre el terreno requiere de una fuente de información inicial en formato ráster correspondiente al Modelo de Elevación Digital (MED), sobre el cual se desarrollarán las operaciones apoyadas en el software ArcGIS versión 10.5. Para definir los límites de la cuenca se verificó que el MED no presentara errores, es decir, que fue necesario ajustar los espacios sin información. Se establecieron los archivos "grid" de dirección de flujo y acumulación del flujo, los cuales, se crearon a partir de la opción "Delineator" de la herramienta AGWA del ArcGis (ver Figura 34).

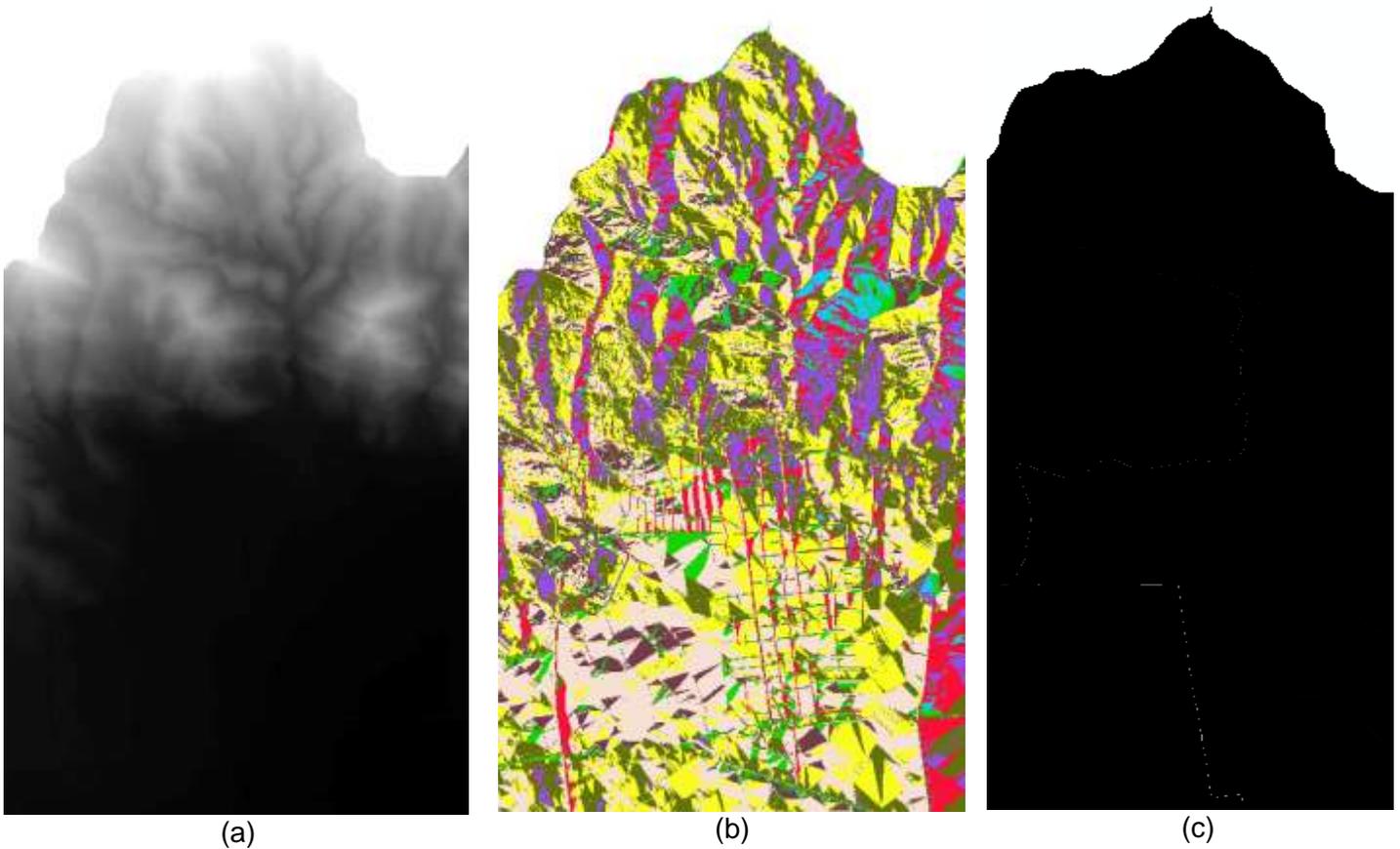


Figura 34. Archivos utilizados y generados para la definición de la delineación de la cuenca de estudio, (a) modelo digital de elevación, (b) malla de dirección de flujo, (c) malla de acumulación de flujo.

Fuente: Elaboración propia mediante software ArcMap 10.5.

Una vez establecidos los mapas de dirección, acumulación de flujo y haber identificado la Salida (Outlet) o punto de cierre de la cuenca, se generó el contorno de la cuenca de estudio. La información que el modelo reconoce para establecer la cuenca que aporta sobre el punto de salida, corresponde a las coordenadas $X= 1059317.17$ e $Y= 867236.89$.

1.1.1 Discretización de la cuenca de estudio

A partir de una imagen de alta resolución suministrada por la autoridad ambiental Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, se establece la información inicial ingresada al modelo respecto a las características del uso del suelo de la subcuenca de estudio y específicamente del área urbana (ver Figura 30).



Figura 35. Ortofotografía de la cuenca de estudio
Fuente: (CVC et al., 2018)

El proceso de discretización consistió en la división de la subcuenca de estudio en porciones que buscan una homogeneidad respecto a una característica común. Para este caso de estudio, debido a que se realizará el chequeo del funcionamiento del sistema de drenaje actual y ya que se cuenta con información de sus componentes, se definieron subcuencas urbanas a partir de la identificación de las áreas aferentes y de los tramos de drenaje principales, que por las pendientes del terreno recibirían escorrentía directa de cada área evaluada, además se identificaron las direcciones de flujo de la red a partir del reconocimiento del punto de salida del sistema.

En este apartado el programa crea a partir de la cuenca ya delineada los elementos señalados. A partir de la cuenca delineada se definieron los elementos planos y canales, los cuales, se encuentran conectados entre sí. Para realizar este proceso se debe definir el parámetro Área de Contribución o CSA, este parámetro establece el área mínima necesaria para canalizar el agua en un canal. El programa propone por defecto un valor de CSA = 2.5 %.

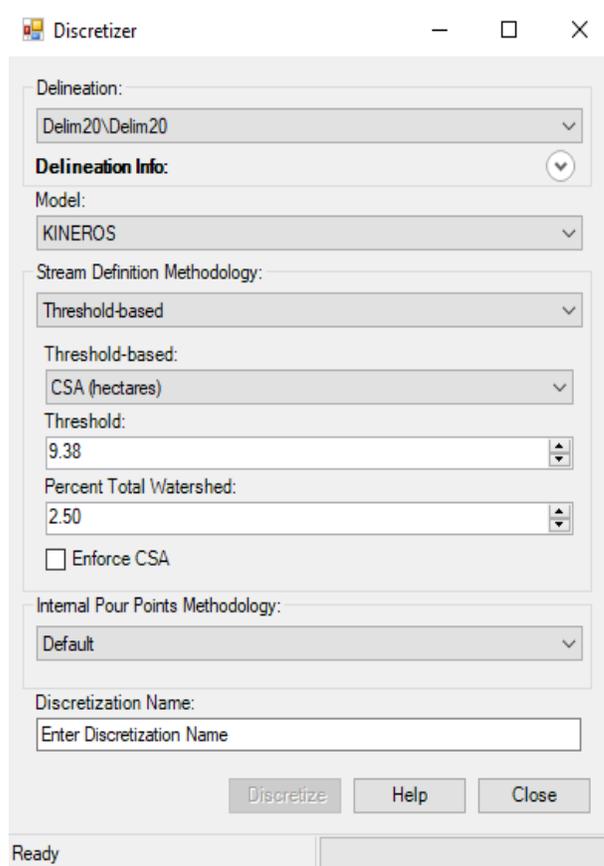


Figura 36. Discretización de la cuenca de estudio.

Se obtuvieron 98 elementos diferenciados entre planos y canales (ver Tabla 8). A continuación, se muestran los datos de la discretización y parametrización de la cuenca de estudio obtenidos. A continuación, se describen las características principales de la cuenca de estudio.

Tabla 8. Características de la cuenca de estudio

Variable	Valor	Unidad
Área de la cuenca	3.904.796	m ²
Área de contribución	97.620	m ²
Altura promedio	1.023	m
Longitud	4.767	m
No. de Planos (subcuenas)	70	Un.
No. Canales (Cauces)	28	Un.

A continuación, se muestra el esquema resultado de la discretización de la cuenca.

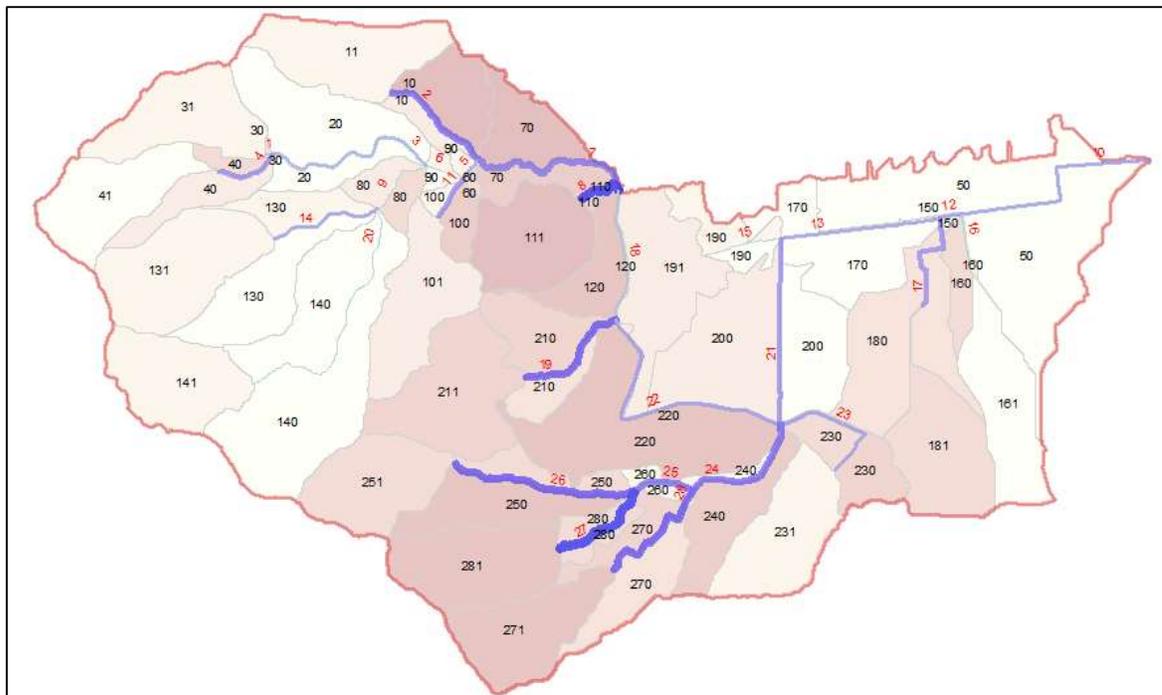


Figura 37. Discretización cuenca de estudio.

4.2.2 Parametrización de la cuenca

El modelo sedimentológico requiere, que a cada elemento de la cuenca le sean asociadas las características propias de su geomorfología, así como la geometría hidráulica de los canales y su longitud de flujo, además de sus propiedades de cobertura vegetal y tipo de suelos.

4.2.2.1 Parametrización geométrica

Esta parametrización define las propiedades topográficas de la subcuenca y de los canales, las propiedades definidas dependen del modelo de elevación digital. Las opciones de geometría hidráulica establecen las dimensiones del canal, y la selección del tipo de canal establece la rugosidad y nivel de infiltración.

Establecer las especificaciones de la geometría de los canales es de relevancia para un correcto encauzamiento del flujo y para la estimación de los procesos sedimentológicos.

La herramienta AGWA utiliza una relación geométrica empírica para estimar la geometría del canal en función del área contributiva (utilizada en la discretización), calculando la parte superficial y de fondo de cada tramo del canal (Fortuño, 2014).

4.2.2.2 Parámetros asociados a los usos del suelo

Para el establecimiento del Uso de Suelo o Cobertura vegetal, se tomó como referencia de material cartográfico del estudio de Delimitación de Franjas de Protección de Corrientes de Agua Localizadas en las comunas 17, 18, 19 y 20 de Santiago de Cali, elaborado por ACODAL y CVC. Para la parametrización de los suelos, se utilizó el mapa de suelos de la FAO. Las propiedades hidrológicas de cada tipo de suelo vienen incluidas en una tabla por medio de la cual se adjudica a cada elemento las propiedades características. Los parámetros se obtendrán a partir de los mapas. Sobre estos se generarán los planos donde se especificarán los diversos usos y tipos de terreno, aplicándoles a cada uso y tipo el número de curva característica, obteniendo así la media de la cuenca. Las fuentes de información cartográfica se detallan a continuación:

Cartografía de permeabilidad de suelo

Para la estimación de la permeabilidad del suelo, o clasificación en grupos hidrológicos se empleó la cartografía que comprende información de las formaciones geológicas. A partir de la información cartográfica se estableció una reclasificación en función de los grupos hidrológicos de suelo A/B/C/D.

Los parámetros asociados a las características del suelo se obtuvieron del informe “Estudio de suelos para diseño de reposición de redes en tramos críticos de alcantarillado y normalización de la ciudad de Cali”, realizado en agosto del año 2018, y desarrollado en cinco barrios de la comuna 18 contiguas al área de estudio, con características de zona ladera, específicamente en los barrios las pampas del mirador, brisas de las palmas, cabañitas, mandarinos y arboledas. Se realizaron 4 sondeos por barrio y 60 muestras, para el caso de estudio de analizaron 15 muestras representativas de la superficie, hasta 1.0 metro de profundidad aproximadamente.

A partir de los datos de porcentaje de arena, limo y arcilla se utilizó el modelo SPAW (Saxton & Willey, 2005) con el fin de obtener otros parámetros que usa el modelo KINEROS

2 como lo son: el punto de marchitez, capacidad de campo, saturación, agua disponible, conductividad hidráulica saturada del suelo y densidad aparente.

A continuación, se muestran los parámetros utilizados para la modelación hidrosedimentológica para cada tipo de suelo del área de estudio.

Tabla 9. Parámetros generales del suelo para el componente hidrosedimentológico.

Parámetro	Suelo Fluvio Torrencial	Abanico Aluvial	Suelo Fluvio Arcilloso
% Humedad natural	32.1	38	40
Conductividad Hidráulica saturada (mm/h)	6.4	2.0	7.4
Tiempo de viaje (h)	15.6	13.61	49.75
Punto de marchitez (% Vol)	20.0	25.6	18.3
Capacidad de campo (% Vol)	37.2	38.5	37.2
Saturación (%Vol)	50.6	47.8	51
Agua disponible (cm/cm)	0.17	0.13	0.19
Densidad aparente (g/cm ³)	1.31	1.38	1.30
% Arena	19	32	6
% Finos	81	68	94
% Limos	49	26	57
% Arcillas	32	42	37

Factor de erosionabilidad K

Este factor describe la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por las gotas de lluvia, es determinado experimentalmente y está relacionado con la intensidad de la lluvia, el escurrimiento y la infiltración (Piscitelli, Marcela; Varni, Marcelo; Sfeir, 2010). La ecuación tiene en cuenta el contenido de materia orgánica, la conductividad hidráulica del suelo y la textura.

$$K = \frac{(2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - a) + 3.25 * (b - 2) + 32.5 * (c - 3))}{100} * 1.313$$

Ecuación 41. Factor K de la USLE

Dónde:

M: (% Limo + % Arena fina) x (100 - % Arcilla)

a: % Carbono orgánico

b: Estructura del suelo. 1 para la estructura muy fina granular; 2 para la estructura fina granular; 3 para la estructura media gruesa (granular); 4 para la estructura blocosa, laminar, masiva.

c: Clase de permeabilidad. 6 para permeabilidad muy lenta ($K_s < 0.12 \text{ cm/h}$); 5 para permeabilidad lenta ($0.12 \text{ cm/h} < K_s < 2.0 \text{ cm/h}$); 4 para permeabilidad moderada ($2.0 \text{ cm/h} < K_s < 6.0 \text{ cm/h}$); 3 permeabilidad moderadamente rápida ($6.0 \text{ cm/h} < K_s < 12.5 \text{ cm/h}$); 2 para permeabilidad rápida ($12.5 \text{ cm/h} < K_s < 25 \text{ cm/h}$); 1 para permeabilidad muy rápida ($25 \text{ cm/h} < K_s$).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$K_{FLUVIO\ TORRENCIAL} = 0.456$$

$$K_{ABANICO\ ALUVIAL} = 0.350$$

$$K_{FLUVIO\ ARCILLOSO} = 0.407$$

Los resultados de factor de erosionabilidad, muestran una propensión media de la cuenca a ser erosionada, es decir, que tiene una susceptibilidad media frente a la erosión.

4.2.2.3 Resultados parametrización

Cada elemento de la cuenca fue caracterizado con su geometría hidráulica, la longitud de flujo, además de sus propiedades de cobertura vegetal y suelos. Para ello se parametrizaron los elementos mediante la herramienta AGWA, que establece a cada elemento las propiedades de geometría hidráulica y topografía, así como las otras propiedades mencionadas.

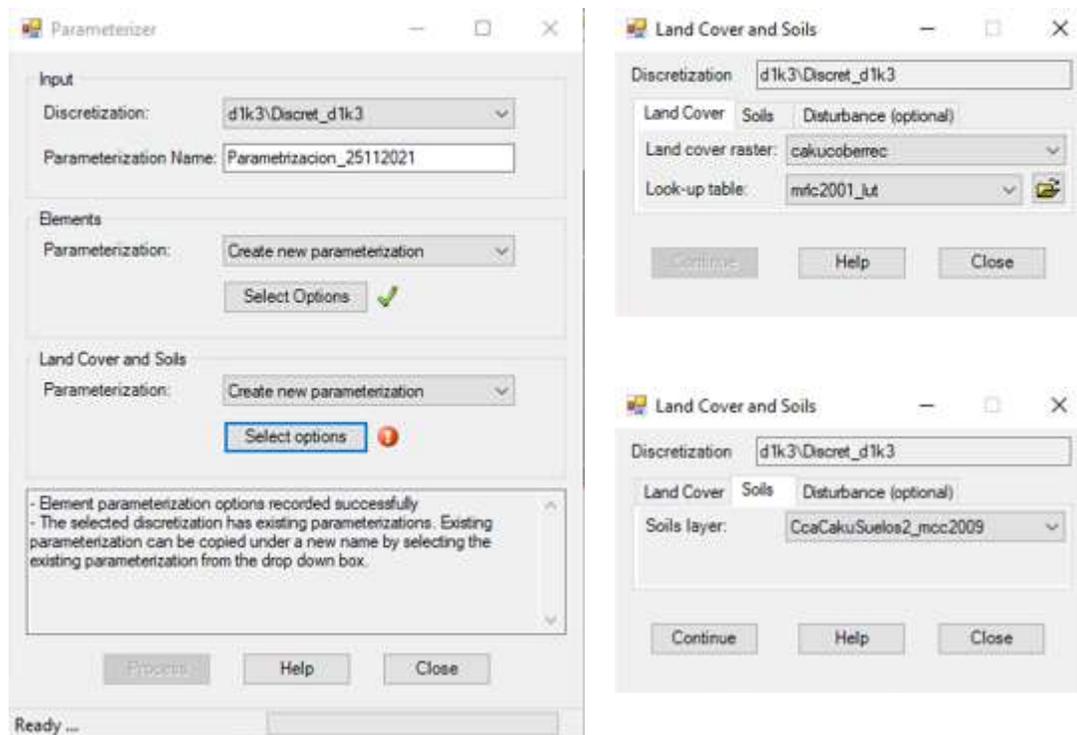


Figura 38. Parametrización de la cuenca de estudio.

