

4. Zona de estudio

4.1. Localización

La zona de estudio comprende la cuenca de Río Grande, albergando las subcuencas de los ríos Grande y Chico, y de las quebradas Don Diego, Las Ánimas y Orobajo, hasta su confluencia en el embalse Río Grande II. Este territorio se localiza en la zona central del departamento de Antioquia (Colombia), entre los 6.38N y 6.82N y 75.45W y 75.71W en jurisdicción de los municipios de Entreríos, Belmira, Don Matías, Santa Rosa de Osos y San Pedro de los Milagros (Figura 4.1).

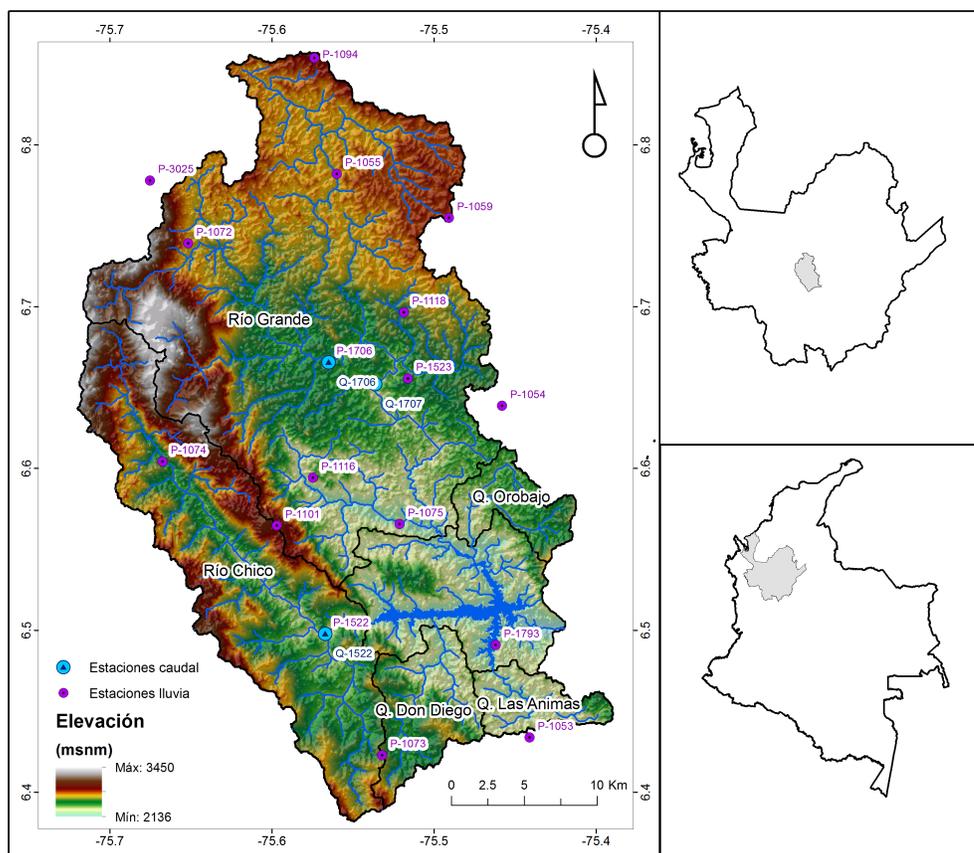


Figura 4.1.: Localización de la zona de estudio.

Fuente: CORANTIOQUIA (2005)

La zona de estudio abarca un área de 896.13 Km² aproximadamente. Las subcuencas de río Grande y río Chico presentan la mayor superficie con 562.34 Km² (62.75 %) y 229.49 Km² (25.61 %) respectivamente. Las subcuencas de las quebradas Don Diego, Las Animas y Oroabajo tienen un área de 50.72 Km² (5.66 %), 25.2 Km² (2.81 %) y 28.38 Km² (3.17 %) respectivamente.

Los recursos hídricos almacenados en el embalse Río Grande II son utilizados para la provisión de agua potable para el valle de Aburrá y la generación de energía para el sistema de interconexión eléctrica.

4.2. Topografía

4.2.1. Elevación

En la Figura 4.1 se observa el rango de elevación de la zona de estudio que varía entre 2136 m.s.n.m. y 3450 m.s.n.m. La mayor parte del territorio (64 %), correspondiente a la zona media de las subcuencas de río Grande, río Chico y la quebrada Don Diego, se encuentra entre los 2500 m.s.n.m. y 3000 m.s.n.m. Las elevaciones entre los 2237 m.s.n.m. y 2500 m.s.n.m. ocupan el 32 % del área y corresponden a la mayor parte de las subcuencas de Las Animas y Oroabajo, y a la zona baja de las subcuencas de río Grande y río Chico. Las elevaciones superiores a 3000 m.s.n.m., representan el 5 % del área y se ubican en la parte alta de las subcuencas de río Chico y río Grande, donde se localiza el páramo de Belmira.

4.2.2. Pendientes

En la región se presentan dos tipos de paisaje: altiplanicie y montaña. El paisaje de altiplanicie abarca la mayor parte del territorio, con una representación importante sobre las subcuencas del río Grande, y la quebrada Oroabajo y la quebrada Las Animas. El paisaje de Montaña se concentra principalmente en la divisoria entre las subcuencas de río Chico y río Grande. En la Figura 4.2 se presenta el mapa de pendientes de la zona, calculado a partir del modelo de elevación del terreno (*DEM*).