Los parámetros hidráulicos, hidrológicos y sedimentológicos utilizados en las simulaciones se muestran en las Tabla 10 y Tabla 11 para cada área tributaria a los cuatro desarenadores que se encuentran ubicados en el área de estudio.

Tabla 10. Parámetros del modelo en K2 utilizados en las áreas tributarias para los desarenadores Alto Refugio y Lourdes

Parámetros	Unidades	Alto Refugio		Lourdes	
		Planos	Canales	Planos	Canales
Componente Sedimentológico					
Tipo de suelo		Fluvio Torrencial		Fluvio Torrencial	
Dist (índice de distribución del tamaño de los poros)	-	0.390	0.545	0.390	0.545
Pct-Sand (proporción de arenas)	%	19	0.9	19	0.9
Pct_Silt (proporción de limos)	%	49	0.05	49	0.05
Pct_Clay (proporción de arcillas)	%	32	0.05	32	0.05

Parámetros	Unidades	Alto Refugio		Lourdes	
		Planos	Canales	Planos	Canales
COH (coeficiente de cohesión del suelo)	-	0.007	0.005	0.007	0.005
Smax (máxima saturación relativa)	-	0.86	0.0782	0.86	0.1469
Componente Cálculo de Pérdidas					
INT (interceptación)	mm	1.67		0.27	-
CV (coeficiente de variación de Ks)	-	1.03	0	1.03	0
KS (conductividad hidráulica saturada)	mm/hr	7.86	0	4.41	0
G (Potencial de succión)	mm	217.67	101	217.67	101
Por (porosidad del suelo)	cm ³ /cm ³	0.416	0.440	0.416	0.440
Rock (porcentaje del contenido volumétrico de rocas)	%	0.17	0	0.17	0
Componente de Transformación Lluvia - Caudal					
Coef. Manning (Mann-N)	-	0.256	0.039	0.291	0.013
Pave (proporción de superficie cubierta con grava)	%	0.06	0	0.60	0

Tabla 11. Parámetros del modelo en Kineros utilizados en las áreas tributarias para los desarenadores Nápoles y Limonar Autopista Sur

Parámetros	Unidades	Nápoles				Limonar Autopista Sur	
		Planos	Canales	Planos	Canales	Planos	Canales
Componente Sedimentológico							
Tipo de suelo		Fluvio Torrencial		Fluvio Arcilloso		Abanico Aluvial	
Dist (índice de distribución del tamaño de los poros)	-	0.390	0.545	0.390	0.545	0.390	0.545
Pct-Sand (proporción de arenas)	%	19	0.90	32	0.90	32	0.9
Pct_Silt (proporción de limos)	%	19	0.05	26	0.05	26	0.05
Pct_Clay (proporción de arcillas)	%	32	0.05	42	0.05	42	0.05
COH (coeficiente de cohesión del suelo)	-	0.007	0.005	0.007	0.005	0.007	0.005

Parámetros	Unidades	Nápoles				Limonar Autopista Sur	
		Planos	Canales	Planos	Canales	Planos	Canales
Smax (máxima saturación relativa)	-	0.86	0.1005	0.86	0.86	0.86	0.0227
Componente Cálculo de Pérdidas							
INT (interceptación)	mm	0.2	-	0.08	-	0.08	-
CV (coeficiente de variación de Ks)	-	1.03	0	1.03	0	1.03	0
KS (conductividad hidráulica saturada)	mm/hr	3.51	0	2.90	0	2.90	0
G (Potencial de succión)	mm	217.67	101	217.67	101	217.67	101
Por (porosidad del selo)	cm ³ /cm ³	0.416	0.440	0.416	0.440	0.416	0.440
Rock (porcentaje del contenido volumétrico de rocas)	%	0.17	0	0.17	0	0.17	0
Componente de Transformación Lluvia – Caudal							
Coef. Manning (Mann-N)	-	0.152	0.013	0.120	0.039	0.120	0.013
Pave (proporción de superficie cubierta con grava)	%	0.60	0	0.64	0	0.64	0

Al cruzar la información del tipo de suelo que caracteriza el área de estudio con los planos tributarios a cada desarenador se muestra que la mayor proporción de las áreas tributarias a los desarenadores Alto refugio, Lourdes y Nápoles se caracterizan por presentar suelos de tipo Fluviotorrencial, el desarenador Nápoles cuenta con tres planos que están ubicados en suelos de tipo Fluvio arcilloso. Entre tanto, el área tributaria al desarenador Limonar se caracteriza por presentar tipos de suelo denominados abanico aluvial. En la tabla anterior se muestra la distribución de la cantidad de arenas, limos y arcillas asociadas a estos tipos de suelo.

A continuación, se muestra la ubicación de los planos tributarios a los desarenadores de la cuenca de estudio en relación con el tipo de suelo identificado en el área.



Figura 39. Ubicación de los planos tributarios a los desarenadores en relación con el tipo de suelo de la cuenca.

A continuación, se muestran los resultados de calibración y validación obtenidos del ejercicio de modelación de producción de sedimentos a partir de las precipitaciones seleccionadas, las condiciones geo-morfométricas y uso del suelo de la cuenca de estudio.

4.2.3 Calibración y validación del modelo

Para la calibración se utilizó la medición de la altura de lámina de agua del Canal Nápoles donde existe un sensor de alertas tempranas. Los sensores de nivel son de tipo radar, envían, en línea, una señal hasta el Centro de Control Maestro de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI, que es el lugar donde se encuentran los servidores y se realiza el almacenamiento de la información. Los niveles de agua en el canal se monitorean las 24 horas y se presentan registros de nivel cada 5 minutos.

A partir de los niveles y la geometría de la sección del canal, mediante la ecuación de Manning, se estimaron los caudales que representan la escorrentía de un sector del área tributaria al desarenador “Nápoles”, el que se muestra en la siguiente figura.

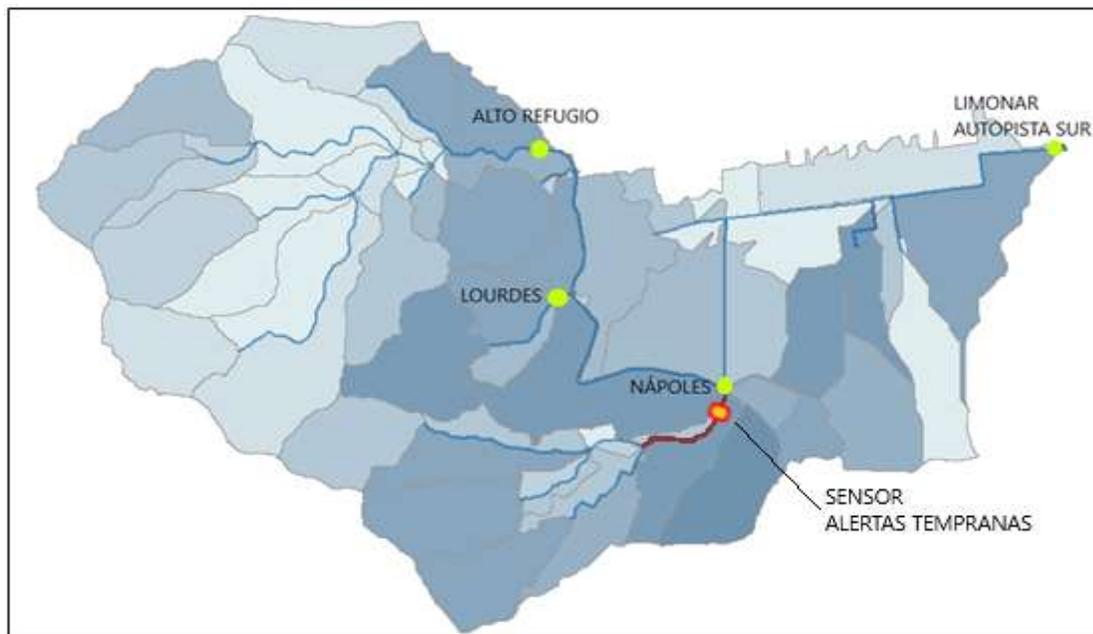


Figura 40. Ubicación del tramo de canal afluente al desarenador Nápoles que cuenta con sensor de niveles.

4.2.3.1 Calibración y modelación de caudales líquidos

A partir de la información mensual del periodo de análisis, se seleccionaron eventos de precipitación máximos, los cuales fueron inicialmente revisados en el ejercicio de modelación de generación de sedimentos y representan los eventos que generan la cantidad de sedimento que es retirada de manera mensual. A continuación, en la Tabla 12 se muestran los eventos de precipitación seleccionados para el ejercicio de calibración.

Tabla 12. Eventos de precipitación utilizados para el ejercicio de calibración del modelo

Valor	N°	Fecha	Valor (mm)	Intensidad (mm/h)
	Ev. 1	10/10/2015	24,1	5,56
	Ev. 2	16/10/2015	19,1	11,46
	Ev. 3	7/11/2015	19,1	8,14
Precipitación Máxima	Ev. 4	6/03/2016	19,4	8,95
	Ev. 5	15/03/2016	21,8	8,72
	Ev. 6	17/03/2016	22,8	12,44
	Ev. 7	4/03/2016	28,1	28,10

Posteriormente, se realizó un proceso de validación de la respuesta hidrológica del modelo, también con precipitaciones máximas. A continuación, en la Tabla 13 se muestran los eventos de precipitación seleccionados para la validación.

Tabla 13. Eventos de precipitación utilizados para el ejercicio de validación del modelo

Valor	N°	Fecha	Valor (mm)	Intensidad (mm/h)
Precipitación Máxima	Ev. 1	5/05/2017	17,4	14,91
	Ev. 2	8/05/2017	21,9	18,77
	Ev. 3	12/05/2017	21,5	14,33
	Ev. 4	8/10/2018	26,4	14,40
	Ev. 5	19/09/2019	41,6	5,67

Tanto la calibración como validación del comportamiento hidrológico se realizaron comparando el hietograma de los eventos de lluvia de la estación climática Siloé con los niveles del canal Nápoles, obtenidos a partir del registro de la altura de la lámina de agua por los sensores de alertas tempranas con los que cuenta la empresa de servicios públicos de la ciudad de Cali.

De los resultados del proceso de calibración se evidencia que se presenta un comportamiento aceptable para los eventos de precipitación utilizados en relación con los caudales transportados en el canal del área de influencia del desarenador Nápoles, ya que el error volumétrico para caudales líquidos es menor al 20 % para todos los eventos (ver Tabla 14). A partir de los parámetros calibrados, se corre nuevamente el modelo con la información de los eventos de precipitación para el proceso de validación (ver Tabla 15).

Tabla 14. Resultados de la calibración de caudales líquidos obtenidos del modelo KINEROS 2 en el canal tributario al desarenador Nápoles.

Fecha del evento de Precipitación	Caudales simulados con KINEROS2 (m ³ /s)	Caudales estimados a partir de niveles (m ³ /s)	Error de balance (%)
10/10/2015	0.80	0.92	13.01
16/10/2015	0.64	0.57	-11.47
7/11/2015	0.55	0.49	-11.78
6/03/2016	0.50	0.55	9.89

Fecha del evento de Precipitación	Caudales simulados con KINEROS2 (m³/s)	Caudales estimados a partir de niveles (m³/s)	Error de balance (%)
15/03/2016	0.80	0.89	10.01
17/03/2016	1.20	1.48	18.98
4/03/2016	1.64	1.55	-5.89

Tabla 15. Resultados de la validación de caudales líquidos obtenidos del modelo KINEROS 2 en el canal tributario al desarenador Nápoles.

Fecha del evento de Precipitación	Caudales simulados con KINEROS2 (m³/s)	Caudales estimados a partir de niveles (m³/s)	Error de balance (%)
05/05/2017	1.10	1.16	20.29
08/05/2017	1.43	1.50	4.67
12/05/2017	0.85	1.11	17.55
8/10/2018	1.15	1.06	-8.49
19/09/2019	1.40	1.24	7.33

En cuanto a las condiciones hidráulicas descritas para la subcuenca es posible establecer que los caudales simulados con KINEROS 2 presentan un comportamiento aceptable. Los parámetros calibrados para esta subcuenca permitieron definir un margen que posibilitó una iteración ágil y acertada para las áreas tributarias de los demás desarenadores objeto de estudio.

4.2.3.2 Calibración y validación de los caudales sólidos y el depósito de sedimentos

Es preciso señalar que las cantidades observadas en cada desarenador se consolidan de manera mensual por lo que existen limitaciones en el análisis de los volúmenes retirados de sedimento de los desarenadores. En primer lugar, la información se consigna de manera mensual, por lo tanto, no es posible confrontar la totalidad de los registros para eventos específicos de lluvia, en segundo lugar, no se consigna la totalidad de la información sobre los mantenimientos realizados específicamente en los desarenadores Nápoles y Limonar.

Lo anterior genera que los datos que pueden ser comparables con eventos de precipitación se reduzcan, y únicamente se extraen para el análisis un total de 4 registros de retiro de sedimentos para ser comparados con los resultados de 7 eventos de precipitación para la calibración y 6 registros de retiro de sedimentos para ser comparados con los resultados de 5 eventos de precipitación para la validación. La validación realizada es de tipo temporal, donde se utilizan los parámetros ajustados de la calibración con 5 eventos de precipitación de periodos diferentes a las utilizadas en la calibración.

Teniendo en cuenta la explicación anterior, el proceso de calibración y validación del transporte de sedimentos se realizó cuantificando las cantidades de sedimento producidas y transportadas hasta el final de cada canal que tributa a los desarenadores de interés, por mes y se compararon con la cantidad de sedimento observada en cada sedimentador en los meses de reporte. Para esto se utilizaron los registros de mantenimientos de los desarenadores para el periodo 2015 – 2019, los que se muestran en la Tabla 16 y Tabla 17. Teniendo en cuenta que los resultados del modelo están en función de los kilogramos de sedimento generado, estos valores se multiplicaron por una densidad de sedimento asumida de 2650 kg/m³ para hacer comparables los datos en términos de volumen.

Tabla 16. Registro de volumen de sedimento retirado utilizado para la calibración de flujo de sólidos

Desarenador	Volumen observado (m³)	Mes y año de reporte
Alto Refugio	348.5	marzo de 2016
Lourdes	30.00	noviembre de 2015
Nápoles	100.00	noviembre de 2015
Limonar Autopista Sur	40.0	marzo de 2016

Tabla 17. Registro de volumen de sedimento retirado utilizado para la validación de flujo de sólidos

Desarenador	Volumen observado (m³)	Mes y año de reporte
Alto Refugio	105.00	octubre de 2018
	165.00	septiembre de 2019
Lourdes	75.00	Mayo de 2017
Nápoles	105.00	octubre de 2018
	186.00	septiembre de 2019
Limonar Autopista Sur	41	octubre de 2018

La Tabla 18 y Tabla 19 consigna la información de cada evento de precipitación de calibración y validación respectivamente, agrupados por mes de reporte de extracción de sólidos como se muestra en la Tabla 16 y Tabla 17.

A partir de los parámetros calibrados, se corrió nuevamente el modelo con la información de los otros cinco eventos de precipitación seleccionados para la validación y que ocurrieron previos al mantenimiento de los desarenadores. Los resultados obtenidos del proceso de validación para cada desarenador se muestran en la Tabla 19.

Es preciso señalar que KINEROS 2 genera como resultado un balance de sedimentos en cada plano y canal de la esquematización del sistema, este balance cuenta con cantidades de sedimentos de entrada, depositados y en las salidas, además de una estimación de pérdidas. El valor de la salida de estos balances de sedimentos, que el modelo ejecuta en cada canal, se tomó como la cantidad de sedimento que ingresa hacia los desarenadores, según su ubicación en la cuenca de estudio. Entre tanto, la cantidad de sedimento depositados en los canales, el modelo la considera como la fracción de sedimento que se ha acumulado en los diferentes tramos del canal. De otra manera, se refiere a la cantidad de sedimentos depositados debido a las condiciones de topografía de los tramos que posibilitan la acumulación de sedimento en las redes.

Tabla 18. Resultados de la calibración del modelo de generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones máximas

	ID_Canal	Variable	Eventos usados para la calibración							
			10/10/2015	16/10/2015	7/11/2015	6/03/2016	15/03/2016	17/03/2016	4/03/2016	
Desarenador	ID_Canal	Precipitación total (mm)	24.10	19.1	19.1	19.40	21.80	22.80	28.10	
		Duración (h)	4.17	1.50	2.17	2.00	2.33	1.67	0.83	
		Intensidad promedio (mm/h)	5.56	11.46	8.14	8.95	8.72	12.44	28.10	
ALTO REFUGIO	7	Peso estimado (kg)	223,856	80,799	22,688	3,870	63,335	130,232	725,975	
		Volumen estimado por evento (m ³)	84.50	30.50	8.60	1.50	23.90	49.10	274.0	
		Volumen mensual estimado (m ³)	123.6			349.00				
		Volumen observado	no hubo dato reportado			348.50				
		Error volumétrico (%)	NA			0.14				
LOURDES	19	Peso (kg)	50,553	14,605	4,528	268	27,764	81,762	246,746	
		Volumen estimado por evento (m ³)	19.10	5.50	1.70	0.1	10.5	30.9	93.1	
		Volumen mensual estimado (m ³)	26.30			134.60				
		Volumen observado	30.00			no hubo dato reportado				
		Error volumétrico (%)	12.33			NA				

	ID_Canal	Variable	Eventos usados para la calibración							
			10/10/2015	16/10/2015	7/11/2015	6/03/2016	15/03/2016	17/03/2016	4/03/2016	
Desarenador		Precipitación total (mm)	24.10	19.1	19.1	19.40	21.80	22.80	28.10	
		Duración (h)	4.17	1.50	2.17	2.00	2.33	1.67	0.83	
		Intensidad promedio (mm/h)	5.56	11.46	8.14	8.95	8.72	12.44	28.10	
NÁPOLES	22-23-24	Peso (kg)	199,764	41,764	23,630	9,023	72,334	215,189	411,431	
		Volumen estimado por evento (m ³)	75.40	15.80	8.90	3.40	27.30	81.20	155.30	
		Volumen mensual estimado (m3)	100.10			267.2				
		Volumen observado	100.00			no hubo dato reportado				
		Erro volumétrico (%)	-0.10			NA				
LIMONAR AUTOPISTA SUR	10	Peso (kg)	127,687	2,475	1,865.0	0.3	35,733	53,669	10,976	
		Volumen estimado por evento (m3)	48.20	0.90	0.70	0.0001	13.5	20.3	4.1	
		Volumen mensual estimado (m3)	49.80			37.90				
		Volumen observado	no hubo dato reportado			40.00				
		Erro volumétrico (%)	NA			5.25				

Tabla 19. Resultados de la validación del modelo para la estimación de generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones máximas

Desarenador	ID_Canal	Variable	Eventos usados para la validación				
			5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
Desarenador	ID_Canal	Precipitación total (mm)	17.40	21.90	21.50	26.40	41.60
		Duración (h)	1.00	1.00	1.33	1.67	7.17
		Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.40	5.67
ALTO REFUGIO	7	Peso (kg)	145,624	247,895	146,062	279,155	425,241
		Volumen estimado por evento (m3)	55.00	93.50	55.10	105.30	160.50
		Volumen mensual estimado (m3)	203.60			105.30	160.50
		Volumen observado	no hubo dato reportado			105.00	165.00
		Erro volumétrico (%)	NA			0.29	2.73
LOURDES	19	Peso (kg)	38,555	98,970	60,823	183,010	277,523
		Volumen estimado por evento (m3)	14.50	37.30	23.00	69.10	104.70
		Volumen mensual estimado (m3)	74.80			69.10	104.70
		Volumen observado	75.00			no hubo dato reportado	no hubo dato reportado
		Erro volumétrico (%)	0.27			NA	NA

Desarenador	ID_Canal	Variable	Eventos usados para la validación				
			5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
		Precipitación total (mm)	17.40	21.90	21.50	26.40	41.60
		Duración (h)	1.00	1.00	1.33	1.67	7.17
		Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.40	5.67
NÁPOLES	24-23-24	Peso (kg)	89,131	178,717	133,790	364,080	574,086
		Volumen estimado por evento (m3)	33.60	67.40	50.50	137.40	216.60
		Volumen mensual estimado (m ³)	151.5			137.4	216.60
		Volumen observado	no hubo dato reportado			105.00	186.00
		Error volumétrico (%)	NA			23.60	-16.45
LIMONAR AUTOPISTA SUR	10	Peso (kg)	312	11,067	14,386	105,936	351,618
		Volumen estimado por evento (m3)	0.10	4.20	5.40	40.00	132.70
		Volumen mensual estimado (m ³)	9.70			40.00	132.70
		Volumen observado	no hubo dato reportado			41.00	no hubo dato reportado
		Error volumétrico (%)	NA			2.44	NA

De los resultados del proceso de calibración del flujo de sólidos (Tabla 18) se evidencia un comportamiento aceptable al comparar los datos de retiro de sedimentos con la cantidad simulada, ya que, se obtuvieron errores volumétricos para la producción de sedimentos de 0.14 % en el desarenador de Alto Refugio, 12.33 % en Lourdes, -0.10 % en Nápoles y 5.25 % en Limonar Autopista Sur.