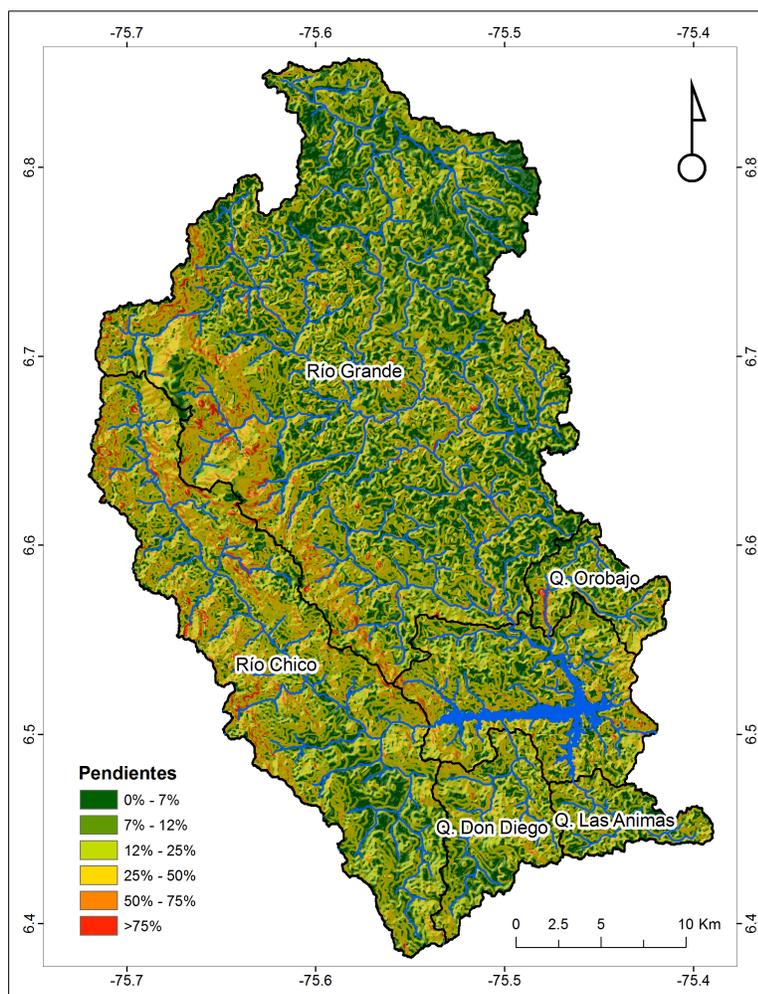


Figura 4.2.: Pendientes.

Sobre el paisaje de altiplanicie, las pendientes varían desde relieves ligeramente inclinados (pendientes menores al 7%), pasando por relieves moderada y fuertemente inclinados (pendientes entre 7% y 12%, y 12% y 25% respectivamente), hasta relieves ligeramente escarpados (pendientes entre 25% y 50%). Con un 35% de representación, los relieves fuertemente inclinados son predominantes, seguidos de los relieves ligeramente escarpados con un 25%. Las zonas planas de relieves ligera y moderadamente inclinados representan el 23% y el 13% del área, respectivamente.

En el paisaje de montaña, se encuentran los relieves moderadamente escarpados (pendientes entre 50% y 75%) y fuertemente escarpados (pendientes mayores al 75%) con representaciones del 3% y el 1% del área, respectivamente.

4.3. Geología

De acuerdo con INGEOMINAS (1999), la zona de estudio hace parte de una región donde predominan las rocas ígneas del Batolito Antioqueño (*Ksta*) y el Stock de Belmira (*Kstbe*), las cuales intruyen un conjunto de rocas metamórficas - metasedimentos (*Pzes*) y anfibolitas (*Pza*) - que constituyen el basamento de la cordillera central. Adicionalmente, en las llanuras de los cauces se encuentran materiales no consolidados de origen aluvial (*Qal*). En la Figura 4.3 se presenta el mapa de unidades geológicas de la zona.

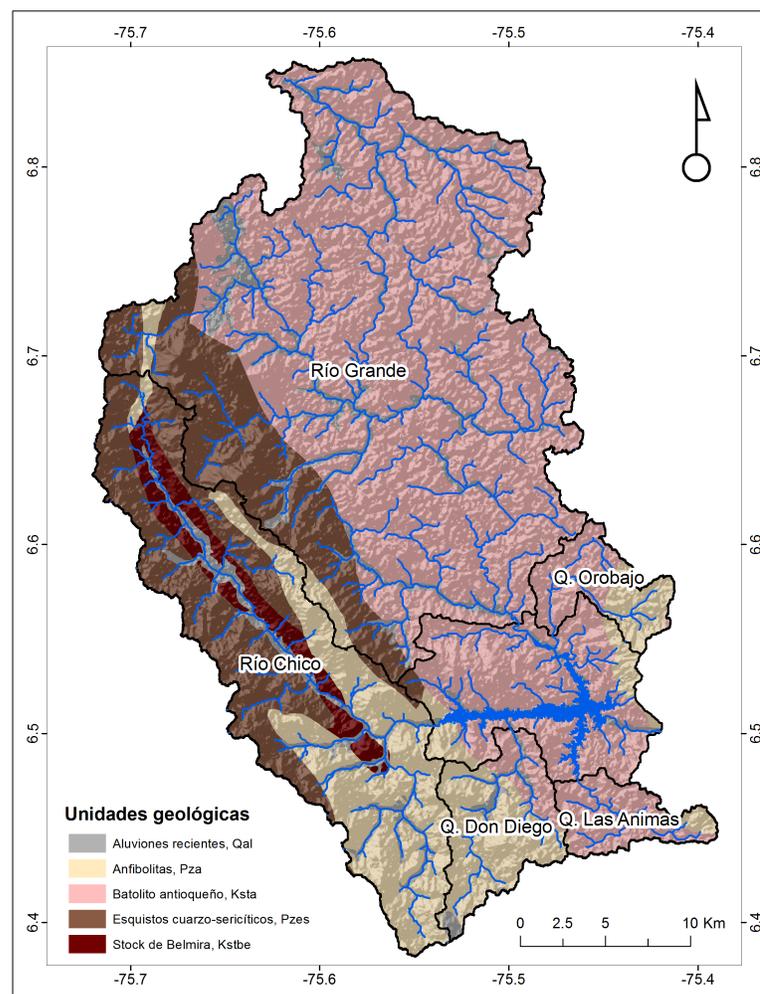


Figura 4.3.: Unidades geológicas.

Fuente: INGEOMINAS (1999)

Desde el punto de vista hidráulico las rocas ígneas y metamórficas (*Ksta*, *Pms* y *Pav*) son unidades de baja permeabilidad, donde la transferencia del flujo se lleva a cabo a través de fracturas y discontinuidades. Por otro lado, los materiales aluviales no consolidados (*Qal*) presentan alta permeabilidad facilitando la transferencia del flujo.

4.4. Suelos

Los suelos de la región se han desarrollado a partir de pocos tipos de material parental; sin embargo, la variabilidad en el relieve ha dado origen a unidades con diferencias contrastantes en cuanto a las propiedades físicas e hidráulicas (IGAC, 2007). En la Figura 4.4 se presenta el mapa de suelos de la zona.

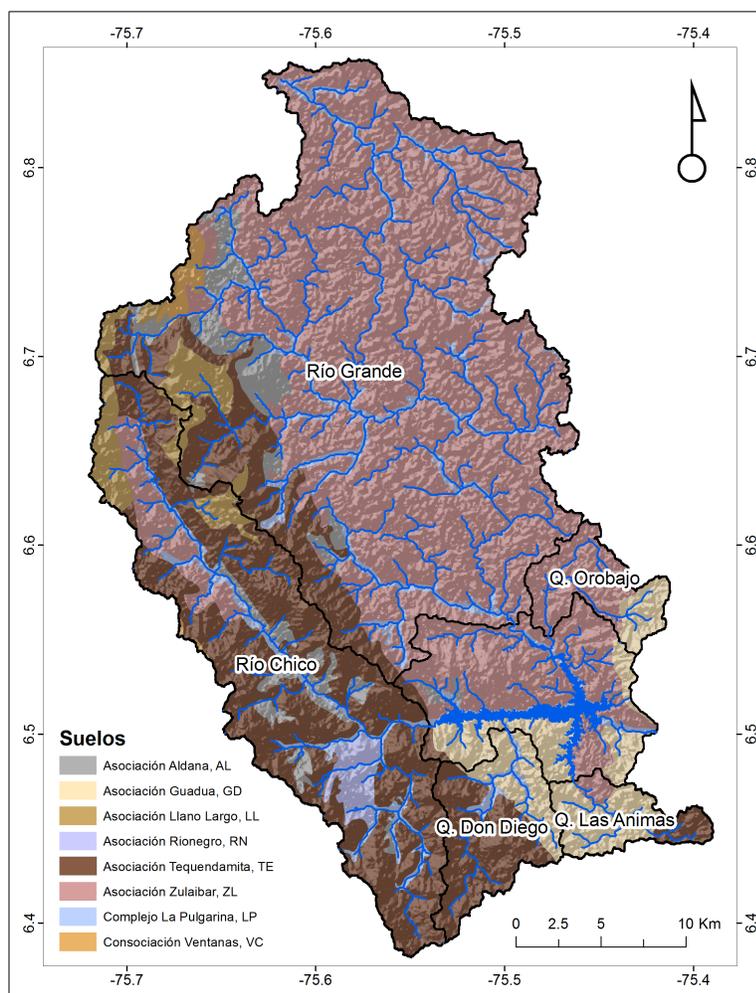


Figura 4.4.: Unidades de suelos.
Fuente: (IGAC, 2007)

La Asociación Zulaibar (*ZL*) ocupa la mayor parte de la subcuenca del río Grande y está integrada por suelos desarrollados a partir de materiales ígneos y cenizas volcánicas, son bien drenados y de texturas medias. La Asociación Tequendamita (*TE*) es la unidad con mayor representación en la subcuenca del río Chico; está compuesta por suelos desarrollados a partir de depósitos de cenizas volcánicas sobre rocas metamórficas; presentan texturas finas y son bien drenados. Los suelos de la Asociación Llano Largo (*LL*) se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas que recubren rocas ígneas, son superficiales, limitados por

roca, bien drenados y de texturas medias. Los suelos de la Asociación Aldana (*AL*) se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas depositadas sobre diferentes tipos de rocas cristalinas y aluviones, de texturas medias a finas y buen drenaje. La Asociación Guadua (*GD*) se concentra en la subcuenca de Las Animas y la parte baja de la subcuenca de Don Diego. Son suelos desarrollados a partir de materiales ígneos y cenizas volcánicas, son de texturas medias y drenaje moderado. La asociación Rionegro (*RN*) se encuentra en la zona baja de la subcuenca del río Chico, sus suelos se han desarrollado a partir de aluviones heterogéneos y heterométricos, con cenizas volcánicas, las cuales cubren la mayor parte de la asociación; son de texturas medias a moderadamente gruesas y bien drenados. Los suelos que conforman la consociación Ventanas (*VC*) se han desarrollado a partir de rocas metamórficas; son bien drenados y de texturas finas. Los suelos del Complejo la Pulgarina (*LP*) se encuentran en los márgenes de los ríos y se han desarrollado a partir de depósitos aluviales no consolidados. Son de texturas gruesas y de buen drenaje.

4.5. Coberturas y usos del suelo

El paisaje predominante de la región es una matriz de pastos con cultivos agrícolas y relictos de bosque en las riveras de los cauces. Hacia la zona más alta se ubica el páramo de Belmira donde predominan los bosques de roble y la vegetación de páramo. En la Figura 4.5 se presenta el mapa de coberturas y usos de suelo en la zona de estudio.

Los pastos manejados (*PM*), corresponden a la cobertura vegetal predominante en la zona, representando aproximadamente el 50,1 % del área total; sobre esta cobertura se desarrolla ganadería extensiva, principal actividad económica de la región. Los pastos enmalezados (*PE*), corresponden a la segunda cobertura con mayor importancia con una representación del 14.5 %; están conformados por pastos sin ningún tipo de mantenimiento y corresponden a zonas de potreros abandonados. El bosque intervenido (*Bi*), presenta representa el 4.8 % del área total; se localiza principalmente en las partes altas de las laderas, y corresponde a zonas boscosas que se ven afectadas por la extracción de productos forestales. Los rastrojos bajos (*Rb*), representa el 8.9 % del área; se encuentran en las márgenes de las quebradas y en las zonas de altas pendientes. Los rastrojos altos (*Ra*), tienen una representación del 4.5 %; al igual que los rastrojos bajos, son zonas de protección en las que no se realizan actividades agrícolas. Los bosques de roble (*BR*), corresponden a los bosques naturales mejor conservados en la zona; sin embargo su representación es muy limitada, con tan sólo el 9.7 %; se ubican principalmente en la zona de amortiguamiento del páramo de Belmira. Los bosques plantados (*BP*), se ubican principalmente en la zona de amortiguamiento del embalse, son áreas destinadas tanto para la protección del suelo como para el suministro de madera a futuro; representan el 2.8 % del área total. Los cultivos agrícolas (*C*), en su mayoría se desarrollan bajo prácticas intensivas en las que el suelo permanece desnudo todo el año.

Los cultivos más comunes son papa, tomate de árbol y frijol y su representación es mínima con tan sólo el 0.8 %. La vegetación achaparrada (*Va*), se ubica en las zonas de protección ubicadas entre los 2700 y 3000 m.s.n.m.; esta cobertura es característica del ecotono entre los bosques de roble y la zona de páramo y representa el 1.6 % del área. La vegetación de páramo (*Vp*), representa el 2.1 % del área; se ubica en las zonas mas altas de la región, por encima de los 3000 m.s.n.m. y al igual que el bosque de roble y la vegetación achaparrada corresponde a una zona de protección. La clasificación de uso urbano (*U*) corresponde a las cabeceras de los municipios y representa el 0.3 % del área.