De los resultados del proceso de validación del flujo de sólidos (Tabla 19) se muestra un comportamiento aceptable al comparar los datos de retiro de sedimentos en cada desarenador con la cantidad de sedimento estimada para los eventos de precipitación señalados, donde, se obtuvieron errores volumétricos para la producción de sedimentos de (0.29 y 2.73 %) en el desarenador de Alto Refugio, 0.27 % en Lourdes, 16.45 y 23.6 % en Nápoles y 2.44 % en Limonar Autopista Sur.

Se muestra que el desarenador que mayor cantidad de sedimento recibe es Alto refugio seguido por Nápoles, Lourdes y finalmente Limonar, estos niveles de sedimento generados también están relacionados directamente con la extensión de las áreas tributarias y el tipo de cobertura de las áreas aferentes como se analizará en detalle en los resultados, esta condición se muestra específicamente el área tributaria del desarenador Limonar, que, al estar ubicado en la zona urbana presenta en mayor proporción un área impermeable con baja generación de sedimentos, por el contrario áreas tributarias como la del desarenador alto refugio se caracterizan por presentar zonas de extracción minera, estado que promueve cantidades significativas de sedimento.

Se señala que la estructura del desarenador Nápoles presenta una capacidad de 50 m³, sin embargo, en este punto se registran retiros de sedimento de entre 100 a 186 m³, lo anterior, se debe a, que los sedimentos que no son retenidos en este desarenador decantan en el canal contiguo a la estructura, como se muestra a continuación.



Figura 41. Estructura del desarenador Nápoles y material excedente sobre el canal.

También se evaluaron eventos de precipitaciones bajas, encontrando que la magnitud de estos eventos, no contribuye en la generación de sedimento como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20. Resultados del modelo para la generación de sedimentos a partir de los datos de precipitaciones bajas

		Variable	Evento de baja precipitación			
			30/03/2016	29/08/2017	21/11/2018	16/10/2019
Desarenador	ID_Canal	Precipitación total (mm)	8.70	8.40	8.30	8.50
		Duración (h)	7.50	2.33	6.17	1.00
		Intensidad promedio (mm/h)	1.13	3.36	1.31	7.29
ALTO REFUGIO	7	Peso (kg)	0.0001	0.3274	0.0001	0.0171
		Volumen (m ³)	0.0	0.0	0.0	0.0
LOURDES	19	Peso (kg)	0.0001	1.1391	0.0041	9.8719
		Volumen (m ³)	0.0	0.0	0.0	0.0
NAPLES	22-23-24	Peso (kg)	0.0001	1.7173	0.0003	0.0150
		Volumen (m ³)	0.0	0.0	0.0	0.0
LIMONAR AUTOPISTA SUR	10	Peso (kg)	0.0000	0.1144	0.0000	0.0000
		Volumen (m ³)	0.0	0.0	0.0	0.0

A partir de estos resultados se estableció no considerar para el análisis de generación de sedimentos las precipitaciones bajas.

Por último, se realizó un análisis de generación de sedimento se realizó comparando las cantidades generadas con distintas variables de la precipitación como la magnitud total (mm), Duración (h) e Intensidad promedio (mm/h). Se realizó una agrupación a partir de las variables señaladas, lo que consistió en identificar las condiciones de un evento de precipitación y su relación con la cantidad de sedimento generado.

4.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO/HIDRÁULICO

En el apartado de calibración y validación de los caudales líquidos se determinaron los caudales de escorrentía asociados a los eventos de precipitación que son objeto de evaluación, estos datos de caudales, permitieron establecer un margen de evaluación en términos de caudal afluente medio y máximo a cada desarenador. A partir de los cinco eventos de precipitación, se determinaron los valores máximos y promedio de los caudales con los que el sistema operó bajo las condiciones de las precipitaciones señaladas.

Para el análisis del comportamiento hidráulico de las unidades desarenadoras se realizó una revisión de los parámetros, criterios de diseño y condiciones de operación en función del volumen de almacenamiento y criterios de velocidad paso, todos esos parámetros se muestran en el capítulo de resultados para facilitar la lectura. Debido a la limitación de la información en relación con las memorias de diseño de los desarenadores, se realizó un chequeo de las dimensiones de estas unidades, con el fin de verificar los parámetros de diseño y los caudales asociados a condiciones de operación óptimas.

La evaluación de la operación de las unidades desarenadoras consistió en los parámetros de velocidad horizontal y velocidad de sedimentación para los caudales máximos previamente definidos. Una vez establecidos estos parámetros se compararon con los parámetros de velocidad horizontal y velocidad de sedimentación asociados a los caudales obtenidos mediante el modelo KINEROS 2 para cada desarenador.

4.4 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Una vez establecida la cantidad de sedimento generada en la cuenca de estudio y su relación con las condiciones de operación de cada una de las unidades de desarenado, se definieron las alternativas tendientes al control de la producción de sedimentos y posible optimización en relación con la gestión de los sedimentos. En los escenarios se incluyeron dos alternativas con el objetivo de promover una menor generación de sedimentos, además de identificar la necesidad de nueva infraestructura retenedora de sólidos a instalar.

La alternativa No. 1 consiste en evaluar el cambio de uso del suelo del área que está referenciada como zona de extracción minera, lo que se ha venido contemplando en el proyecto estratégico “Diseño y adecuación del ecoparque cerro de la bandera” que hace parte de la ficha de proyectos del Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad.

La alternativa No. 2 consiste en dimensionar una nueva estructura de retención de sedimentos y determinar la ubicación de la estructura según la magnitud de la generación de sedimentos de las microcuencas tributarias.

Se evaluó la respuesta de estos escenarios de control y gestión de sedimentos, mediante el modelo calibrado, con el cual, se estimó la cantidad de sedimento generada. Y mediante un balance aritmético se determinó el beneficio obtenido en función de la capacidad de los desarenadores y la reducción en la cantidad de sedimento generado.

Plantear alternativas para la modificación de los parámetros de uso del suelo de las zonas con asentamientos humanos de desarrollo incompleto – AHDI no es viable desde el punto de vista técnico administrativo, pues supone la reubicación de áreas extensas y consolidadas de infraestructura residencial, entretanto es posible evaluar la modificación de la cobertura de vías y senderos peatonales, ya que, se encuentran en suelo descubierto. Sin embargo, para el presente estudio, no es posible realizar la evaluación, debido a la escala en la que se encuentra el modelo, donde, exclusivamente es posible especificar las características de los planos y canales en general, y no detalles específicos de los planos como sería el caso de vías y senderos.

5 RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

Los resultados serán expuestos en términos de los objetivos específicos y por tanto se utilizan los resultados conjugados de la modelación y de los análisis adicionales. Primero se describe de manera general las condiciones hidrológicas e hidráulicas de la subcuenca de estudio, lo cual, corresponde al objetivo específico número 1.

Luego se revisarán los resultados en términos de la producción y depositación de sedimentos, primero en las estructuras desarenadoras como tal, lo que corresponde al objetivo específico número 2.

Finalmente, de forma general se muestra la producción de sedimento total de la cuenca, resultados asociados al objetivo número 3, utilizando para ello las simulaciones realizadas. además, se proponen dos alternativas de solución teniendo en cuenta los puntos críticos encontrados.

5.1 CONDICIONES HIDROLÓGICAS E HIDRÁULICAS

Evaluar la susceptibilidad de la cuenca ante la erosión permite establecer el grado de vulnerabilidad en términos de la capacidad de control de la infraestructura del sistema de drenaje de los volúmenes de sedimento generados. De manera que, en este apartado se establecen los parámetros morfométricos, para describir la cuenca en función del sistema de drenaje. A continuación, se presentan los parámetros morfométricos de la cuenca de estudio y las variables utilizadas para determinar el Tiempo de concentración, Densidad de drenaje, Función de ancho e Índice topográfico.

Tabla 21. Parámetros morfométricos de la cuenca de estudio

Descripción	Und.	Valor
De la Superficie		
Área	km ²	3.90
Perímetro de la cuenca	km	13.31
Cotas		
Cota máxima	msnm	1270
Cota mínima	msnm	959.17
Diferencia de Elevaciones	msnm	310.83

Descripción	Und.	Valor
Centroide (Magna Colombia Bogotá)		
Xcentroide	m	1057548.61
Ycentroide	m	866720.47
Altitud		
Altitud media	msnm	1023.86
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	8.86
De la Red Hídrica		
Longitud del cauce principal	km	4.76
Orden de la Red Hídrica	Und	3
Longitud de le red hídrica	km	10.65
Pendiente promedio de la red hídrica	%	3
Parámetros		
Pendiente del cauce principal	%	3.64

Tiempo de concentración

Tabla 22. Resultados Tiempo de Concentración

Autor	minutos	horas
Passini	33.32	0.56
California Culvert Practice	69.11	1.15
Kirpich	47.34	0.79

De las tres formas de estimación del tiempo de concentración aplicadas en este caso de estudio, se obtuvo en promedio un valor de 49.9 minutos, este valor describe una respuesta moderada de descarga de la cuenca, esta condición es característica de las cuencas alargadas y podría justificar el por qué se evidencian depósitos de sedimentos en ciertos tramos de la red de drenaje.

Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje se determina como el cociente entre la longitud total acumulada del cauce y el área total de la cuenca, tal como lo indica a continuación.

$$D = \frac{10.65 \text{ km}}{3.90 \text{ km}^2} = 2.73$$

El valor calculado de densidad de drenaje describe a la cuenca de estudio con características de moderada densidad de drenaje, lo que a su vez caracteriza la respuesta de la cuenca frente a una tormenta como media, debido a, que la evacuación del agua se realiza en un tiempo considerado (Villón, 2002).

Histograma de frecuencias altimétricas

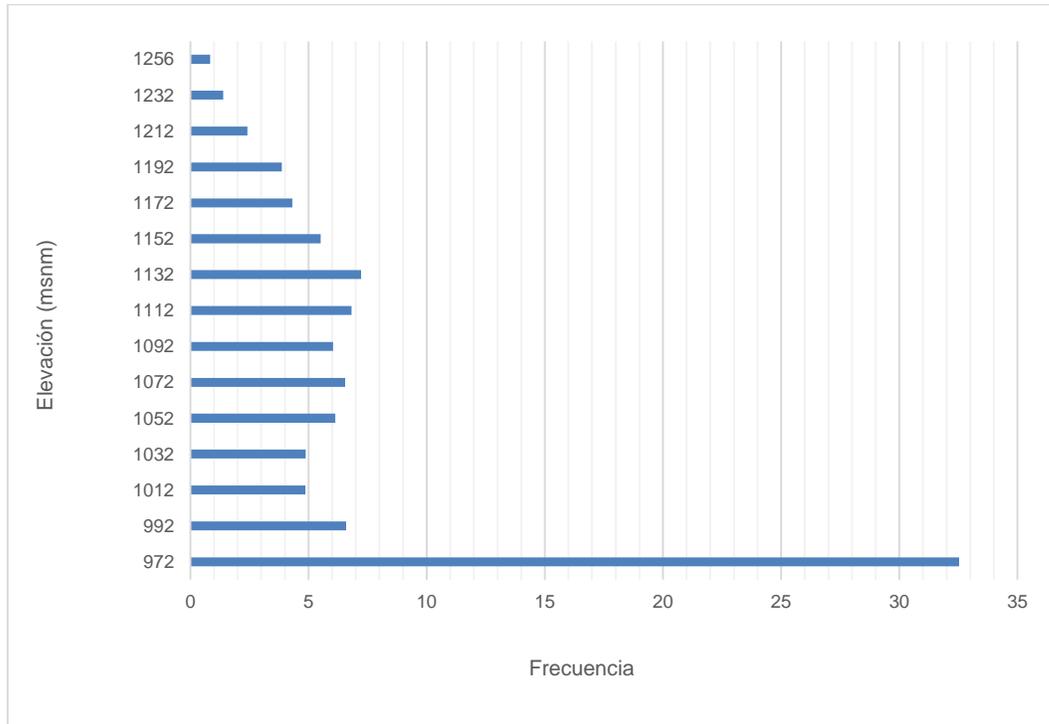


Figura 42. Frecuencias altimétricas

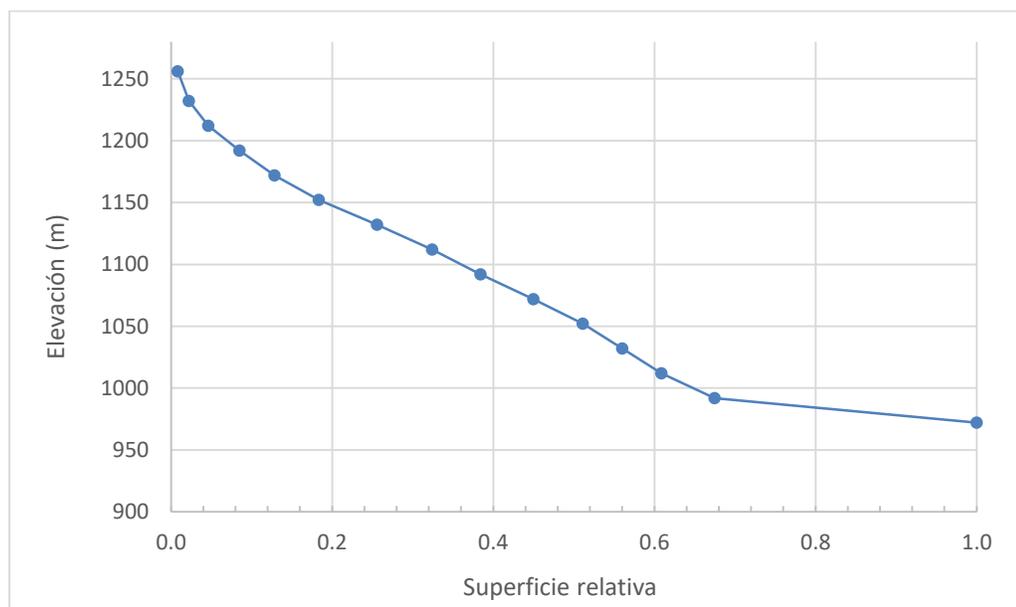
Lo anterior muestra una descripción del área de estudio, donde, se pueden observar las condiciones de una cuenca urbana en zona de ladera, se identifica una zona plana con un área significativa de más del 30 % del área de estudio con una pendiente media de 972 msnm, y el área restante de la cuenca describe un incremento en la elevación del terreno hasta los límites hidráulicos de la cuenca de estudio.

Diagrama área – pendiente

La curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada.

Tabla 23. Cotas y área de la cuenca para representación de la Curva Hipsométrica

No.	Cota (msnm)				Área (km ²)		
	Mínimo	Máximo	Elevación media	Elevación relativa	Superficie	Superficie acumulada	Superficie relativa
15	1242	1270	1256	1.00	0.03	0.033	0.008
14	1222	1242	1232	0.98	0.05	0.087	0.022
13	1202	1222	1212	0.96	0.09	0.182	0.047
12	1182	1202	1192	0.95	0.15	0.333	0.085
11	1162	1182	1172	0.93	0.17	0.501	0.128
10	1142	1162	1152	0.92	0.22	0.717	0.184
9	1122	1142	1132	0.90	0.28	0.999	0.256
8	1102	1122	1112	0.89	0.27	1.265	0.324
7	1082	1102	1092	0.87	0.24	1.501	0.384
6	1062	1082	1072	0.85	0.26	1.757	0.450
5	1042	1062	1052	0.84	0.24	1.996	0.511
4	1022	1042	1032	0.82	0.19	2.187	0.560
3	1002	1022	1012	0.81	0.19	2.377	0.609
2	982	1002	992	0.79	0.26	2.634	0.675
1	962	982	972	0.77	1.27	3.905	1.000

**Figura 43.** Curva hipsométrica

En la Figura 43 del relieve de la cuenca, se observa la distribución de áreas en función de la altitud, y se puede establecer que aproximadamente el 67 % del área de la cuenca de estudio hace parte de la zona de ladera. De esta manera es posible determinar que la cuenca posee una mayor cantidad de área en la zona alta, considerada con riesgo potencial de afectaciones por erosión.

5.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE SEDIMENTABILIDAD

A continuación, se muestra la evaluación del comportamiento hidráulico y de sedimentabilidad de las estructuras retenedoras de sólidos y consecuente respuesta con las unidades posteriores.

En la Tabla 24 se muestra la información obtenida de la revisión del inventario de la infraestructura y catastro de redes de la cuenca de estudio objeto de evaluación, de dónde se deduce que los desarenadores Alto Refugio y Lourdes fueron diseñados para manejar las mayores cantidades de flujos líquidos y de sedimentos. Según las dimensiones de los desarenadores Alto Refugio y Lourdes estos presentan una capacidad de almacenamiento considerable, comparada con el registro de los retiros de sedimentos de las unidades.

Tabla 24. Dimensiones de los desarenadores que hacen parte del sistema de drenaje de la cuenca de estudio

Desarenador	Volumen (m ³)	Base (m)	Largo (m)	Altura (m)	Área (m ²)
Alto Refugio	375	12.00	30	1.20	312.0
Lourdes	232	5.25	35	1.26	184.1
Nápoles	50	5.00	10	1.00	50.0
Limonar Autopista Sur	50	3.90	10.1	1.26	39.4

En la Tabla 25 se muestran los caudales máximos y promedios simulados con K2 ya calibrado. Estos datos son los caudales afluentes a cada desarenador, se presentan para cada uno de los cinco eventos de precipitación que se utilizaron para la validación.

Tabla 25. Caudales medios y máximos afluentes para cada desarenador simulados con K2

Desarenadores	Fecha del evento de precipitación	Caudales de escorrentía (m ³)	
		Qmax	Qmed
Alto Refugio	8/10/2018	0.676	0.229
	19/09/2019	0.706	0.082
	5/05/2017	0.755	0.234
	8/05/2017	0.607	0.282
	12/05/2017	0.424	0.145
	Valor de referencia	0.755	0.195
Lourdes	8/10/2018	0.278	0.109

Desarenadores	Fecha del evento de precipitación	Caudales de escorrentía (m ³)	
		Qmax	Qmed
	19/09/2019	0.319	0.037
	5/05/2017	0.698	0.243
	8/05/2017	0.235	0.105
	12/05/2017	0.152	0.058
	Valor de referencia	0.698	0.110
	Nápoles	8/10/2018	2.166
19/09/2019		2.667	0.379
5/05/2017		1.481	0.273
8/05/2017		1.861	0.610
12/05/2017		1.201	0.379
Valor de referencia		2.667	0.518
Limonar Autopista Sur	8/10/2018	3.180	1.349
	19/09/2019	3.843	0.625
	5/05/2017	1.831	0.448
	8/05/2017	2.613	0.696
	12/05/2017	1.832	0.478
	Valor de referencia	3.843	0.719

En la siguiente tabla se presentan los parámetros de diseño de las unidades de retención de sedimento o desarenadores. Estos parámetros se estiman en función de las dimensiones de los desarenadores, para cada unidad, se iteró el valor de caudal de tal manera que cumpliera con los márgenes sugeridos por el (Ministerio de Vivienda, 2021), para los parámetros Velocidad de sedimentación (<0.03 m/s) y Velocidad horizontal (<0.3 m/s) asociados a un diámetro de partícula de 0.3 mm. De igual manera se estimaron los valores de estos parámetros, con los datos de caudal con los cuales han operado los desarenadores, denominados valor de referencia (ver Tabla 26).

Tabla 26. Parámetros de diseño del desarenador

Parámetros	Desarenadores				Unidad
	Alto Refugio	Lourdes	Nápoles	Limonar Autopista Sur	
Tipo de Desarenador	Rectangular Prismático	Rectangular Prismático	Rectangular Prismático	Rectangular Prismático	-
Número de unidades	1	1	1	1	-
Caudal de diseño: Qmax	3,000	1,500	1,150	1,100	L/s

Parámetros	Desarenadores				Unidad
	Alto Refugio	Lourdes	Nápoles	Limonar Autopista Sur	
Valor de referencia: Q _{max}	755	698	2,667	3,843	L/s
Valor de referencia: Q _{med}	195	110	518	719	L/s
Temperatura del agua min	-	21*	24**	25**	°C
Temperatura del agua max	-	27*	26**	27**	°C
Velocidad Horizontal: V _H con Caudal de diseño	0.21	0.23	0.23	0.22	m/s
Velocidad Horizontal: V _H con Caudal de chequeo Q _{max}	0.052	0.11	0.53	0.78	m/s
Velocidad de arrastre: V _s	0.24				m/s
Velocidad de sedimentación: V _s con Caudal de diseño	0.0096	0.0081	0.023	0.028	m/s
Velocidad de sedimentación: V _s con Caudal de chequeo Q _{max}	0.0024	0.0038	0.0533	0.096	m/s
Diámetro de partículas: D	0.10	0.09	0.15	0.16	mm
Volumen de la unidad	375	232	50	50	m ³
Registro de volumen de sólidos retirados	349	30	100	40	m ³

Fuente: *(EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2016b),
 ** (EMCALI EMPRESA INDUSTRIAL COMERCIAL DEL ESTADO - ESP, 2021)

Al comparar los valores de referencia Q_{max} y Q_{med} simulados con el caudal de diseño de los desarenadores Alto Refugio y Lourdes es posible señalar que estas unidades presentan un comportamiento óptimo en la operación para caudales pico, puesto que, no se evidencia en los registros que los caudales afluentes a estos desarenadores superen el caudal de diseño de la estructura.

Los parámetros de velocidad de sedimentación y velocidad horizontal estimados a partir de los valores de referencia Q_{max} y Q_{med} , presentan un chequeo aceptable, ya que, estos datos se encuentran dentro del margen para una operación óptima definido en por el RAS 2021. En conclusión, las unidades señaladas cuentan con capacidad para operar con altos caudales.

En contraste para los desarenadores Nápoles y Limonar se observa que los caudales de diseño son menores a los caudales de escorrentía estimados mediante KINEROS 2. En consecuencia, la velocidad horizontal es significativamente mayor para los caudales máximos simulados. Bajo esta condición de operación, la velocidad de flujo, no garantizaría una óptima sedimentación de los sólidos, ya que la velocidad de sedimentación de las partículas también es mucho mayor para los valores simulados, superando el valor límite establecido en el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (2017) que es del orden de 0.03 m/s.

Esta condición en los flujos podría propiciar el arrastre y resuspensión del material almacenado, material que pasa a las redes y es susceptible de quedar depositado en tramos con pendientes bajas. De manera que, se concluye que la capacidad del desarenador Nápoles es insuficiente, ya que los sedimentos retirados de esta unidad, además de comprender el volumen almacenado en el desarenador, incluye material depositado en un tramo del canal (que tiene una longitud de alrededor de 20 metros) que recibe los excedentes de material del desarenador, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 44. Desarenador Nápoles, excedentes de material sobre el canal.

En el sistema de alcantarillado se identificaron dos puntos de referencia porque presentan retención y almacenamiento de sólidos propiciada por las bajas pendientes en las redes. En la Figura 45 se muestra el esquema de la cuenca de estudio y la ubicación de los tramos de red señalados, que en adelante se llamarán Tramo 1 y 2.

Como se muestra en el esquema, el tramo de red ubicado entre las cámaras 1810PC0143, 1810PC0142 y 1810PC0151 (Tramo 1), hace parte de la zona media de la cuenca, y es el conducto receptor de los flujos de la quebrada La Guillermina, área donde se realizan actividades de extracción minera, por lo cual, se considera de relevancia la condición operativa de las redes en este punto, ya que, la cantidad de sedimento transportada por las redes es significativa (ver Figura 45).

El otro punto de interés, debido a, la condición de bajas pendientes en la red de drenaje, es el tramo ubicado entre las cámaras 1790CC0400, 1790CC0150 y 1790CC0152 (Tramo 2), este tramo recibe el flujo total de la cuenca de estudio, y ha sido seleccionado debido a las reiteradas actividades de mantenimiento requeridas por colmatación de sedimento (ver Figura 45).

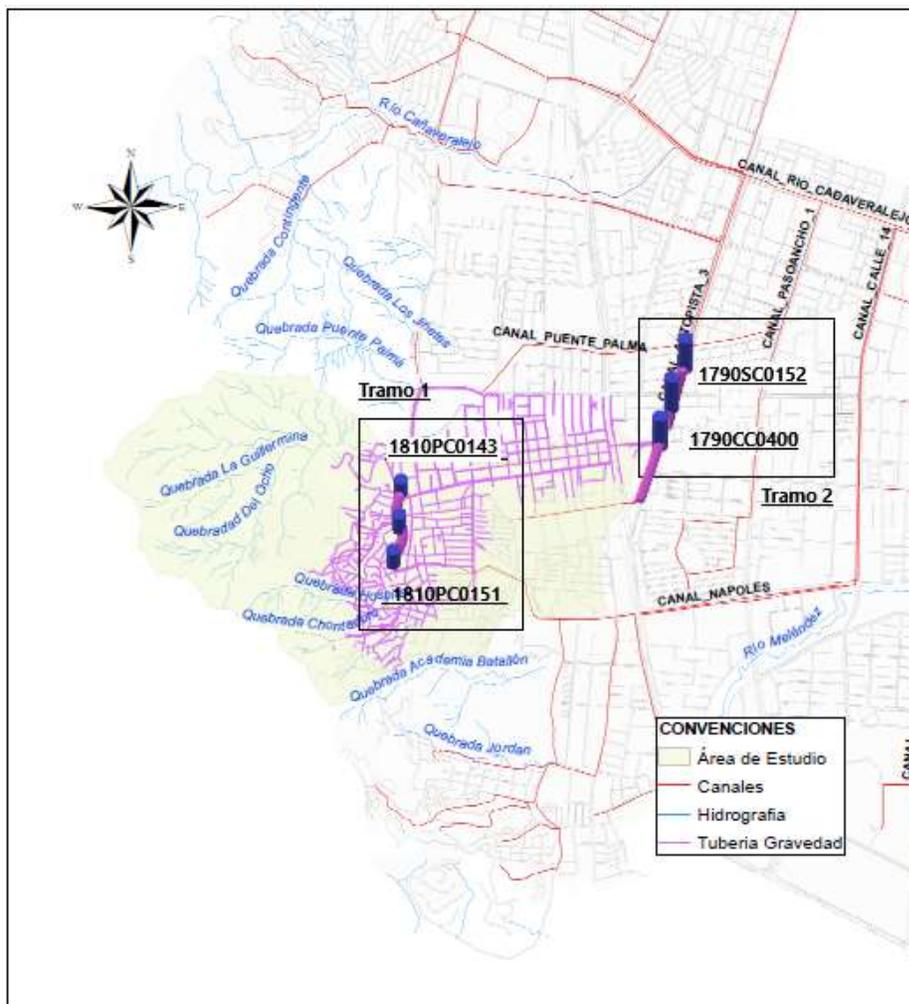


Figura 45. Redes de alcantarillado con pendientes bajas

La Tabla 27 muestra la evaluación de los parámetros de operación de las redes de alcantarillado denominadas “Tramo 1” y “Tramo 2” que se han caracterizado por presentar actividades de mantenimiento constantes. Los caudales utilizados para la evaluación de los parámetros de operación de la red, son los caudales máximos y promedio obtenidos de los resultados de escorrentía del modelo ya calibrado, que están señalados en la Tabla 25. Las características de las redes, en cuanto a topografía, dimensiones, tipo y material de los conductos se obtuvieron del catastro de redes de EMCALI EICE ESP.

En el Tramo 1, tanto para el caudal máximo como el promedio se presentan valores de fuerza tractiva y velocidad de flujo menores a los recomendados, ya que según el manual de diseño de EMCALI, la fuerza tractiva deberá ser mayor a 0.12 kg/m^2 y la velocidad de flujo mayor a 0.6 m/s . Para el caudal mínimo, es decir 60 l/s también se presentan valores

de fuerza tractiva inferiores al recomendado tanto en los conductos comprendidos entre las cámaras 1 a 2 como 2 a 3.

En el Tramo 2, tanto para el caudal máximo como promedio se presentan valores de fuerza tractiva y velocidad de flujo aceptables en comparación con lo recomendado según el manual de diseño de EMCALI. Sin embargo, al evaluar el caudal mínimo de 60 l/s, se observa una reducción significativa de la fuerza tractiva para dicha condición de operación.

Tabla 27. Chequeo de parámetros de operación para los tramos 1 y 2

Variable	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3
Tramo	1			2		
Código Cámara	1810PC0143	1810PC0142	1810PC0151	1790CC0400	1790CC0150	1790SC0152
Distancia	88.41		73.27	211.91		154.54
Cota batea	974.55	974.52	974.39	974.28	961.01	960.65
Pendiente	0.03%		0.15%		0.17%	
Caudal Máximo (L/s)	755			3843		
Fuerza tractiva (Kg/m²)	0.11		0.42		0.78	
Velocidad (m/s)	0.82		1.46		2.44	
Caudal Medio (L/s)	195			719		
Fuerza tractiva (Kg/m²)	0.07		0.23		0.46	
Velocidad (m/s)	0.55		0.98		1.49	
Caudal Mínimo (L/s)	60					
Fuerza tractiva (Kg/m²)	0.04		0.14		0.69	
Velocidad (m/s)	0.39		0.72		0.89	

Lo anterior, soporta la condición de vulnerabilidad de la infraestructura en los puntos señalados y sustenta la posibilidad de colmatación de los tramos, debido a las bajas velocidades de flujo y esfuerzo cortante, además es relevante considerar el impacto del aporte de sedimento que se genera por la resuspensión del material en los desarenadores debido a los flujos que superan los caudales de diseño, como es el caso de los desarenadores Nápoles y Limonar Autopista Sur.

5.3 RESULTADOS PRODUCCIÓN SEDIMENTOS

A continuación, se presenta de manera gráfica el aporte que las microcuencas generan en términos de escorrentía superficial con el objetivo de observar que las zonas que presentan mayor aporte de caudal también son las que generan mayor cantidad de sedimento.

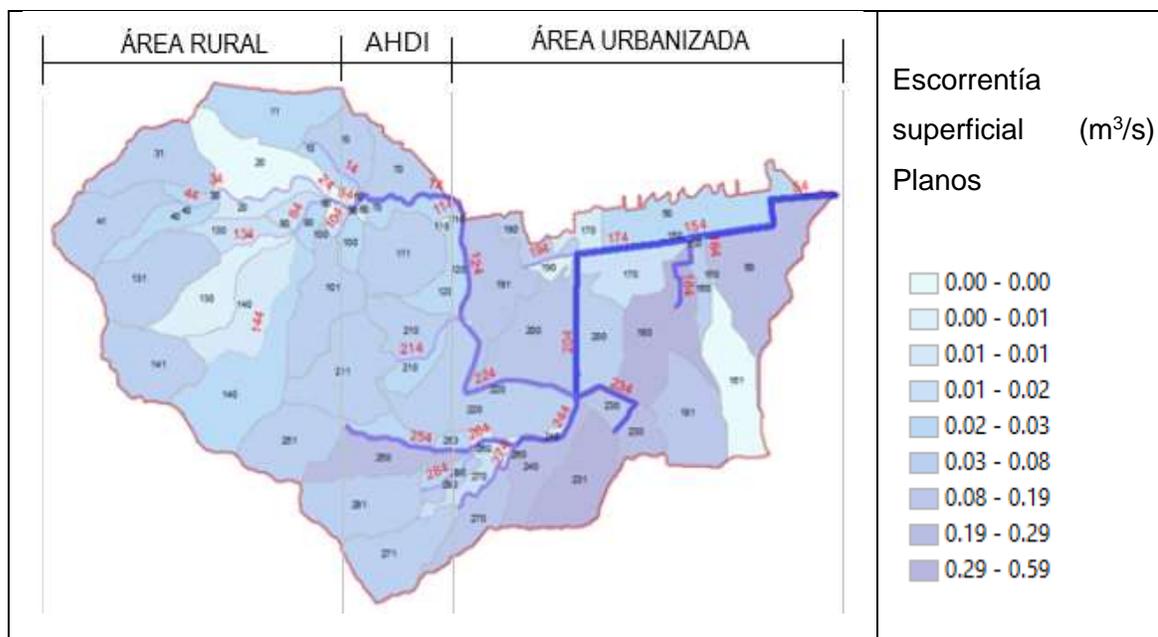


Figura 46. Representación gráfica de KINEROS2 del caudal generado en el evento de precipitación del día 8/10/2018 en los planos y canales de la cuenca de estudio

En la Figura 47 se muestra el aporte de sedimento de cada microcuenca para el evento de precipitación del día 8 de octubre del 2018, categorizado por rangos que señalan la tasa de producción de sedimento por unidad de área. De dichos resultados se concluye que las áreas donde se produce la mayor cantidad de sedimento son dos: 1) la zona de ladera con mayor concentración de asentamientos humanos de desarrollo incompleto – AHDI y 2) las zonas de extracción minera, las que se detallan mejor en la Figura 47-abajo.

Es decir que, de acuerdo con los resultados las mayores escorrentías superficiales se presentan en las zonas con altos niveles de impermeabilización que corresponden a las zonas urbanizadas, apreciándose diferencias notables entre los valores de caudal generados en el área rural y las áreas ocupadas por los asentamientos humanos de desarrollo incompleto – AHDI.

Las áreas asociadas a los AHDI corresponden al 29 % del área de la cuenca, entre tanto alrededor del 35 % del área total (parte alta de la cuenca) es susceptible de ser ocupada por asentamientos de carácter irregular. A partir de estos resultados se puede concluir que el cambio en los usos del suelo que la expansión demográfica (AHDI) de la zona está generando, y que es una condición generalizada sobre el área de ladera de la ciudad, tiene como consecuencia una generación significativa de sedimentos, los cuales, son direccionados hacia la infraestructura del sistema de drenaje.

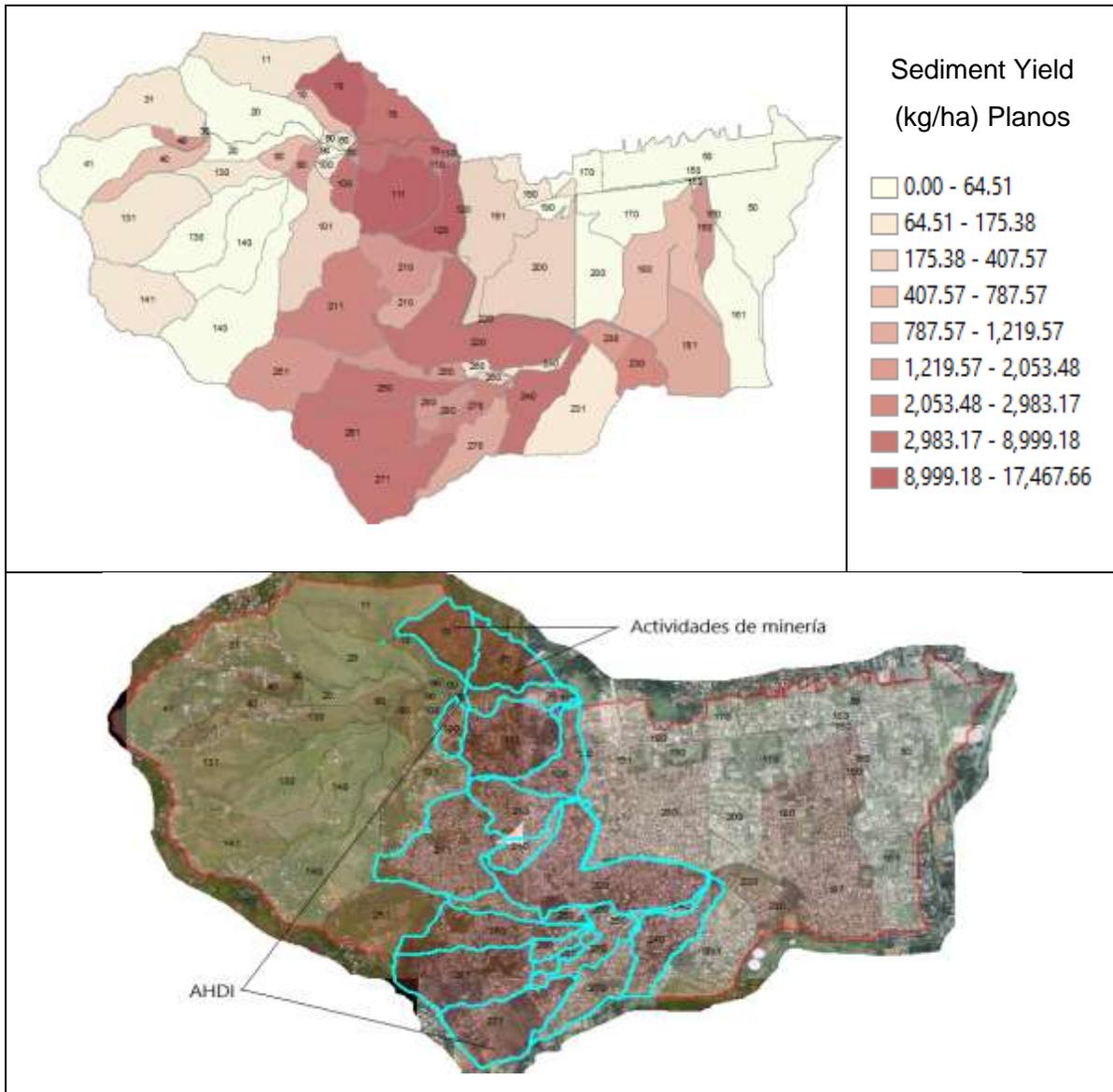


Figura 47. Representación gráfica de KINEROS 2 de la cantidad de sedimento producido en el evento de precipitación del día 8/10/2018 en los planos (arriba) y detalle de las áreas de mayor producción (abajo)

Ahora, se muestra con mayor detalle los elementos canales y la producción estos (Figura 48), en la que se observan dos zonas de alta producción, la primera en la parte norte de la cuenca, es decir los elementos identificados con los números 2, 7 y 8. Los que tributan al desarenador Alto Refugio. Y por otro en el área sur los canales identificados con los números 24 a 28 los que tributan al desarenador Nápoles. Igual sucede con los elementos tipo planos que aportan gran cantidad de sedimentos a los mismos desarenadores como se observó en la Figura 46 y Figura 47.