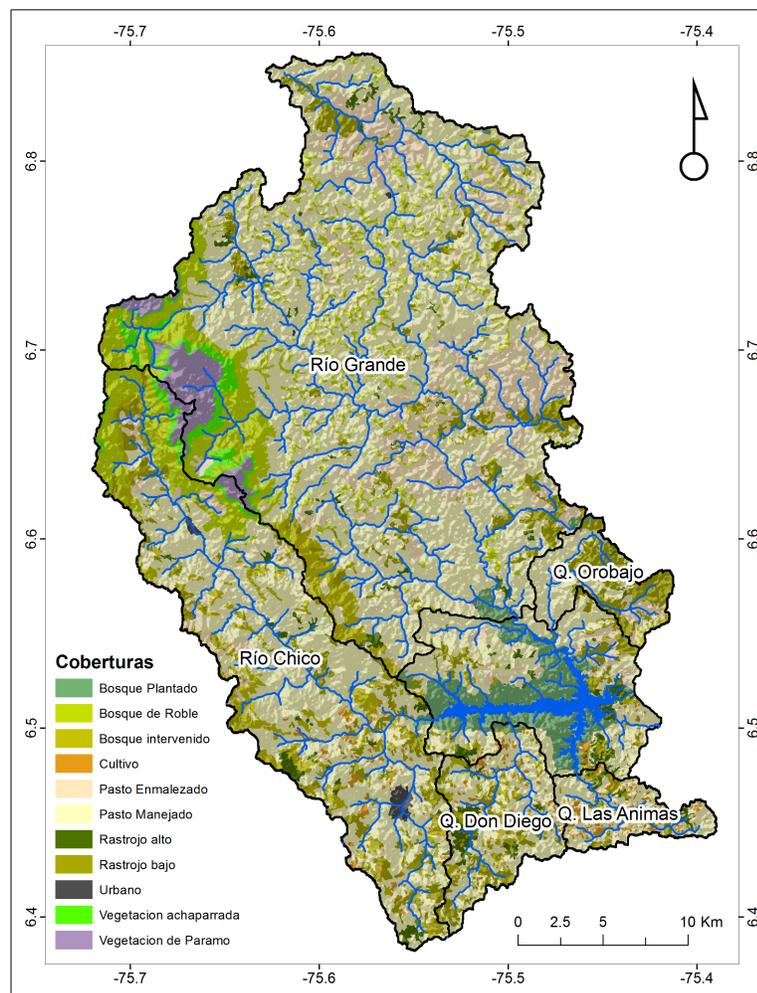


Figura 4.5.: Coberturas y usos del suelo.

Fuente: CORANTIOQUIA (2005)

4.6. Información hidroclimática

La información hidroclimática necesaria para la implementación del modelo fue proporcionada por Empresas Públicas de Medellín (*EPM*). La cuenca de Río Grande cuenta con una red de 17 estaciones de precipitación distribuidas en las diferentes subcuencas. Adicionalmente se cuenta con dos estaciones de aforo localizadas en la parte media del río Grande, y una más ubicada cerca a la salida del río Chico (Ver Figura 4.1).

4.6.1. Precipitación

Tabla 4.1.: Estaciones de precipitación

Nombre	Código	Norte	Este	Lluvia media (mm/año)
El Caribe	P-3025	6.78	-75.68	1891.80
San Andrés	P-1053	6.43	-75.44	1950.29
Santa Rosa	P-1054	6.64	-75.46	1873.09
Aragón	P-1055	6.78	-75.56	1887.53
El Chaquiro	P-1059	6.75	-75.49	1785.14
El Gómez	P-1072	6.74	-75.65	2032.17
Medina	P-1073	6.42	-75.53	1751.27
Belmira	P-1074	6.60	-75.67	1782.23
Entrerriós	P-1075	6.57	-75.52	1781.73
San Bernardo	P-1094	6.85	-75.57	1867.19
La Sierra	P-1101	6.56	-75.60	1757.34
El Tururo	P-1116	6.59	-75.57	1805.61
Los Atajos	P-1118	6.70	-75.52	1818.56
Cucurucho	P-1523	6.66	-75.52	1732.72
San Pedro RG-10	P-1522	6.50	-75.57	1667.07
El Botón RG-7	P-1706	6.67	-75.57	1766.97
Torre RG II	P-1793	6.49	-75.46	1736.76

Se cuenta con las series de precipitación de 17 estaciones, proporcionadas por *EPM*. Algunas estaciones se ubican en el interior de la cuenca de estudio y otras en cuencas vecinas cuya información es importante para mejorar los resultados en la interpolación espacial de la lluvia (Ver Figura 4.1).

En la Tabla 4.1 se presentan las características principales de las estaciones de lluvia. Para todas las estaciones se cuenta con series de precipitación en resolución horaria y un periodo de registro de 10 años que va desde enero de 2001 hasta diciembre de 2010.

Ciclo anual

En la Figura 4.6 se muestra el ciclo anual de la precipitación media en la cuenca, estimada mediante interpolación espacial. Los ciclos anuales en cada una de las estaciones se presentan en el Anexo A.

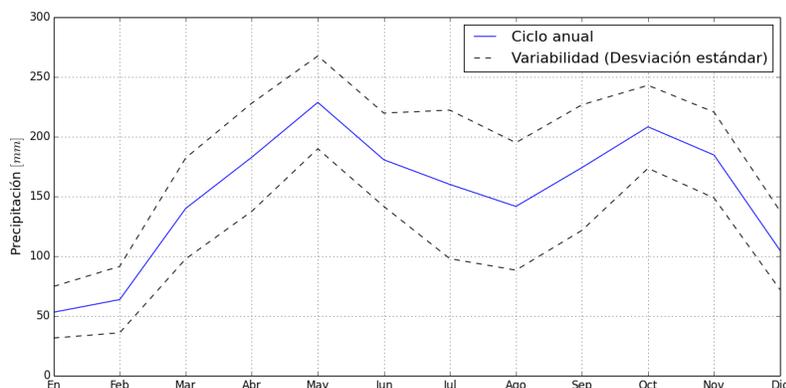


Figura 4.6.: Ciclo anual de precipitación media en la cuenca de Río Grande.
Fuente: *EPM*

La precipitación media en la región sigue un ciclo bimodal con dos periodos húmedos y dos periodos secos. Las temporadas de lluvias se presentan entre marzo y mayo, y entre septiembre y noviembre con precipitaciones medias entre 140.12 mm/mes y 228 mm/mes, y 174.28 mm/mes y 184.77 mm/mes, respectivamente. Los periodos secos se presentan entre diciembre y febrero, y entre junio y agosto con valores medios de lluvia entre 104.97 mm/mes y 63.80 mm/mes, y 180.80 mm/mes y 141.76 mm/mes de manera respectiva.