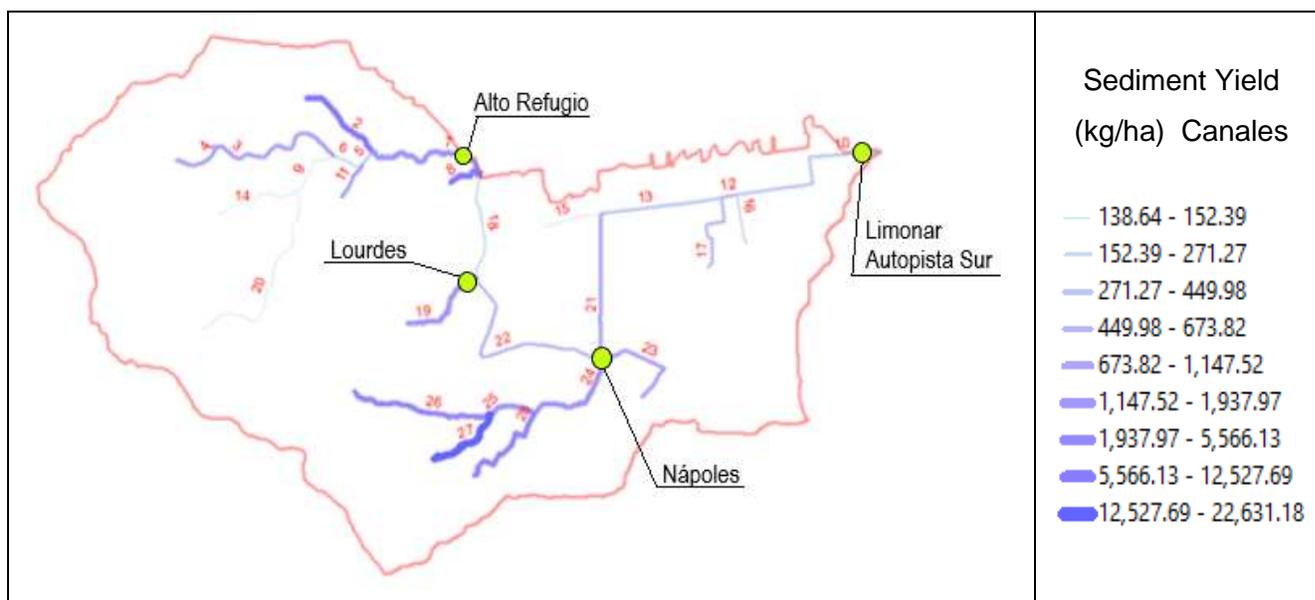


Figura 48. Representación gráfica de KINEROS 2 de la cantidad de sedimento producido y transportado por los canales en el evento de precipitación del día 8/10/2018

Por otro lado, los flujos de sedimento que no son retenidos por los desarenadores Alto Refugio y Lourdes son transportados aguas abajo mediante el canal 22. En este canal se ubica el tramo de red denominado "Tramo No.1" como está señalado en la Tabla 27 presentan pendientes bajas que posibilitan el depósito de sedimento.

Por lo anteriormente expuesto, se considera relevante plantear alternativas tendientes a la protección de estas zonas susceptibles de ser ocupadas por AHDI, con el objetivo de evitar cambios de uso del suelo no planificados, que como ha sido señalado producen un impacto significativo en la generación de sedimento.

5.4 ANÁLISIS DE LA DEPOSITACIÓN DE SEDIMENTOS

Los resultados del ejercicio de modelación sugieren que, en los canales principales, que direccionan los flujos hacia los desarenadores, se presentan cantidades significativas de sedimentos depositados, estas cantidades pueden generar diferencias para el ajuste de los balances de masa en el sistema de drenaje en periodos de precipitaciones continuas. Es decir, que se presentan tramos en la red de alcantarillado que actúan como zonas de almacenamiento de sedimentos, como ya se mencionó previamente en el capítulo 5.2.

A partir de los resultados de la modelación, se consolidaron los datos de la cantidad volumétrica y peso de sedimento depositado en los canales tributarios a cada estructura retenedora de sólidos, lo que se presenta en las Tabla 28 y Tabla 29 para los eventos de precipitación utilizados en el proceso de calibración y validación respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, KINEROS 2 genera como resultado un balance de sedimentos en cada elemento de la esquematización del sistema, este balance cuenta con cantidades de sedimentos de entrada, depositados y en la salida, además de una estimación de pérdidas. El valor de la salida de estos balances de sedimentos que el modelo ejecuta en cada canal, se tomó como la cantidad de sedimento que ingresa hacia los desarenadores, según su ubicación en la cuenca de estudio.

Entre tanto, la cantidad de sedimento depositado en el canal, el modelo la considera como la fracción de sedimento que se ha decantado en los tramos del canal. De otra manera, se refiere a la cantidad de sedimentos depositados debido a las condiciones de topografía de los tramos de red que posibilitan la acumulación de sedimento en el alcantarillado. La cantidad de sedimento acumulado en los canales tributarios a los desarenadores de la cuenca de estudio se muestran en las siguientes tablas.

La información consignada muestra que los eventos con mayor cantidad de precipitación representados en valores entre 19.1 a 28.1 mm/h, generan una significativa cantidad de sedimentos que se deposita en las redes tributarias a los canales Nápoles y Limonar. Las cantidades de sedimento depositadas en las redes, específicamente las tributarias al desarenador Nápoles, son mayores a las cantidades de sedimento que se almacenan en dichas estructuras retenedoras de sólidos.

Tabla 28. Cantidad de sedimento depositado en los canales tributarios a cada desarenador para los eventos de precipitación utilizados en la calibración del modelo

Desarenador	ID_Canal	Variable	Eventos utilizados para la calibración						
			10/10/2015	16/10/2015	7/11/2015	6/03/2016	15/03/2016	17/03/2016	4/03/2016
Dedarenador	ID_Canal	Precipitación total (mm)	24.10	19.10	19.10	19.40	21.80	22.80	28.10
		Duración (h)	4.17	1.50	2.17	2.00	2.33	1.67	0.83
		Intensidad promedio (mm/h)	5.56	11.46	8.14	8.95	8.72	12.44	28.10
ALTO REFUGIO	7	Peso (kg)	Sin dato estimado	532.00	Sin dato estimado	-			
		Volumen estimado por evento (m3)		0.20					
		Volumen mensual (m3)		0.20					
LOURDES	19	Peso (kg)	Sin dato estimado-			1.00	-		
		Volumen estimado por evento (m3)				0.0002			
		Volumen mensual (m3)				0.002			
NÁPOLES	22-23-24	Peso (kg)	100,514	49,909	23,598	8,884	88,744	203,172	348,384
		Volumen estimado por evento (m3)	37.9	18.8	8.9	3.35	33.5	76.7	131.5
		Volumen mensual (m3)	65.6			245.05			
LIMONAR AUTOPISTA SUR	10	Peso (kg)	4,042	2,280	1,607	443.5	4,252	3,479	4,199
		Volumen estimado por evento (m3)	1.50	0.90	0.6	0.17	1.60	1.30	1.60
		Volumen mensual (m3)	3.0			4.7			

Tabla 29. Cantidad de sedimento depositado en los canales tributarios a cada desarenador para los eventos de precipitación utilizados en la validación del modelo.

Desarenador	ID_Canal	Variable	Eventos utilizados para la validación				
			5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
Dedarenador	ID_Canal	Precipitación total (mm)	17.40	21.90	21.50	26.40	41.60
		Duración (h)	1.00	1.00	1.33	1.67	7.17
		Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.40	5.67
ALTO REFUGIO	7	Peso (kg)	-			-	
		Volumen estimado por evento (m3)	Sin dato estimado			Sin dato estimado	
		Volumen mensual (m3)	-			--	
LOURDES	19	Peso (kg)	-			-	
		Volumen estimado por evento (m3)	Sin dato estimado			Sin dato estimado	
		Volumen mensual (m3)	-			-	
NÁPOLES	22-23-24	Peso (kg)	119,389	221,225	153,318	361,257	517,933
		Volumen estimado por evento (m3)	45.1	83.5	57.9	136.3	195.4
		Volumen mensual (m3)	186.5				
LIMONAR AUTOPISTA SUR	10	Peso (kg)	2,243	2,571	2,967	2,648	5,777
		Volumen estimado por evento (m3)	0.8	1.0	1.1	1.0	2.2
		Volumen mensual (m3)	2.9				

En las Tabla 28 y Tabla 29 no se relaciona información en los desarenadores Alto Refugio y Lourdes, lo cual, se debe a que el modelo no estima ninguna cantidad de sedimento depositado para los canales tributarios a los desarenadores señalados.

Los depósitos de sedimentos se presentaron en la zona de menores pendientes del sistema de drenaje, siendo los canales tributarios a los desarenadores Alto Nápoles y Limonar los tramos que presentaron mayor acumulación de sedimentos. El tramo No. 1 del análisis hidráulico de la infraestructura se encuentra en el área tributaria al desarenador Nápoles, donde, se ha demostrado, que se depositan cantidades de sedimento que superan la capacidad de almacenamiento tanto del desarenador de Nápoles como el de Limonar Autopista Sur.

Las cantidades de sedimento depositadas suponen un riesgo para la gestión de los sedimentos en la cuenca, dado que, en periodos de precipitaciones continuas se puede presentar arrastre del material hacia las estructuras de retención generando reducción en la capacidad de almacenamiento, y transporte de estos sedimentos hacia la infraestructura aguas abajo del desarenador Limonar.

Análisis de la cantidad de sedimento estimada por desarenador

A continuación, se muestra una categorización de los resultados en función del volumen de sedimento generado en relación con las variables de precipitación magnitud total (mm), Duración (h) e Intensidad promedio (mm/h), ya que, de esta manera es posible agrupar los resultados de cantidad de sedimento generada por variables de magnitudes similares. El objetivo de la categorización consistió es identificar las condiciones de un evento de precipitación, que generen un impacto significativo en la generación de sedimentos y se simplifique la descripción de la respuesta de la cuenca en cuanto a la producción de sedimentos asociada a las unidades de retención de sólidos (desarenadores) distribuidos en el área de estudio.

Para este análisis se consolidaron los resultados de los datos de precipitación utilizados tanto para la calibración como para la validación de modelo. Teniendo en cuenta que cada desarenador presenta un comportamiento diferente en cuanto a la producción de sedimento

y que este a su vez depende de las características de los eventos de precipitación en cuanto a cantidad, duración e intensidad.

Como se mencionó cada evento de precipitación genera una cantidad de sedimento diferente en las microcuencas cuencas (planos) tributarios a cada desarenador, lo cual, se explica porque cada área tributaria tiene características de suelos, coberturas y pendientes distintas, lo que promueve una respuesta diferente para cada evento de precipitación. Con la intención de establecer las características de un evento de precipitación que impacte significativamente, en términos de cantidad de sedimento generado en cada desarenador, se clasificaron los resultados de la modelación por la cantidad de sedimento que se genera en las áreas tributarias de cada sedimentador.

Para los desarenadores Alto refugio y Lourdes se listaron en primer lugar aquellas precipitaciones que generaron un volumen de sedimento que ocupó del 28 al 30 % de la capacidad de almacenamiento de las estructuras. Y para los desarenadores Nápoles y Limonar Autopista Sur, se listó inicialmente la cantidad de sedimento generada que superó la capacidad de almacenamiento de estas unidades.

De manera general, los eventos de precipitación que generaron una mayor cantidad de sedimento, están asociados a cantidades de precipitación del orden de 20 a 32 mm. Al comparar estos datos con el análisis estadístico que se referencia en la Tabla 6, es posible afirmar que el 25 % de los datos registrados para el periodo 2014 a 2019, presentaron magnitudes de precipitación superiores al rango señalado. Por lo cual, cobra especial relevancia la descripción de los eventos de precipitación en función de la cantidad de sedimento generada. En las siguientes tablas, se señala en color gris las precipitaciones que generaron la mayor cantidad de sedimento.

En la Tabla 30 se presentan los resultados de producción de sedimentos para todos los eventos simulados para el desarenador Alto Refugio. Se observa que las mayores cantidades de sedimentos fueron superiores a los 100 m³ los que fueron generados por eventos con características muy disímiles entre sí, es decir no existe una característica de la precipitación que por sí sola explique dicha producción. De dichos eventos se observa que el evento del 4/03/2016 genera una producción considerable, correspondiente a más del doble de lo generado en los otros eventos y se destaca que dicho evento fue no sólo el

más intenso registrado sino de una intensidad considerable. Ese evento generó sedimentos que representarían el 73 % de la capacidad del desarenador. Por otro lado, el segundo evento que causó mayor producción de sedimentos (correspondiente al 19/09/2019) fue el de mayor magnitud registrada, correspondiente a casi el doble de la mayoría. Por último, el tercer evento resaltado en la Tabla 30 corresponde a un evento de magnitud, duración e intensidad dentro de la media del resto de eventos. Teniendo en cuenta que la capacidad de este desarenador es de 375 m³ se puede inferir un evento de gran intensidad (~30mm/h) o varios eventos de magnitud aproximada a los 20 mm (alrededor de 4) pueden podrían ocupar la capacidad del desarenador, si no se hacen mantenimientos regulares.

Tabla 30. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el Desarenador Alto Refugio

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm/h)	Volumen de sólidos (m ³)
4/03/2016	28.1	0.8	28.1	274.0
19/09/2019	41.6	7.2	5.7	160.5
8/10/2018	26.4	1.7	14.4	105.3
8/05/2017	21.9	1.0	18.8	93.5
10/10/2015	24.1	4.2	5.6	84.5
12/05/2017	21.5	1.3	14.3	55.1
5/05/2017	17.4	1.0	14.9	55.0
17/03/2016	22.8	1.7	12.4	49.1
16/10/2015	19.1	1.5	11.5	30.5
15/03/2016	21.8	2.3	8.7	23.9
7/11/2015	19.1	2.2	8.1	8.6
6/03/2016	19.4	2.0	9.0	1.5

El área tributaria al desarenador Lourdes representa solamente un 5 % del área total de la cuenca, es decir, que es la menor de todas las áreas tributarias de la cuenca de estudio. En la Tabla 31 se presentan los resultados de sedimentos generados para los mismos eventos de precipitación considerados desde el principio, y nuevamente organizados de mayor a menor volumen de sedimentos generados.

El evento que generó la mayor cantidad de sedimentos fue el del 19/09/2019 que tuvo una magnitud muy superior al resto de eventos. Cabe destacar que dicho evento tuvo una duración superior a 7 horas, y se observa además que la cantidad de sedimento generada es cercana a la cantidad registrada para el desarenador Alto refugio para el mismo evento,

el cual, tiene un área tributaria del 37 % del área total. Lo anterior se justifica por el impacto significativo que tienen los AHDI, que ocasionaron retiro de la cobertura vegetal en dicha área, como ya se mencionó previamente.

En este desarenador se observa un cambio drástico en la producción a partir del tercer evento porque se pasa de 69.1 a 37.3 m³ es decir casi la mitad. También se observa que en esta área el orden de producción de sedimentos está casi pareada con el orden de los eventos por magnitud, es decir que es un factor importante en esta área, lo que se puede atribuir al alto nivel de impermeabilización del área.

Tabla 31. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Lourdes

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm/h)	Volumen de sólidos (m ³)
19/09/2019	41.6	7.17	5.67	104.7
4/03/2016	28.1	0.83	28.10	93.1
8/10/2018	26.4	1.67	14.40	69.1
8/05/2017	21.9	1.00	18.77	37.3
17/03/2016	22.8	1.67	12.44	30.9
12/05/2017	21.5	1.33	14.33	23.0
10/10/2015	24.1	4.17	5.56	19.1
5/05/2017	17.4	1.00	14.91	14.5
15/03/2016	21.8	2.33	8.72	10.5
16/10/2015	19.1	1.50	11.46	5.5
7/11/2015	19.1	2.17	8.14	1.7
6/03/2016	19.4	2.00	8.95	0.1

Por su parte en el desarenador Nápoles el resultado es el mismo que en Lourdes (Tabla 32), es decir, la mayor cantidad de sedimentos depositados se generó por un evento de duración superior a las 7 horas y magnitud considerable (el evento del 19/09/2019). En esta área se destaca que los primeros tres eventos de la lista producen cantidades de sedimentos muy superiores (aproximadamente del doble del que le sigue) al resto, del orden de 137 m³ o superior, lo que representa tres o cuatro veces la capacidad volumétrica del desarenador (50 m³), de hecho, esto sucede en 7 de los eventos de precipitación. En este desarenador los eventos ordenados por volumen de sedimentos generados se corresponden casi que totalmente con el orden de magnitud de los eventos.

Tabla 32. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Nápoles.

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm/h)	Volumen de sólidos (m ³)
19/09/2019	41.6	7.17	5.67	216.6
4/03/2016	28.1	0.83	28.10	155.3
8/10/2018	26.4	1.67	14.40	137.4
17/03/2016	22.8	1.67	12.44	81.2
10/10/2015	24.1	4.17	5.56	75.4
8/05/2017	21.9	1.00	18.77	67.4
12/05/2017	21.5	1.33	14.33	50.5
5/05/2017	17.4	1.00	14.91	33.6
15/03/2016	21.8	2.33	8.72	27.3
16/10/2015	19.1	1.50	11.46	15.8
7/11/2015	19.1	2.17	8.14	8.9
6/03/2016	19.4	2.00	8.95	3.4

Los resultados obtenidos para el desarenador Limonar Autopista Sur (Tabla 33) permiten afirmar que precipitaciones con duración de hasta 7 horas y magnitud considerable, generan una cantidad de sedimento significativa, que sobrepasa la capacidad de almacenamiento del desarenador (50 m³), y bajo este escenario es posible que el sedimento pase hacia la infraestructura aguas abajo del desarenador Limonar.

Tabla 33. Producción de sedimentos simulados para todos los eventos considerados en el desarenador Limonar Autopista Sur

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm/h)	Volumen de sólidos (m ³)
19/09/2019	41.6	7.17	5.67	132.70
10/10/2015	24.1	4.17	5.56	48.20
8/10/2018	26.4	1.67	14.4	40.00
17/03/2016	22.8	1.67	12.44	20.30
15/03/2016	21.8	2.33	8.72	13.50
12/05/2017	21.5	1.33	14.33	5.40
8/05/2017	21.9	1.00	18.77	4.20
4/03/2016	28.1	0.83	28.10	4.10
16/10/2015	19.1	1.50	11.46	0.934
7/11/2015	19.1	2.17	8.14	0.704
5/05/2017	17.4	1.00	14.91	0.1
6/03/2016	19.4	2.00	8.95	0.0001

A partir de las tablas anteriores se puede concluir que el mayor volumen de sedimentos para los eventos evaluados se produce en las áreas tributarias a los desarenadores Alto Refugio y Nápoles con valores que pueden ser superiores a los 200 m³ en un mes. En el caso de Alto Refugio la mayor depositación fue causada por un evento muy intenso, y el segundo mayor evento de depositación fue causado por una precipitación considerablemente larga (> 7 horas) y de magnitud muy alta lo que indica que tanto la intensidad como la duración influyen en la sedimentación en ese desarenador.