El ciclo anual de la lluvia presenta una alta variación, con desviaciones estándar que van desde 21.59 mm/mes en enero, hasta 62.16 mm/mes en julio. Durante el primer periodo seco (entre junio y agosto) se presenta la mayor variación del ciclo anual con desviaciones de 39.06 mm/mes en junio, 62.16 mm/mes en julio y 53.34 mm/mes en agosto. En algunas estaciones, el ciclo anual tiende a ser monomodal debido a la variación de la lluvia en la primera temporada seca (Ver Anexo A).

4.6.2. Caudal

En la zona de estudio se cuenta con 3 estaciones limnimétricas: Puente Belmira (Q-1707) , El Botón (Q-1706) y San Pedro (Q-1522) (Ver Figura 4.1). Las estaciones Puente Belmira (Q-1707) y El Botón (Q-1706) se localizan en la parte media del río Grande, la primera se ubica aguas abajo de la segunda. La estación San Pedro (Q-1522) se localiza cerca a la salida del río Chico, antes de la confluencia con la quebrada San Pedro.

En la Tabla 4.2 se presentan las características generales de las estaciones de registro de caudal. En todas las estaciones se cuenta con series de caudal en resolución horaria. Para las estaciones Puente Belmira (Q-1707) en río Grande y San Pedro (Q-1522) en río Chico se cuenta con un periodo de registro de 10 años que va desde enero de 2001 hasta diciembre de 2010. Para la estación El Botón (Q-1706) en río Grande, sólo se cuenta con los registros a partir de enero de 2004 pues los demás datos fueron descartados mediante un análisis de calidad.

Tabla 4.2.: Estaciones de caudal

Nombre	Corriente principal	Código	Norte	Este	Área (Km ²)	Caudal medio (m ³ /s)
Puente Belmira	Río Grande	Q-1707	6.65	-75.54	433.74	15.47
El Botón	Río Grande	Q-1706	6.67	-75.57	326.38	11.62
San Pedro	Río Chico	Q-1522	6.50	-75.57	153.62	5.01

Ciclo anual

En la Figura 4.7 se presenta el ciclo anual del caudal en las estaciones disponibles, tanto en río Grande, como en río Chico.

El ciclo anual de caudal se comporta de manera similar al ciclo de precipitación; sin embargo, el nivel en los ríos presenta un rezago de un mes respecto a la lluvia. Los periodos húmedos se presentan entre abril y junio, y entre octubre y diciembre. Los periodos secos se presentan entre enero y marzo, y entre julio y septiembre.

Durante la temporada más húmeda que se presenta entre octubre y diciembre el caudal medio varía entre 18.94 m³/s en octubre y 12.26 m³/s para la estación Puente Belmira (Q-1707), y entre 6.03 m³/s y 5.56 m³/s en los mismos meses para la estación San Pedro (Q-1522). La variación del gasto medio en El Botón (Q-1706), está entre 4.85 m³/s en octubre y 11.44

m^3/s en diciembre.

El periodo más seco se presenta entre enero y marzo. Durante esta temporada el caudal medio varía entre $9.61 \text{ m}^3/\text{s}$ en enero y $11.54 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo para Puente Belmira (Q-1707), hasta $3.40 \text{ m}^3/\text{s}$ $3.74 \text{ m}^3/\text{s}$, en los mismos meses para San Pedro (Q-1522). La variación del gasto medio en El Botón (Q-1706), está entre $3.40 \text{ m}^3/\text{s}$ en enero y $3.74 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo.

El ciclo anual del caudal presenta una variación menor respecto al caso de la precipitación, observándose un rango de variabilidad similar durante todo el año. Para la estación Q-1707 se presenta una desviación estándar al rededor de $5.03 \text{ m}^3/\text{s}$. Para la estación Q-1706 se presenta una desviación estándar al rededor de $3.82 \text{ m}^3/\text{s}$. Para la estación Q-1522 se presenta una desviación estándar al rededor de $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$.

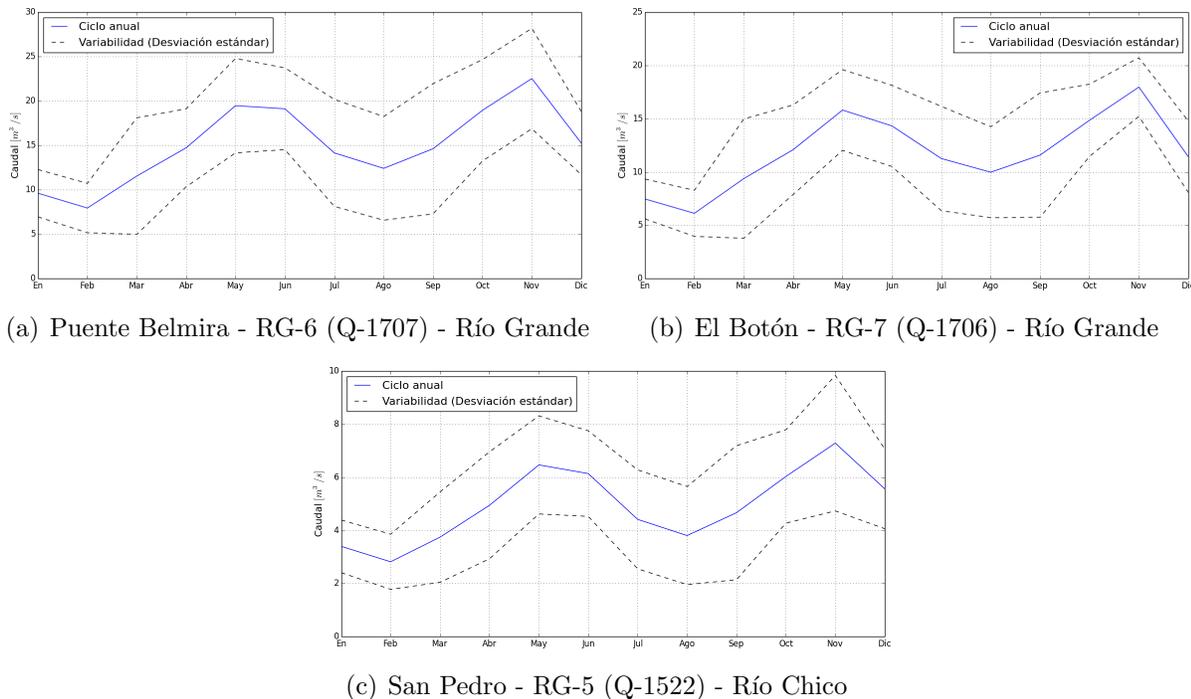


Figura 4.7.: Ciclo anual de caudal en las estaciones disponibles.