Por el contrario, para el resto de desarenadores la intensidad no parece influir tanto como la magnitud del evento, ya que se puede concluir que a mayor magnitud mayor es la producción de sedimentos. También se observa que en el desarenador Nápoles se supera la capacidad para muchos eventos, lo que refuerza el hecho de que el sistema utiliza los canales posteriores para acumular dichos sedimentos.

Como se señaló en el ítem de 4.2 de simulación hidrosedimentológica, el presente estudio muestra la evaluación de un escenario crítico, donde, se evalúa la respuesta del sistema de drenaje ante una inadecuada operación de las estructuras de desarenado, para la situación en la que a estas unidades no se les haya efectuado el mantenimiento requerido.

Es importante señalar que este es un escenario que se ha evidenciado en el desarrollo de la prestación del servicio, ocasionado por la baja disponibilidad de equipos para el retiro de sedimentos lo que genera atrasos en los periodos de mantenimiento. Este escenario ha sido una condición que se ha registrado en la prestación del servicio, y que afecta el funcionamiento del sistema de drenaje sur de la ciudad de Cali, específicamente en los componentes y tramo de alcantarillado ubicado entre la carrera 68 a 65 de la Avenida Autopista sur, donde se han presentado obstrucciones por acumulación de sedimento.

La información anterior es de vital relevancia para la correlación de eventos de precipitación y la operación del sistema de drenaje, siendo un insumo importante para el establecimiento de alertas que la empresa de servicios públicos deberá atender para la adecuada gestión operativa del sistema.

El comportamiento de las variables precipitación (mm) y duración (h) en relación con el incremento del volumen de sedimento generado se muestra en la Figura 49. La gráfica de

superficie muestra la respuesta de la cuenca en cuanto a la producción de sedimento y la relación directa de las variables. Se concluye que, la empresa prestadora de servicios deberá atender con diligencia la respuesta de eventos de precipitación con precipitación superior a 20 mm ya que es la característica dominante en la generación. Sin embargo, en el caso de Alto Refugio también se deben revisar aquellos eventos de gran intensidad.

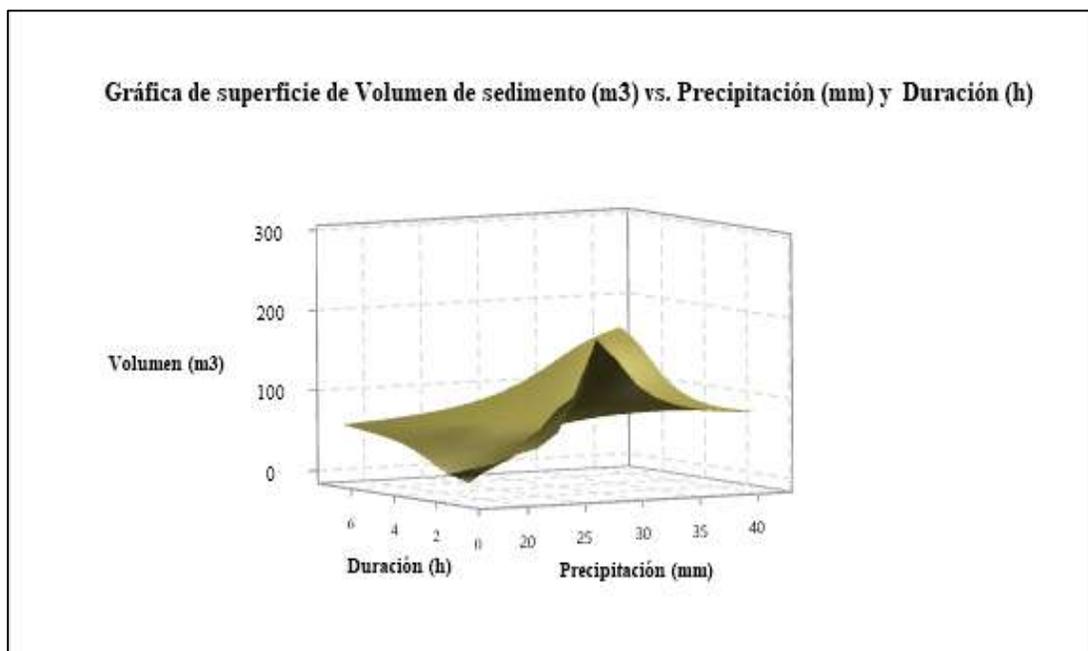


Figura 49. Gráfica de superficie, variables volumen (m³), precipitación (mm) y Duración (h)

Como se ha mencionado el desarenador Nápoles presenta la mayor condición de presión sobre su operación, ya que al no contar con la capacidad para almacenar los sedimentos estos se depositan en el canal contiguo al desarenador. Esta condición fue la del escenario de modelación, en el cual se contempla que hay una ocupación total en la capacidad de los desarenadores Alto Refugio y Lourdes, lo que generaría un volumen de sedimento a la altura del desarenador Nápoles de tal magnitud que supera tres o cuatro veces la capacidad de diseño de esta unidad.

A continuación, se muestra el balance general de la cantidad de sedimento generado en la cuenca de estudio, comportamiento asociado a los eventos de precipitación utilizados en la calibración y en la validación del modelo.

Tabla 34. Balance de sedimentos generados a partir de los datos de precipitación utilizados en la calibración del modelo

Variable	Eventos usados para la calibración						
	10/10/2015	16/10/2015	7/11/2015	6/03/2016	15/03/2016	17/03/2016	4/03/2016
Precipitación total (mm)	24.10	19.10	19.10	19.40	21.80	22.8	28.1
Duración (h)	4.17	1.50	2.17	2.00	2.33	1.67	0.83
Intensidad promedio (mm/h)	5.56	11.46	8.14	8.95	8.72	12.44	28.1
Volumen total de sedimento (m³)	189.55	76.30	31.78	14.75	73.78	202.32	748.50
	297.63			1039.35			
Volumen total depositado en canales (redes) (m³)	39.40	19.90	9.50	3.52	35.10	78.00	133.10
	68.80			249.72			
Volumen total retenido en desarenadores (m³)	130.00			388.50			
Volumen excedente en el sistema (m³)	98.83			401.13			

Como se ha mencionado este análisis agrupa la respuesta de los eventos de precipitación que representa la cantidad de sedimento retirada de los desarenadores, ya que, los registros se suministraron en mensualidades.

Se debe señalar nuevamente que el escenario del modelo no contempla puntos de almacenamiento que actúen como desarenadores, por tanto, el flujo de sedimentos se transporta hasta el cierre de la cuenca excepto el volumen que queda depositado en los canales. Por lo anterior, el balance de sedimento, se realizó de manera general, bajo tres variables principales, las cuales, se analizaron de la siguiente manera: al volumen total de sedimento generado se restó el volumen depositado y el volumen retenido en los desarenadores.

Esto dio como resultado un volumen excedente de sedimento, el cual, si es mayor que el volumen de los sedimentadores sobre los que no se tiene registro de mantenimiento, se asumirá que es un volumen de sedimento que se transfiere a la infraestructura de drenaje aguas abajo del cierre de la cuenca.

La cantidad de sedimento retirado para los eventos de precipitación ocurridos en las fechas 10/10/2015, 16/10/2015 y 1/11/2015 obedece a la sumatoria del volumen retirado de sedimentos de los desarenadores Lourdes y Nápoles, al no presentarse información sobre el estado de la capacidad de los desarenadores Alto Refugio y Limonar, y al comparar el volumen excedente de 98.83 m³ con la capacidad de los dos desarenadores de 425 m³, es posible inferir que este volumen pudo haber sido almacenado en estas dos unidades, asumiendo que contaban con la capacidad.

Por el contrario, para los eventos de precipitación ocurridos en las fechas 4/03/2016, 6/03/2016, 15/03/2016 y 17/06/2016 se estimó un volumen de sedimento igual a 1039.35 m³ volumen que supera la capacidad instalada de los desarenadores igual a 707 m³.

De otro lado, para estas precipitaciones se obtuvo un volumen excedente de 401.13 m³ que al compararlo con la capacidad de los desarenadores que no presentaron registro de mantenimiento (Lourdes y Nápoles) de 282 m³, como mínimo la diferencia entre estos dos valores de 119.13 m³ se estaría direccionando hacia la infraestructura del sistema de drenaje agua abajo del cierre de la cuenca. Lo que podría producir colmataciones el tramo 2, punto que fue mencionado en el ítem 5.2 titulado “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE SEDIMENTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA RETENEDORA DE SÓLIDOS Y CONSECUENTE RESPUESTA CON LAS UNIDADES POSTERIORES”

Tabla 35. Balance de sedimentos generados a partir de los datos de precipitación utilizados en la validación del modelo

Variable	Eventos usados para la validación				
	5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
Precipitación total (mm)	17.4	21.9	21.5	26.4	41.6
Duración (h)	1	1	1.33	1.67	7.17
Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.4	5.67
Volumen total de sedimento (m3)	161.70	271.76	180.31	387.88	549.72
	613.77				
Volumen total depositado en canales (redes) (m3)	45.90	84.50	59.00	137.30	197.60
	189.40				
Volumen total Retenido en desarenadores (m3)	75			251	351
Volumen excedente en el sistema (m3)	349.37			-0.42	1.12

La cantidad de sedimento retirado para los eventos de precipitación ocurridos en las fechas 5/05/2017, 8/05/2017 y 12/05/2017 obedece al volumen retirado de sedimentos del desarenadores Nápoles, al no presentarse información sobre el estado de la capacidad de los desarenadores Alto Refugio, Lourdes y Limonar, y al comparar el volumen excedente de 349.37 m³ con la capacidad de los dos desarenadores de 657 m³, es posible inferir que este volumen pudo haber sido almacenado en estas unidades, asumiendo que contaran con la capacidad suficiente.

La precipitación del día 8/10/2018 generó un volumen de sedimento igual a 387.88 m³, la cantidad de sedimento retenida en los desarenadores de 251 m³ se refiere al volumen extraído de los desarenadores Alto Refugio, Nápoles y Limonar, al tener presente en el balance la cantidad de sedimento depositada, es posible afirmar que este actúa como otro punto de control de sedimentos en sistema, siendo de relevancia generar acciones para el mantenimiento y extracción de estos sedimentos con regularidad.

El volumen excedente para el balance de este evento de precipitación demuestra que el contar con las capacidades optimas de los desarenadores permite controlar los flujos de sedimento generados. Sin embargo, es importante señalar que los sedimentos depositados presentan un nivel de incertidumbre significativo para la operación del sistema, lo que sustenta la necesidad de ver estos puntos como unidades del sistema que requieren de un mantenimiento exhaustivo.

La cantidad de sedimento retirado para el evento de precipitación del día 19/09/2019 obedece a la sumatoria del volumen retirado de sedimentos de los desarenadores Alto Refugio y Nápoles, al no presentarse información sobre el estado de la capacidad de los desarenadores Lourdes y Limonar, y al comparar el volumen excedente de 1.12 m³ con la capacidad de los dos desarenadores de 282 m³, es posible inferir que este volumen pudo haber sido almacenado en estas dos unidades, asumiendo que contaran con la capacidad suficiente.

5.5 PLANTEAR Y ANALIZAR ESCENARIOS PARA EL CONTROL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS A NIVEL DE CUENCA

Las alternativas de solución se proponen teniendo en cuenta los dos aspectos críticos encontrados: lo primero es la zona de la parte norte, es decir las zonas de extracción minera

y las AHDI tienen un impacto negativo ya que incrementan la producción de sedimentos. La alternativa de solución para esta primera situación crítica se propuso en base a análisis de documentos oficiales y proyectos de gestión propuestos por la alcaldía directamente sobre las zonas de extracción minera, es decir se simula un proyecto que es altamente factible.

Sobre los AHDI, no se proponen soluciones específicas ya que, la escala de la esquematización del modelo no permite la evaluación de acciones distintas a la modificación de parámetros generales de cobertura y usos del suelo para extensas, lo que infiere la reubicación de viviendas consolidadas, y esta no es considerada una alternativa técnico-económica viable para la ciudad. El segundo aspecto crítico según las simulaciones es la falta de capacidad del desarenador Nápoles, para lo que se propone como solución la creación de dos nuevas estructuras de retención.

Alternativa 1, cambiar las zonas de extracción minera

Como fue señalado en el ítem 4.1.3, tanto la administración de la ciudad de Cali como la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, han ejecutado actividades para la recuperación de la cobertura vegetal de la zona de extracción minera, hoy considerada ecoparque “cerro de la bandera”. Esta opción se determinó como la primera alternativa para ser evaluada en el presente estudio.

Con el objetivo de establecer el impacto que produciría en la generación de sedimentos, el adelantar acciones en función de modificar las condiciones de cobertura del suelo, se corrió el modelo, modificando los parámetros asociados al uso del suelo de las áreas identificadas como zonas de extracción minera, como se muestra en la Figura 50, estas corresponden a las zonas que referencian actividades de extracción minera.

Como fue mencionado las zonas ocupadas por las AHDI en la cuenca de estudio, conforman un área de alrededor del 29 % del total del área de la cuenca de estudio, en estas áreas la infraestructura residencial y de servicios presenta un grado de consolidación importante, por lo cual, no es posible proyectar como alternativa de control, la reubicación de las AHDI, con la intención de reducir el aporte de sedimento. De otro lado, la escala del modelo no permite hacer una discretización más específica sobre la cuenca de estudio, debido a, que la esquematización de la cuenca comprende únicamente planos (microcuencas) y canales principales (infraestructura de alcantarillado).

Para la zona de extracción minera se modificó el tipo de cobertura del suelo, al tipo “Herbazal Helechal”, este tipo de cobertura caracteriza las áreas altas de la cuenca, con una cobertura vegetal típica de la zona, y que, según los resultados del modelo, son las áreas que generan menor cantidad de sedimento, como se muestra en la siguiente figura.

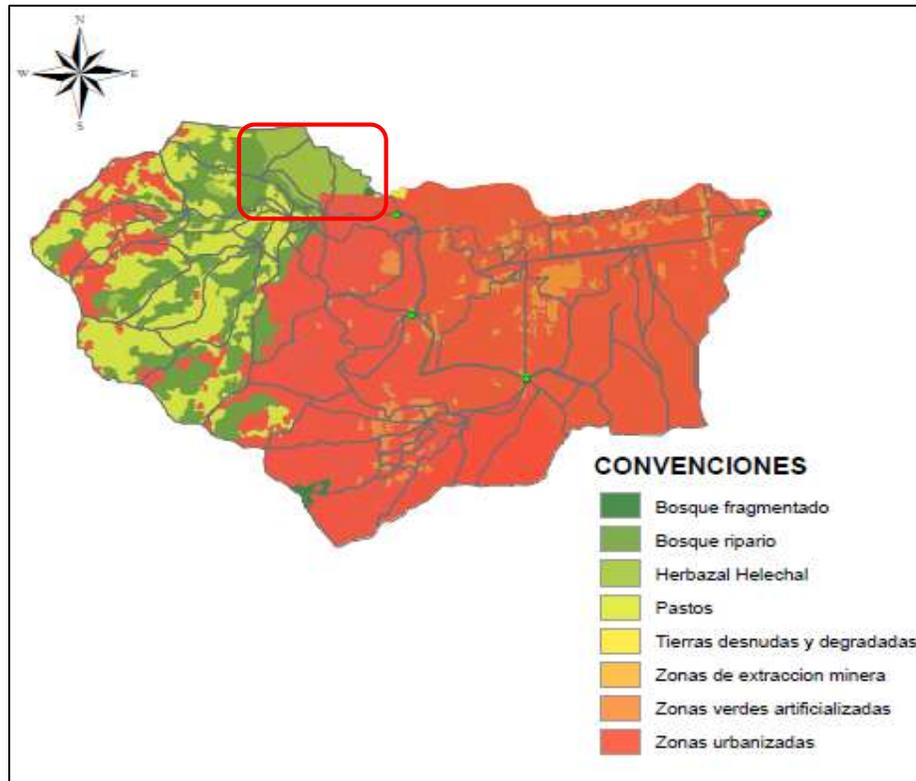


Figura 50. Modificación de la cobertura y usos del suelo de la cuenca de estudio

A continuación, se muestran los resultados del modelo, al modificar la cobertura del suelo en las áreas de extracción minera, las que se encuentran sólo en el área tributaria al desarenador Alto Refugio, por lo que los resultados hacen referencia, a la cantidad de sedimento que es transportada hacia el canal anterior al desarenador.

Tabla 36. Cantidad de sedimento generada al modificar el tipo de cobertura del suelo de las áreas de extracción minera

ID_Canal	Variable	Precipitación promedio mensual - máxima				
		5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
ID_Canal	Precipitación total (mm)	17.40	21.90	21.50	26.40	41.60
	Duración (h)	1.00	1.00	1.33	1.67	7.17
	Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.40	5.67
Escenario sin modificar los parámetros de cobertura del suelo						
7	Peso (kg)	145,624	247,895	146,062	279,155	425,241
	Volumen (m ³) estimado por evento	50.00	93.50	55.10	105.30	160.50
	Volumen mensual (m ³)	203.60				
Escenario con modificación de parámetros de cobertura del suelo						
7	Peso (kg)	22,230	35,449	4,998	94,165	166,332
	Volumen (m ³) estimado por evento	8.4	13.4	1.9	35.5	62.8
	Volumen mensual (m ³)	23.7				
Reducción en la generación de sedimento		88%			66%	61%

La información consolidada en la Tabla 36 muestra una reducción significativa en la cantidad de sedimento generada, bajo esta condición es posible garantizar una adecuada operación del sistema con la capacidad instalada en el punto del desarenador Alto refugio.

La Figura 51 muestra la respuesta de la microcuenca de la zona de extracción minera para el evento de precipitación que genera la mayor cantidad de sedimento, los resultados del modelo para la condición en la que la microcuenca conserva las características del suelo asociado a la actividad de extracción minera, muestran una tasa de generación de sedimento de hasta 195 kg/s de sedimento, además el inicio de la curva de generación ocurre en el minuto 240. En contraste la Tabla 36 muestra que al realizar un cambio en la cobertura del suelo, la tasa de generación de sedimento se reduce hasta 85 kg/s y la curva de generación inicia después del minuto 280, lo que demuestra un impacto significativo en la reducción de los sedimentos generados por la microcuenca.

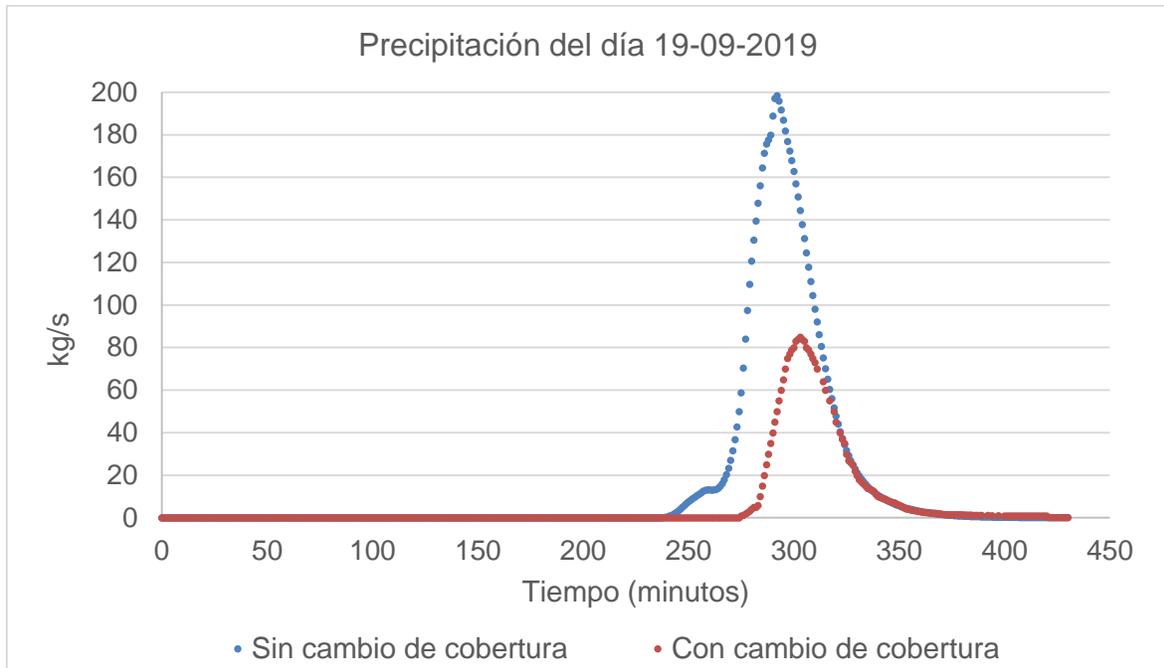


Figura 51. Resultado de la tasa de generación de sedimento en el canal recolector de la microcuenca del área de extracción minera, sin modificación y con modificación del tipo de cobertura del suelo

Al comparar los resultados de la generación de sedimento una vez implementadas las acciones para restauración y modificación de la cobertura del suelo de las zonas de extracción minera (Tabla 36), con los resultados obtenidos en la condición del suelo actual, se muestra que hay una reducción significativa en la generación de sedimentos, para los eventos de precipitación utilizados en la validación, se encontró una reducción de sedimento entre el 61 al 88 % para el área tributaria al desarenador Alto Refugio.

Alternativa 2, nuevo desarenador

Como segunda alternativa se establece mitigar el impacto sobre la capacidad del desarenador Nápoles, ya que, el área tributaria a esta unidad es la que genera mayor afectación por el cambio de uso del suelo debido a la ocupación de la zona por AHDI, y la significativa cantidad de sedimento generando, por lo que se propone la instalación de un nuevo desarenador. Para lo cual, se propone ampliar la capacidad de almacenamiento de sedimentos con dos nuevas estructuras ubicadas como se muestra en la siguiente figura.

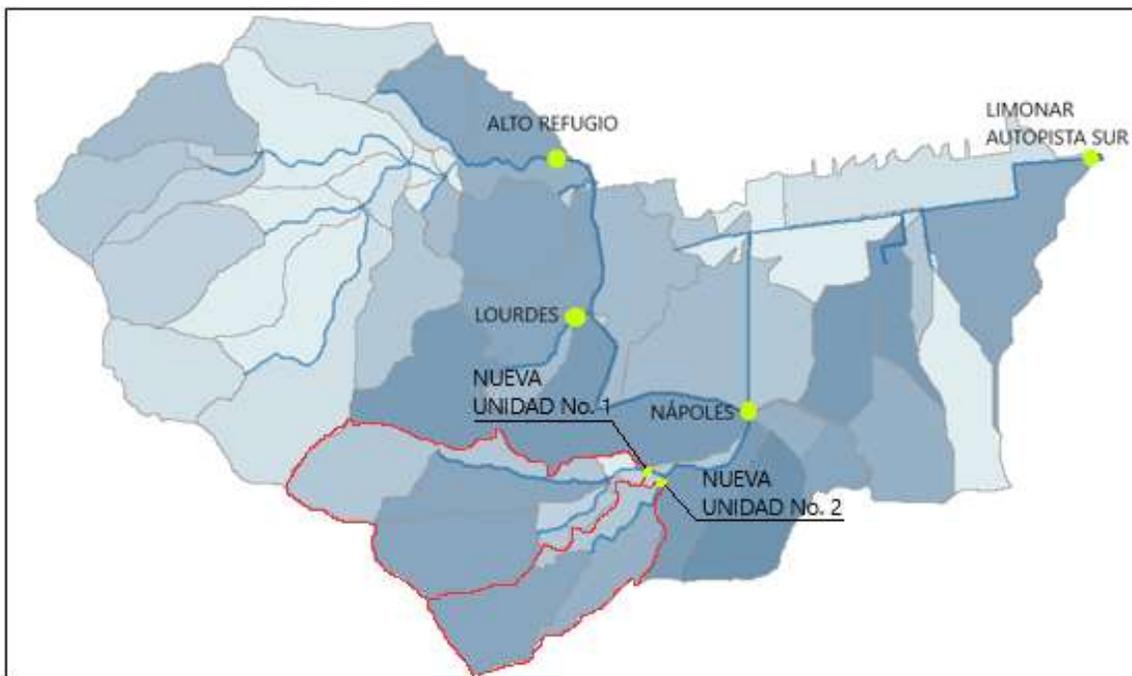


Figura 52. Área tributaria y ubicación de la nueva unidad de retención de sólidos propuesta

Como se ha mencionado, el sistema de drenaje de la cuenca de estudio para precipitaciones máximas mensuales genera una cantidad de sedimento significativa que supera la capacidad de almacenamiento del desarenador Nápoles (ver Tabla 18 y Tabla 19), con el objetivo de mitigar la condición en la cual los excedentes de sedimento que no son retenidos en el desarenador pasan hacia la infraestructura del sistema de alcantarillado, se propone dimensionar dos nuevos desarenadores para una condición crítica de máxima generación de sedimento.

Para establecer la capacidad de las nuevas unidades, se consolidaron los valores estimados de sedimento generado en las áreas tributarias a los nuevos desarenadores para los eventos de precipitación de la validación del modelo.

Tabla 37. Cantidad de sedimento aportada por el área tributaria asociada a la nueva unidad de retención de sólidos propuesta

ID_Canal	Variable	Precipitación promedio mensual - máxima				
		5/05/2017	8/05/2017	12/05/2017	8/10/2018	19/09/2019
ID_Canal	Precipitación total (mm)	17.4	21.9	21.5	26.4	41.6
	Duración (h)	1	1	1.33	1.67	7.17
	Intensidad promedio (mm/h)	14.91	18.77	14.33	14.4	5.67
Nueva Unidad No.1	Peso (kg)	54,406	107,504	69,522	171,636	230,653
	Volumen (m3)	20.53	40.57	26.23	64.77	87.04
	Volumen mensual (m3)	87.33				
Nueva Unidad No.2	Peso (kg)	75,152	129,817	99,278	201,751	279,682
	Volumen (m3)	28.36	48.99	37.46	76.13	105.54
	Volumen mensual (m3)	114.81				

De acuerdo con los resultados de la modelación, la capacidad de los desarenadores propuestos deberá ser de 88 m³ para la unidad No.1 y de 115 m³ para la unidad No. 2, considerando este volumen como la condición crítica de la evaluación, la opción propuesta permitirá hacer un control sobre el volumen de sedimento generado por el área tributaria al desarenador Nápoles.

Una vez evaluada la capacidad de las nuevas unidades para la retención de los sedimentos generados, es necesario señalar que una solución integral para la gestión de sedimentos de la cuenca de estudio, requiere la implementación de las dos alternativas propuestas. Para garantizar la reducción del impacto de los sedimentos generados por la cuenca de estudio sobre la infraestructura de drenaje, se requiere tanto la instalación de los dos desarenadores propuestos como las acciones tendientes a la recuperación de la cobertura del suelo del sector donde se realizaban actividades de minería.

Como fue señalado, existe una condición en el sistema de drenaje, en donde, un tramo de la red actúa como punto de almacenamiento, este volumen de sedimento es susceptible de ser arrastrado por los flujos líquidos en eventos de precipitación. Como se muestra en las tablas 23 y 24, los volúmenes de sedimento almacenados en el tramo de alcantarillado, pueden ser del orden de 65 a 245 m³, únicamente el aporte de este volumen almacenado

significa ocupar la capacidad de diseño de los desarenadores Nápoles y Limonar, de presentarse una precipitación que genere el arrastre total de este volumen.

A continuación, se muestran los criterios de diseño de las nuevas estructuras propuestas. Para determinar los caudales de diseño de las estructuras propuestas se consolidaron los caudales generados por las áreas tributarias a cada desarenador, a partir de los eventos de precipitación utilizados para la validación del modelo, como se señala en la siguiente tabla.

Tabla 38. Caudales generados por las áreas tributarias de los nuevos desarenadores propuestos

Fecha del evento de precipitación	Canal Unidad No. 1		Canal Unidad No. 2	
	Qmax	Qmed	Qmax	Qmed
8/10/2018	0.42	0.14	0.25	0.09
19/09/2019	0.68	0.15	0.50	0.12
5/05/2017	0.52	0.25	0.36	0.19
8/05/2017	0.58	0.30	0.43	0.23
12/05/2017	0.38	0.18	0.31	0.16
Valor de referencia	0.68	0.22	0.50	0.18

El caudal de diseño adoptado será el registro más alto con un valor de 0.68 m³/s para la unidad No. 1 y de 0.50 m³/s para la unidad No. 2 generados por la precipitación del día 19/09/2019.

Tabla 39. Parámetros de diseño y dimensiones de la nueva estructura de retención de sedimentos

Parámetros	No. 1	No. 2	Unidades
	Valor		
Tipo de Desarenador	Rectangular Prismático	Rectangular Prismático	-
Número de unidades	1	1	-
Caudal de diseño: Qmax	680	500	L/s
Caudal medio	220	180	L/s
Temperatura del agua	25	25	°C
Velocidad Horizontal: V _H con Caudal de diseño	0.27	0.28	m/s

Parámetros	No. 1	No. 2	Unidades
	Valor		
Velocidad de sedimentación: V_s con Caudal de diseño	0.015	0.015	m/s
Diámetro de partículas: D	0.15	0.15	mm
Volumen de la unidad	88	115	m ³
Largo	12	15	m
Ancho	6	6	m
Profundidad zona de decantación	0.42	0.30	m
Profundidad de la tolva	1.63	1.75	m
Largo mayor de la tolva (B)	10	12	m
Largo menor de la tolva (b)	8	10	m

Los desarenadores propuestos cumplen con las condiciones hidráulicas y de capacidad de almacenamiento para el control del flujo de sedimento generado en un evento de precipitación histórico, esta alternativa garantizará que el desarenador Nápoles no supere su capacidad de diseño y, por lo tanto, no se presentarían excedentes de sedimento en la infraestructura de drenaje, aportados por el área tributaria al desarenador Nápoles.

6 CONCLUSIONES

El factor de erosionabilidad estimado para cada tipo de suelo $K_{\text{FLUVIOTORRENCIAL}}$, $K_{\text{ABANICO ALUVIAL}}$, $K_{\text{FLUVIO ARCILLOSO}}$ de 0.456, 0.350 y 0.407 respectivamente, describe la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por las gotas de lluvia, estos valores describen una propensión media de la cuenca a ser erosionada, es decir, que la cuenca tiene una susceptibilidad media frente a la erosión.

El tiempo de concentración describe una respuesta moderada de descarga de la cuenca, esta condición es característica de las cuencas alargadas y podría justificar los depósitos de sedimentos en ciertos tramos de la red de drenaje.

La representación del relieve de la cuenca, que relaciona la distribución de áreas en función de la altitud, establece que aproximadamente el 67 % del área de la cuenca de estudio hace parte de la zona de ladera. De esta manera es posible determinar que la cuenca posee una mayor cantidad de área en la zona alta, considerada con riesgo potencial de afectaciones por erosión.

KINEROS2 se mostró como una herramienta adecuada para la simulación de escorrentía superficial y producción de sedimentos en cuencas altamente urbanizadas. En este caso se logró un nivel de calibración y validación adecuado de los flujos líquidos y sólidos. Como se muestra en las tablas de resultados, los eventos de precipitación máximos mensuales, permitieron calibrar los parámetros del modelo en relación con el volumen de sedimento generado y los registros de sedimento retirados de los desarenadores.

El proceso de calibración de la modelación de generación de sedimentos se realizó cuantificando las cantidades de sedimento producidas y transportadas hasta el final de cada canal que tributa a los desarenadores de interés, estas cantidades se totalizaron por mes y se compararon con la cantidad de sedimento observada o retirada en cada sedimentador. El nivel de ajuste del modelo se considera aceptable, ya que, se obtuvieron errores volumétricos para la producción de sedimentos de 0.14 % en el desarenador de Alto Refugio, 12.33 % en Lourdes, -0.10 % en Nápoles y 5.25 % en Limonar Autopista Sur.

El nivel de ajuste del modelo en la validación del flujo de sólidos también se consideró aceptable ya que se obtuvieron errores volumétricos para la producción de sedimentos de

(0.29 y 2.73 %) en el desarenador de Alto Refugio, 0.27 % en Lourdes, (-5.69 y 16.45 %) en Nápoles y 2.44 % en Limonar Autopista Sur.

El modelo KINEROS 2 estima de manera adecuada la cantidad de sedimentos generados en una cuenca. Sin embargo, se encontró una deficiencia en el análisis, ya que, el modelo no permite simular de manera apropiada las condiciones hidráulicas de los desarenadores. En las diferentes corridas del modelo se observó que el flujo de sedimentos generados antes de cada punto de almacenamiento no era retenido.

Con el modelo calibrado y validado, se pudo concluir que en la cuenca las áreas que presentan un mayor impacto en cuanto a la cantidad de sedimento generada son las que hacen parte del área tributaria de las estructuras retenedoras de sólidos Alto Refugio y Lourdes.

De los resultados del modelo KINEROS 2 es importante señalar que las áreas donde se muestra la mayor cantidad de sedimento producido y los canales donde se transportan en mayor medida esta cantidad de sólidos son dos: 1) la zona de ladera con mayor concentración de asentamientos humanos de desarrollo incompleto – AHDI y 2) en zonas de extracción minera. Dichas áreas equivalen al 29 % actualmente, pero alrededor del 35 % del área total (parte alta de la cuenca) es susceptible de ser ocupada por este tipo de asentamientos.

Por lo anterior, es posible inferir, que la impermeabilización de las cuencas juega un papel importante en los niveles de escorrentía superficial y de sedimentos generados, y por tanto en la eficiencia en la operatividad de los sistemas de drenaje urbano. Por tanto, es imprescindible que las autoridades ambientales y de ordenamiento territorial tomen medidas de planificación que incorporen mantener ciertos niveles de cobertura superficial que permitan reducir el factor de erosionabilidad de los suelos, o medidas que permitan reducir el nivel de impermeabilidad.

El comportamiento de las variables magnitud de precipitación (mm) y duración (h) en relación con el incremento del volumen de sedimento generado sugiere que la empresa prestadora de servicios, deberá atender con diligencia la respuesta de eventos de precipitación con una intensidad superior a 20 mm/h y magnitudes considerables (en general superiores de 20 mm). Ya que, la cantidad de sedimento generado asociada a este tipo de precipitaciones genera presiones sobre la capacidad del sistema.

El área tributaria al desarenador Nápoles genera un volumen de sedimento que sobrepasa la capacidad del desarenador. Esta cantidad de sedimento se almacena en la infraestructura contigua al desarenador Nápoles. Además, los excesos de sedimento que no son retenidos en este punto se direccionan hacia el desarenador Limonar incidiendo en su capacidad de diseño.

Para los desarenadores Nápoles y Limonar se establece que los caudales de diseño son menores a los caudales de escorrentía esperados. El parámetro de velocidad horizontal incrementa significativamente para la evaluación de los caudales máximos estimados. Bajo esta condición de operación, la velocidad de flujo, no garantiza una óptima sedimentación de los sólidos, además, la velocidad de sedimentación de las partículas también presenta un incremento significativo, el cual, superó el valor referenciado por el RAS (2021) que está en el orden de 0.03 m/s. Esta condición en los flujos, podrían propiciar el arrastre y resuspensión del material almacenado, material que pasa a las redes y es susceptible de quedar depositado en tramos con pendientes bajas.

Para los eventos de precipitación ocurridos en las fechas 4/03/2016, 6/03/2016, 15/03/2016 y 17/06/2016 se estimó un volumen de sedimento igual a 1039.35 m³ volumen que supera la capacidad instalada de los desarenadores que es igual a 707 m³. Los periodos de altas precipitaciones generan presiones significativas en los componentes del sistema de alcantarillado, y aunado a que el sistema de drenaje es de tipo combinado las obstrucciones en las redes ocasionadas por los sedimentos, también generan vertimientos de agua residual sin tratamiento.

Al modificar los parámetros asociados a la cobertura y uso del suelo, de las zonas de extracción minera se muestra una reducción significativa en la cantidad de sedimento generada, bajo esta condición es posible garantizar una adecuada operación del sistema con la capacidad instalada en el punto del desarenador Alto Refugio. Sin embargo, el desarenador Nápoles aún presenta una capacidad menor a la cantidad de sedimento que se estima puede ser conducida hacia esta estructura. Por lo tanto, se justifica el emplear a su vez la alternativa propuesta de instalar dos nuevos desarenadores para el área tributaria a la estructura de Nápoles.

Es importante señalar que los sedimentos depositados presentan un nivel de incertidumbre significativo para la operación del sistema, lo que sustenta la necesidad de ver estos puntos

de depositación como unidades del sistema que requieren de un mantenimiento exhaustivo. De los escenarios evaluados es necesario afirmar, que se requiere de un estudio detallado para la evaluación de las condiciones de arrastre de sedimentos depositados y de trabajos de medición en campo que logren validar la hipótesis.

Las estructuras desarenadoras propuestas permiten hacer un control sobre la cantidad de sedimento generados en las microcuencas tributarias al desarenador de Nápoles, de esta manera se evita superar la capacidad de almacenamiento de dicha estructura, y que los sedimentos sean transportados hacia la infraestructura de drenaje.

7 BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, O. Á., & Jiménez, R. N. (2019). *Agroecología Experiencias comunitarias para la agricultura familiar en Colombia* (Editorial Universidad del Rosario, Ed.).

<https://doi.org/doi.org/10.12804/tp9789587842326>

ACODAL. (2016). *DELIMITACIÓN DE FRANJAS DE PROTECCIÓN DE CORRIENTES DE AGUA LOCALIZADAS EN LAS COMUNAS 17 , 18 , 19 Y 20 DE SANTIAGO DE CALI*. Santiago de Cali.

Al-Taai, O. T., Al-Hassani, D. A., & Mehdi, A. M. (2016). Estimating the Soil Erosion by Using Rainfall Data for Selected Stations in Iraq. *OALib*, 03(03), 1–15.

<https://doi.org/10.4236/oalib.1102494>

Apsden, J. A., & Nivia, A. (1985). *Mapa Geológico de Colombia - Escala 1:100.000. Plancha 278 - Bahía de Buenaventura*. Bogotá D. C., Colombia.

Arandes, R. (1992). Planteamiento urbanístico y drenaje urbano. In: Dolz, J., Gómez Valentín, M. & Martín Vidé, J. P. (eds.) *Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*.

Askoa, G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicando la prligrosidad de crecidas. *Boletín de La A.G.E.N.*, 38, 311–329.

Ayele, T., Ahmed, N., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2016). Hydrological responses to land use / cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin , Ethiopia. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.124>

Becerra, A. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. (ilustrada; 1999 Universidad Autónoma Chapingo, Ed.).