Fuente: *EPM*

4.7. Información sedimentológica

Para la calibración y validación del componente sedimentológico del modelo, idealmente se debe contar con mediciones simultáneas de caudal sólido y líquido en la misma resolución temporal. Sin embargo, esta información normalmente sólo se dispone en algunas cuencas experimentales. En el caso de estudio y en la mayoría de casos en el medio, es necesario

recurrir a información indirecta que permita validar de manera aproximada los resultados de la modelación.

Con el fin de obtener un estimativo de las tasas medias de producción de sedimentos en las cuencas del Río Grande, se recurre a la información de algunos aforos instantáneos de caudales líquidos y sólidos, y a los levantamientos batimétricos en el embalse.

4.7.1. Estudios relacionados

En 1995, la firma de ingeniería Integral S.A. presenta el informe técnico "Desarrollo Hidroeléctrico de Río Grande II. Estudio de Sedimentos", donde se recopilan y complementan diferentes estudios elaborados durante la etapa de diseño del embalse Río Grande II. El objetivo consiste en estimar las tasas de sedimentación en el embalse, y las tasas de denudación en el área afluente; para esto se llevó a cabo un programa intensivo de recolección y análisis de información de campo que permitió obtener información base sobre el transporte y las características de los sedimentos en el área de influencia del embalse (INTEGRAL, 1995). Pese a la fecha de realización del estudio, sus resultados se consideran relevantes debido a la metodología utilizada y la carencia de estudios más recientes.

Muestreo de sedimentos

En primer lugar, Integral S.A. recopiló la información disponible de aforos instantáneos de caudal y sedimentos en suspensión realizados entre 1957 y 1979; estos aforos se efectuaron en las antiguas estaciones limnimétricas El Templete RG-8 (Q-1708) situada sobre el río Grande y Río Chico RG-5 (Q-1505) situada sobre el río Chico. Ambas estaciones fueron suspendidas tras la construcción de la presa, pues la primera se ubicaba aguas abajo del embalse y la segunda en la parte media del mismo (Ver Figura 4.8). Para todos los aforos se disponía de curvas de distribución granulométrica del sedimento en suspensión, y en la mayoría de los muestreos sobre la estación El Templete RG-8 (Q-1708) se tomaron muestras de material del lecho.

Posteriormente, la firma continuó con los aforos en las estaciones Q-1708 y Q-1505, entre 1980 y hasta el inicio de la construcción del proyecto en 1982. Durante 1980 y 1994, se realizaron mediciones en las estaciones Puente Belmira - RG-6 (Q-1707) y El Botón - RG-7 (Q-1706), ubicadas sobre el río Grande. Los aforos se realizaron en forma regular utilizando muestreadores U.S. DH-48, adicionalmente se tomaron muestras de concentración durante crecientes con muestreadores I-25. En la Figura 4.8 se muestra la localización de los puntos de aforos instantáneos de caudal líquido y sólido, recopilados y realizados por Integral S.A. entre 1957 y 1994.

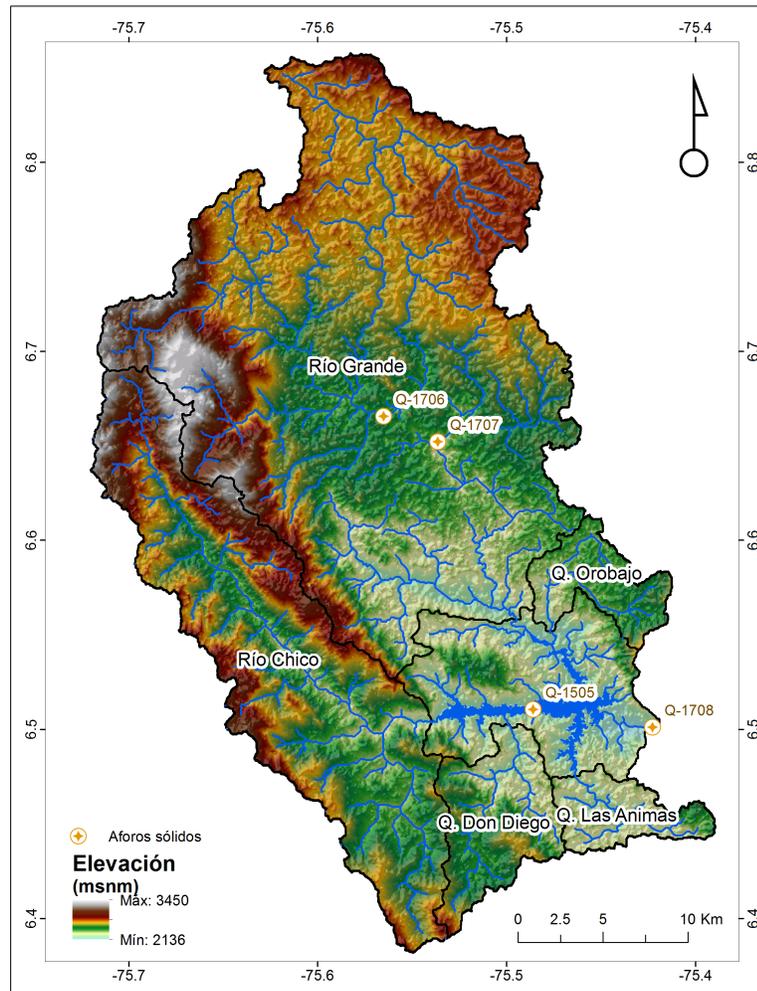


Figura 4.8.: Estaciones de aforos instantáneos de caudal líquido y sólido.
Fuente: INTEGRAL (1995)

Transporte de sedimentos

El cálculo del transporte de sedimentos para el diseño del embalse se basó en los aforos realizados sobre la estación El Templete RG-8 (Q-1708), por ser la que disponía de información más completa y estar situada cerca al sitio de presa.

Para efectos del cálculo del transporte, el sedimento se dividió de acuerdo con el tamaño del grano en material de lecho y carga lavada. Como carga lavada se consideró el sedimento con diámetro menor que el d_5 del material de lecho muestreado, el material de lecho por su parte fue constituido por los sedimentos con diámetros mayores.

Dado que el lecho del río Grande en la estación El Templete RG-8 (Q-1708) está conformado en un 90 % por arenas, el transporte total de material de lecho (de fondo y en suspensión),

incluyendo la zona no muestreada se estimó por los métodos de Toffaleti (Toffaleti, 1969), Einstein Modificado (U.S. Bureau of Reclamation, 1955) y Einstein Remodificado (Shen y Hung, 1983). Los transportes de material de lecho en suspensión estimados por medio de estas ecuaciones se compararon con los medidos y se determinó que el método de Einstein Remodificado produce los resultados mas razonables; consecuentemente se utilizó esta ecuación para estimar el transporte total de material de lecho.

El cálculo del transporte de carga lavada se basó en las mediciones de campo, separando el material fino (con diámetros menores al d_5) del material total medido tanto en los aforos de suspensión, como en las muestras recolectadas por los equipos I-25.

Finalmente, el transporte promedio anual de sedimentos en la estación El Templete RG-8 (Q-1708), se calculó mediante ecuaciones de correlación entre el caudal sólido y el caudal líquido, aplicadas a las curvas de duración de caudales diarios (Strand, 1975). Este procedimiento se realizó tanto para el transporte de material de lecho (de fondo y en suspensión) como para la carga lavada. Debido a que se presentó una deficiente correlación de la carga de lavado con el caudal, el ajuste para estas variables no fue obtenido mediante un método estadístico, sino que se hizo gráficamente dando mayor peso a los valores altos obtenidos durante las crecientes, por ser estas las responsables de la mayor proporción de transporte de material.

En la Tabla 4.3 se presentan los valores de los coeficientes α , y exponentes θ , que describen la relación potencial entre el caudal sólido Q_s [ton/día], y caudal líquido Q [m^3/s], para el transporte de material de lecho y la carga de lavado, en la estación El Templete RG-8 (Q-1708). Para el transporte de material de lecho se muestra también el coeficiente de determinación R^2 de la línea de ajuste.

Tabla 4.3.: Correlación caudal líquido y sólido en la estación Q-1708

Clase de transporte	α	θ	R^2
Carga de lavado	0.270	2.22	—
Material de lecho	0.004	3.25	0.78

Producción media de sedimentos

Teniendo en cuenta el área de drenaje de la cuenca de Río Grande, aguas arriba de la estación El Templete RG-8 (Q-1708) (1050.1 Km²) y suponiendo una erosión uniformemente distribuida, las tasas de transporte se expresan como producción media de sedimentos (Ver Tabla 4.4).

Tabla 4.4.: Producción media de sedimentos en la estación Q-1708

Clase de transporte	Producción de sedimentos [Mm ³ /año]	Porcentaje [%]
Carga de lavado	0.224	49 %
Material de lecho	0.238	51 %
Transporte Total	0.463	100 %

Se obtuvo un valor de producción media de sedimentos de 0.463 Mm³/año, equivalente a 0.440 mm/año (Suponiendo una densidad promedio del suelo de 1.6 ton/m³) para la cuenca de Río Grande, aguas arriba de la estación Q-1708. Estos valores se compararon con los datos de medidas batimétricas en otros embalses de Antioquia, en áreas geológicas similares a las del río Grande, concluyéndose que los resultados obtenidos son razonables como una primera aproximación del rendimiento de sedimentos en la cuenca.

Eficiencia de atrapamiento

Para evaluar la cantidad de sedimentos retenida por el embalse, se calculó la eficiencia de atrapamiento mediante los métodos de Brune y Churchill (U.S. Bureau of Reclamation, 1977). Por el método de Brune, para una relación capacidad - flujo promedio diario de 0.132 se obtuvo una eficiencia de atrapamiento entre el 82 % y el 95 % , y por el método de Churchill, para un índice de sedimentación de 1.91×10^8 s²/pie se obtuvo una eficiencia de atrapamiento del 95 %. Finalmente, se decidió considerar para la etapa de estudios, una eficiencia de atrapamiento del 95 %.

4.7.2. Información batimétrica

Se cuenta con levantamientos batimétricos del Embalse Río Grande II realizados por *EPM* en octubre de 2001, diciembre de 2003, junio de 2006, septiembre de 2008 y agosto de 2010. Los mapas de niveles batimétricos fueron proporcionados en formato ASCII con una resolución de 5 m. Estos mapas se presentan en la Figura 4.9.