Bedan, E. S., & Clausen, J. C. (2009). *stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds 1. 45(4)*.

Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling. In *Rainfall-Runoff Modelling*.

<https://doi.org/10.1002/9781119951001>

- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2010). Principles of soil conservation and management. In *Principles of Soil Conservation and Management*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>
- Blum, M. D., & Törnqvist, T. E. (2000). Fluvial responses to climate and sea-level change: A review and look forward. *Sedimentology*, 47(SUPPL. 1), 2–48. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00008.x>
- Bolaños, H. (2019). La asombrosa transformación del cerro La Bandera. *Cuentos Verdes*, pp. 8–9.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2017a). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2017b). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Botero, B., Aristizábal, V., & Vélez, J. (2012). *Manual de Hidrología para Obras Viales Basado en el Uso de Sistemas de Información Geográfica* (D. de I. y E. de la F. de I. y Arquitectura, Ed.). Universidad Nacional De Colombia.
- Characklis, W., & Wiesner, R. (1997). *Particles, Metals, And Water Quality In Runoff From Large Urban Watershed By Gregory W. Characklis 1 and Mark R. Wiesner, z Member, ASCE*. (August), 753–759.
- Concejo Municipal de Santiago de Cali. (2014). Acuerdo 373 de 2014 Plan De Ordenamiento Territorial Del Municipio De Santiago De Cali. *El Departamento Administrativo de Planeación Municipal*, 433.
- CONDORI, V. (2018). *Pérdida Del Suelo Por Erosión Hídrica En La Comunidad De San Francisco De Chañajari Moho - Puno*. Universidad Nacional Del Altiplano.
- CVC. (2021). Otras noticias. *Cvc - Noticias*, pp. 94–97. <https://doi.org/10.20882/adicciones.138>

- CVC, C. A. R. D. V. D. C. –, DAGMA, D. A. D. G. D. M. A. –, PNN, P. N. N. D. C. –, GIAS, G. D. I. E. A. Y. S. –, & UTP, U. T. D. P. –. (2018). *Formulación de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH Cauces Naturales de los Ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo Convenio Interadministrativo No 195 DE 2017* (p. 237). p. 237. Santiago de Cali.
- DAPM. (2014). *Plan de ordenamiento territorial de Santiago de Cali. Documento técnico de soporte* (p. 1170). p. 1170. Retrieved from http://planeacion.cali.gov.co/pot_adoptado/20141201_DTS_RAPOT.pdf
- Delgadillo, V. T., & Paez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. *Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo, s.l.:*
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (1998). *Plan De Desarrollo Económico Y Social De Cali 1998 - 2010*.
- Departamento de distribución Centro Control Maestro. (2018). *Área de drenaje sur - Áreas Tributarias Santiago de Cali* (p. 52). p. 52. Santiago de Cali.
- Di Silvo, G., & Basson, G. (2008). Erosion and sediment dynamics from catchment to coast. *IHP-VI Technical Document in Hydrology N°82 UNESCO Working Series SC-2008/WS/34*, (82), 48. Retrieved from <http://www.unesco.org/water/ihp>
- Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 80–90.
- Dumanski, J., Gameda, S., & Pieri, C. (1998). *Indicators of Land Quality*. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/487661468739557843/pdf/multi-page.pdf>
- Duque, G., & Escobar, C. (2016). Capítulo 8. Erosión de suelos. *Universidad Nacional de Colombia*, 122–135.
- EMCALI Empresa Industrial Comercial Del Estado - Esp. (2016a). *Plan De Saneamiento Y Manejo De Vertimientos - PSMV 2016-230*. Santiago de Cali, Valle del Cauca. Colombia: EMCALI.
- EMCALI Empresa Industrial Comercial Del Estado - ESP. (2016b). *Puntos De Descargas*

A Canales Y/O Ríos , Canales PSMV - Emcali Empresa Industrial Y Comercial Del Estado - ESP (OS No. I-1). Santiago de Cali.

EMCALI Empresa Industrial Comercial Del Estado - ESP. (2021). *Descargas Finales En La Ciudad De Santiago De Cali 2020 No . Contrato 300-0s-1238-2020 Santiago De Cali.*

FAO (Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura), & Suelo). (2016). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Tecnico. In *Fao*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>

Fattorelli, S., & Fernández, P. (2011). Diseño Hidrológico. *Instituto Nacional Del Agua, I*, 531 pag.

Figuroa S., B., A. Amante, O., Cortes, H. G., J. Pimentel, L., E. S. Osuna, C., J. M. Rodríguez, O., & Morales, F. J. (1991). *Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión*. Salinas, San Luis Potosí, Mexico: SARH-Colegio de Posgraduados.

Fortuño, J. (2014). *Estudio de la erosión de cuencas naturales mediante KINEROS 2*. 91.

Foster, G. R. (1982). Channel erosion within farm fields. *American Society of Civil Engineers, 7*, 82–107.

Foster, G. R., & Ferreira, V. A. (1981). Deposition in uniform grade terrace channels. *American Society of Civil Engineers, 7*, 185–197.

Fox, D. M., Bryan, R. B., & Price, A. G. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill, conditions. *Geoderma, 80*(1–2), 181–194.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00075-X)

Frau, C. M., Pino, L. M., Rojas, Y. O., & Hernández, Y. M. (2011). Generalidades De Modelo Digital De Elevación Condicionada Por Puntos Criticos De Terreno. *Boletín de Ciencias Geodésicas, 17*(1413–4853), 439–457. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=393937721007>

Fuentes Junco, J. J. A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. *Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas (INE)*.

-
- Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, L., Pizarro, M., & Rigo, P. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. In *INTA-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., & Cerdà, A. (2017). Ongoing and Emerging Questions in Water Erosion Studies. *Land Degradation and Development*, 28(1), 5–21. <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>
- Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443), 43–55. <https://doi.org/10.1002/qj.49710544304>
- Germer, S., Neill, C., Vetter, T., Chaves, J., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2009). Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. *Journal of Hydrology*, 364(3–4), 349–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.013>
- Gómez, M. (2007). Hidrología urbana. *Colección CBI*, 235.
- Goodrich, D. ., Unkrich, C. ., Smith, R. ., & Guertin, D. . (2011). *The AGWA – KINEROS2 Suite of Modeling Tools*. (1994), 1294–1305. Retrieved from dave.goodrich@ars.usda.gov
- Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., Guertin, D. P., Hernandez, M., Burns, I. S., ... Kepner, W. G. (2010). The AGWA - KINEROS2 suite of modeling tools. *Watershed Management Conference 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change - Proceedings of the 2010 Watershed Management Conference*, 394(1994), 1294–1305. [https://doi.org/10.1061/41148\(389\)116](https://doi.org/10.1061/41148(389)116)
- Gregory, J. H., Dukes, M. D., Jones, P. H., & Miller, G. L. (2006). *Effect of urban soil compaction on infiltration rate*. 61(3), 117–124.
- Gupta, A. K., Rudra, R. P., Gharabaghi, B., Daggupati, P., Goel, P. K., & Shukla, R. (2018). Predicting the impact of drainage ditches upon hydrology and sediment loads using KINEROS 2 model: A case study in Ontario. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie Des Biosystems Au Canada*, 60(December), 11–15. <https://doi.org/10.7451/CBE.2018.60.1.1>

- Gvozdenovich, J. J., Barbagelata, P. A., Oszust, J. D., & Bidegain, M. P. (2018). *Escurrecimiento Y Producción De Sedimentos En Una Pequeña Cuenca Agrícola Aforada De Entre Ríos, Argentina: Aplicación Del Modelo WEPP*. 36(1), 157–172.
- Gyawali, S., Techato, K., Monprapussorn, S., & Yuangyai, C. (2013). Integrating Land Use and Water Quality for Environmental based Land Use Planning for U-tapao River Basin, Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 91, 556–563. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.454>
- Haan, C. T., Barfield, B. J., & Hayes, J. C. (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. Elsevier B.V.
- He, H., Zhou, J., & Zhang, W. (2008). Modelling the impacts of environmental changes on hydrological regimes in the Hei River Watershed, China. *Global and Planetary Change*, 61(3–4), 175–193. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.012>
- Hernández, D. (2009). *Estudio de la carga sólida de entrada en una red de alcantarillado urbana procedente de las cuencas de cabecera*. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Hudson, N. (1995). *Soil Conservation* (Fully rev.). Ames : Iowa State University Press, 1995.
- IDEAM, U.D.C.A, & MDAS. (2015). Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión. In *Ideam - Mads -U.D.C.a*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023647/Protocolo-erosion.pdf>
- INGEOMINAS. (2005). *Estudio De Microzonificación Sísmica De Santiago De Cali Informe No.2-1 Investigaciones Geológicas y Geomorfológicas* (No. Convenio No. 02 de 2002).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca - Capitulo III Descripción de los suelos*.
- J, K. (1954). *Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. La Geología del Flanco Oriental de la Cordillera Occidental en la región de San Antonio*. (Informe 10; INGEOMINAS, Ed.). Mínicío de Jamundí, Valle del Cauca.
- Kalantari, Z., Lyon, S. W., Folkesson, L., French, H. K., Stolte, J., Jansson, P. E., &

- Sassner, M. (2014). Quantifying the hydrological impact of simulated changes in land use on peak discharge in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 466–467, 741–754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.047>
- Kennedy, J. R., Goodrich, D. C., & Unkrich, C. L. (2013). Using the KINEROS2 modeling framework to evaluate the increase in storm runoff from residential development in a semiarid environment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(6), 698–706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000655](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000655)
- Ketema, A., & Dwarakish, G. S. (2019). Water erosion assessment methods. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 00(00), 1–8. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1567398>
- Korgaonkar, Y., Guertin, D. P., Goodrich, D. C., Unkrich, C., Kepner, W. G., & Burns, I. S. (2018). Modeling urban hydrology and green infrastructure using the AGWA urban tool and the KINEROS2 model. *Frontiers in Built Environment*, 4(October). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00058>
- Korgaonkar, Y., Meles, M. B., Guertin, D. P., Goodrich, D. C., & Unkrich, C. (2020). Global sensitivity analysis of KINEROS2 parameters representing green infrastructure using the STAR-VARS framework. *Environmental Modelling & Software*, 183135. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2019.183135>
- Leopold, L. (1968). Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. *Geological Survey Circular*, 554, 1–21. Retrieved from <http://enviro.lclark.edu/resources/Tryon/Water/Hydrology.pdf>
- Li, Z., & Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94–117. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- Lin, W., Zhang, L., Du, D., Yang, L., Lin, H., Zhang, Y., & Li, J. (2011). Erratum to: Quantification of land use/land cover changes in Pearl River Delta and its impact on regional climate in summer using numerical modeling. *Regional Environmental Change*, 11(2), 437–438. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0203-8>
- Lin, Y. P., Hong, N. M., Wu, P. J., & Lin, C. J. (2007). Modeling and assessing land-use and hydrological processes to future land-use and climate change scenarios in watershed land-use planning. *Environmental Geology*, 53(3), 623–634.

<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0677-y>

- Maetens, W., Poesen, J., & Vanmaercke, M. (2012). How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Reviews*, 115(1–2), 21–36.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003>
- Martínez, J. A., & Poch, R. M. (1998). Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse San Joaquín Costa. *Limnetica: Departamento Del Medio Ambiente y Ciencias Del Suelo*, 14, 83–91. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10459.1/59492>
- Mena, H. D., Benavides, C. C., & Castillo, J. A. (2010). Evaluación De Lasusceptibilidadalerosión Hídrica De Un Vitric Haplustands, Mediante Eluso De Un Minisimulador De Lluvia, En Unazonade Laderaen Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, XXVIII(2), 31–43.
- Meneses, B. M. (2014). Avaliação Da Perda De Solo Por Erosão Hídrica No Concelho De Tarouca (Portugal) E Sua Influência Na Morfogénese Atual. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i4.501>
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2021). *Resolución 799 de 2021*. (0330), 1–82. Retrieved from www.minvivienda.gov.co
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá D. C., Colombia.
- Montoya, J. J. (2008). *Desarrollo De Un Modelo Conceptual De Produccion, Transporte Y Deposito De Sedimentos*. Universidad Politecnica De Valencia.
- Montoya Velilla, J., Toro Botero, F., Carvajal Serna, L., & Vélez Upegui, J. (2006). Transito de la onda de choque en canales de alta pendiente. *Avances En Recursos Hidráulicos*, (13), 55–70.
- Morgan, R. P. C. (2005). *SOIL EROSION AND CONSERVATION* (Third; C. U. National Soil Resorces Institute, Ed.). Blackwell Publishing company.
- Morris, G. L., & Fan, J. (2009). *Reservoir Sedimentation Handbook* (Ver 1.01).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Muñoz Carpena, R. (2014). *Hidrología Agrícola. Parte IV: Hidrología Superficial*. 147–174.

Retrieved from http://roa.ult.edu.cu/bitstream/123456789/2280/4/parte_IV.pdf

- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., & Gash, J. H. C. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1–4), 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.058>
- Nanía, L. S., & Gómez Valentín, M. (2004). *Ingeniería Hidrológica*. Granada: Grupo Editorial Universitario.
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., & O'Neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50.
- Neupane, R. P., & Kumar, S. (2015). Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 529(P1), 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.050>
- Norman, L. M., Guertin, D. P., Feller, M., Norman, L. M., Guertin, D. P., Feller, M., ... Survey, U. S. G. (2008). *A Coupled Model Approach to Reduce Nonpoint- Source Pollution Resulting from Predicted Urban Growth : A Case Study in the Ambos Nogales Watershed*. 3638(June). <https://doi.org/10.2747/0272-3638.29.5.496>
- Nunes, A. N., de Almeida, A. C., & Coelho, C. O. A. (2011). Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography*, 31(2), 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.12.006>
- Ocampo, M. (2017). *Crecimiento Urbano y Planificación Territorial en la Ciudad de Cali . Evolución 1990 – 2010 Departamento de Geografía i Análisis Geográfico Regional Facultad de Geografía i Historia Crecimiento Urbano y Planificación Territorial en la Ciudad de Cali Ana M. Universidad de Barcelona*.
- Olmos, E., & Montenegro, H. (1987). Inventario de los problemás de la erosión y degradación de los suelos de Colombia. *Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, 18–21, 23.
- Pascual, J. D. M. (2016). Guía Práctica sobre la Modelización Hidrológica y el Modelo HEC-HMS. *Parque Científico Tecnológico de La Universidad de Alcalá*, 29(4), 143–156.
- Peña, C., & Ramírez, L. (2011). *Proceso de Ocupación de Tierras en Alto Nápoles: El*

Caso del Sector Cumaná Meléndez. Universidad del Valle.

- Piscitelli, Marcela; Varni, Marcelo; Sfeir, A. A. M. G. (2010). Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul- Buenos Aires). *Revista de La Facultad de Agronomía, La Plata*, 109(1), 17–22.
- Pitt, R., Asce, M., Chen, S., Asce, A. M., Clark, S. E., Asce, M., ... Asce, A. M. (2009). *Compaction ' s Impacts on Urban Storm-Water Infiltration*. 134(5), 652–658.
- Porazinska, D. L., & Wall, D. H. (2013). Soil Conservation. *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition*, (23), 590–598. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00127-1>
- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de Modelos Digitales del Terreno. *Boletín Del Instituto de Fisiografía y Geología*, Vol. 77, pp. 31–38.
- Reyes, A., Barroso, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*.
- Richter, G., & Negendank, J. F. W. (1977). Soil Erosion Processes and Their Measurement in the German Area of the Moselle River. *Earth Surf Process*, 2(2–3), 261–278. <https://doi.org/10.1002/esp.3290020217>
- Rodriguez B., M. L., Taboada C., M. M., & Palleiro S., L. (2011). Exportación De Sedimentos Durante Eventos De Lluvia: Influencia De Regueros Y Cárcavas Efímeras. *Terra Latinoamericana*, 29, 6.
- Rutter, A. J., Morton, A. J., & Robins, P. C. (1975). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests. II. Generalization of the Model and Comparison with Observations in Some Coniferous and Hardwood Stands. *The Journal of Applied Ecology*, 12(1), 367. <https://doi.org/10.2307/2401739>
- Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2005). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In *Watershed Models*. <https://doi.org/10.1201/9781420037432.ch17>
- Scheffler, R., Neill, C., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2011). Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon

-
- agricultural frontier. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 281–289.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.016>
- Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., Woolhiser, D. A., & Miller, S. N. (2007). KINEROS2 and the AGWA modelling framework. In *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas* (Vol. 9780521869).
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734.006>
- Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., Woolhiser, D. A., & Miller, S. N. (2008). *KINEROS2 and the AGWA modelling framework*. 49–68.
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). *Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review Impacts*. 37–41.
<https://doi.org/10.1080/15730620500386529>
- Singh, V. P. (2002). Is hydrology kinematic? *Hydrological Processes*, 16(3), 667–716.
<https://doi.org/10.1002/hyp.306>
- Smith, A. P., Western, A. W., & Hannah, M. C. (2013). Linking water quality trends with land use intensification in dairy farming catchments. *Journal of Hydrology*, 476, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.057>
- Smith, R. E., Goodrich, D. ., Woolhiser, D. A., & Unkrich, C. A. (1990). KINEROS - A Kinematic Runoff and Erosion Model. *USDA-ARS Rep*, 77(June 2015), 130.
- Smith, R. E., Goodrich, D. C., & Unkrich, C. L. (1999). Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2. *Catena*, 37(3–4), 457–475.
[https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00033-8](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00033-8)
- Suarez, J. (2001). Tipos de erosión y su control. *Control de Erosión En Zonas Tropicales*, 57–84.
- Summer, W., Klaghofer, E., & Hintersteiner, K. (1996). Trends in soil erosion and sediment yield in the alpine basin of the Austrian Danube. *IAHS-AISH Publication*, 236(236), 473–479.
- Tiwari, a K., Risse, L. M., & Nearing, M. a. (2000). *Evaluation Of Wepp And Its Comparison With Usle And Rusle*. 43(5), 1129–1135.

- Trimble, S. W. (1983). a sediment for coon creek basin in the driftless area, winconsin, 1853-1977. *Soil Sci*, 283, 454–474.
- Troeh, F., Hobbs, J., & Luther, R. (2004). *Soil and Water Conservation: For Productivity and Environmental Protection* (4th ed.).
- Veléz, J., & Botero, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 78(165), 58–71.
- Ven Te Chow, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidraulica De Canales Abiertos*.
- Walling, D. E., Collins, A. L., Sickingabula, H. M., & Leeks, G. J. L. (2001). Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: A Zambian example. *Land Degradation and Development*, 12(5), 387–415. <https://doi.org/10.1002/ldr.461>
- Wheater, H. S., Sorooshian, S., & Sharma, K. D. (2007). *Hydrological Modelling for Arid and Semi-arid Areas*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734>
- Woltemade, & J, C. (2010). *Impact Of Residential Soil Disturbance On Infiltration Rate And Stormwater Runoff*. 46(4), 700–711.
- Xiong, M., & Chen, L. (2019). Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling. *Sagepub.Com/Journals-Permissions*, DOI: 10.11(journals.sagepub.com/home/ppg). <https://doi.org/10.1177/0309133319832016>
- Yan, B., Fang, N. F., Zhang, P. C., & Shi, Z. H. (2013). Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. *Journal of Hydrology*, 484, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>
- Yang, J., & Zhang, G. (2011). *Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff*. 751–761. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1>
- Zambrano Nájera, J. (2015). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*, 295. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95706?show=full>

Zhang, H., Li, H., & Chen, Z. (2011). Analysis of land use dynamic change and its impact on the water environment in Yunnan plateau lake area - A case study of the Dianchi Lake drainage area. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART C), 2709–2717.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.421>