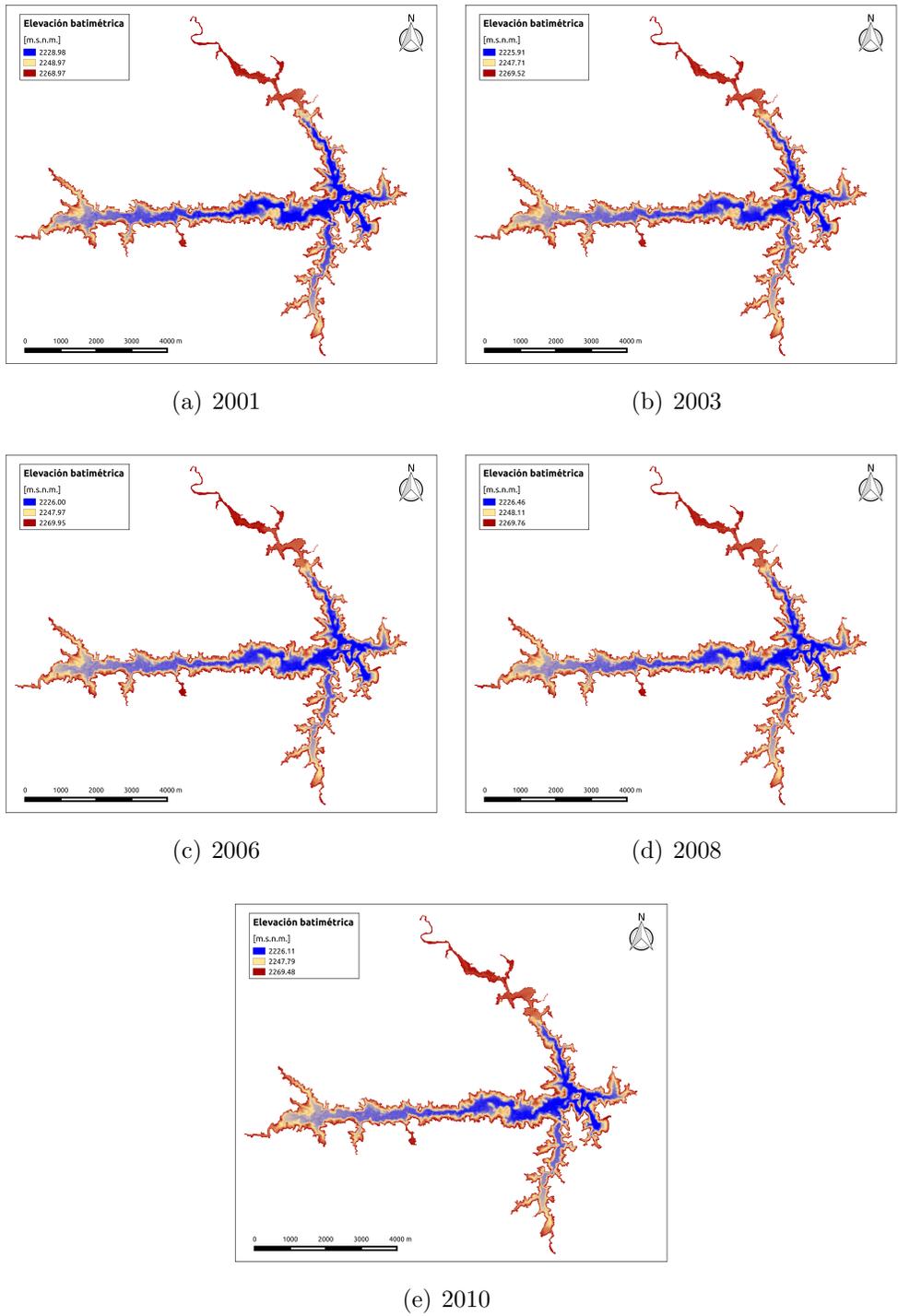


Figura 4.9.: Niveles batimétricos en el embalse Río Grande II
Fuente: *EPM*

Depósito de sedimentos

A partir de los mapas batimétricos se estima la capacidad máxima del embalse. En la Tabla 4.5 se muestra el volumen máximo para cada campaña batimétrica, con base en un nivel de 2.270 m.s.n.m. equivalente a la cota de vertimiento del embalse. En la Figura 4.10 se presenta esta información de manera gráfica.

Tabla 4.5.: Capacidad máxima del embalse en cada campaña batimétrica.

Año	Volumen [Mm^3]
2001	241.82
2003	240.84
2006	238.88
2008	238.92
2010	236.61

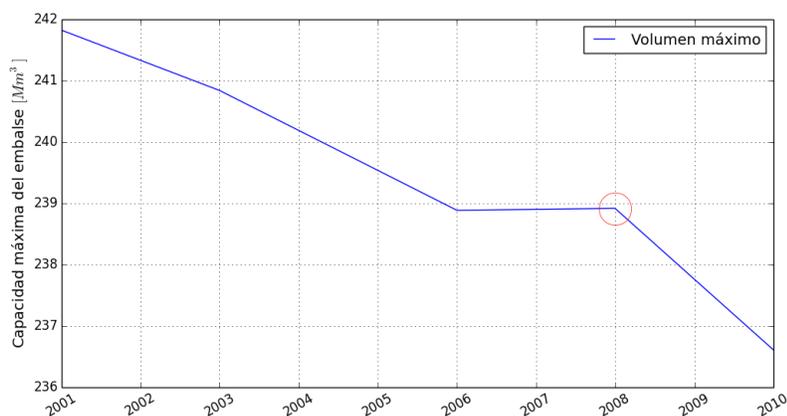


Figura 4.10.: Cambios en la capacidad máxima del embalse.

Fuente: *EPM*

Con base en los datos del volumen máximo en el embalse (Ver Tabla 4.5) se estiman los volúmenes y tasas de depositación de sedimentos para cada periodo entre batimetrías. Los resultados se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6.: Depósito de sedimentos en el embalse

Periodo	Volumen [Mm^3]	Tasa [$Mm^3/año$]
2001-2003	0.98	0.49
2003-2006	1.95	0.65
2006-2008	-0.03	-0.01
2008-2010	2.30	1.15
2006-2010	2.27	0.57

De los resultados anteriores se observa que existe un problema con los niveles batimétricos del los año 2008. En la Figura 4.10 se nota que el volumen de agua máximo en el embalse es mayor que el correspondiente a la campaña de 2006; esto quiere decir que la tasa de acumulación de sedimentos en el periodo 2006-2008 es negativa (Ver Tabla 4.6), lo cual no es posible bajo las condiciones actuales de operación, donde no se realiza remoción de los sedimentos.

Estas inconsistencias pueden deberse a múltiples factores como errores en la medición, la calibración y la resolución de los equipos, y al procesamiento de la información. Debido a esta situación la información batimétrica de 2008 se descartó, de manera que los periodos 2006-2008 y 2008-2010 fueron excluidos del análisis. Se incluye el periodo 2006-2010, donde se estimó un volumen de $2.27 Mm^3$, correspondiente a una tasa de sedimentación de $0.57 Mm^3/año$ (Ver Tabla 4.6).

Producción de sedimentos en el área afluente del embalse

Teniendo en cuenta el área total de drenaje del embalse ($981.75 Km^2$), una eficiencia de atrapamiento del 95% (INTEGRAL, 1995) y suponiendo una erosión uniformemente distribuida, las tasas de depositación para los periodos de interés (Tabla 4.6) se expresan como tasas de producción de sedimentos en el área afluente del embalse tal como se muestra en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7.: Producción de sedimentos en el área afluente del embalse

Periodo	Tasa [Mm³/año]
2001-2003	0.52
2003-2006	0.69
2006-2010	0.56
Promedio	0.60

Estos valores son cercanos a la tasa de denudación estimada por INTEGRAL (1995) durante la etapa de diseño, la cual corresponde a 0.463 Mm³/año (Ver Tabla 4.4). De conformidad, estos resultados se consideran como un valor aproximado de la producción de sedimentos en la zona de estudio y serán utilizados para la calibración y validación del componente sedimentológico del modelo.