

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS SEDIMENTOS EN LA
CUENCA DEL EMBALSE LA FE**

**FELIPE LONDOÑO GONZÁLEZ
SANTIAGO ZAPATA HENAO**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniería civil

**WINSTON CUÉLLAR MÁRQUEZ
MAGISTER EN INGENIERÍA
PROFESIONAL AMBIENTAL EPM**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2013**

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias mil gracias por toda su disposición apoyo y recursos, por brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente en una de las mejores universidades del país.

Agradecemos a Empresas Públicas de Medellín por creer en nuestro proyecto y por poner a nuestra disposición todos los recursos necesarios para la culminación de este trabajo.

A nuestro director el ingeniero Winston Cuéllar y nuestros asesores los ingenieros José Enrique Londoño y Paula Lizet Correa, los más gratos agradecimientos por toda su entrega, compromiso, disposición y apoyo, nos brindaron las bases para comenzar y el acompañamiento en todo este proceso que culminó con éxito.

A los ingenieros Paola Roldán, Lorena Osorio, Natalia Uribe y Jefferson Valencia, mil gracias por su disposición y aportes en nuestro trabajo.

A nuestra institución gracias por formarnos con tan alta calidad, por brindarnos todas las competencias necesarias para enfrentarnos al medio que cada vez es más competitivo.

Gracias, sin ustedes nada hubiera sido posible.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1 PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos del proyecto	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Marco de referencia.....	15
1.3.1 Proceso de producción	15
1.3.2 Proceso de transporte	16
1.3.3 Proceso de sedimentación	17
1.3.4 Métodos de estimación de la producción de sedimentos	18
2 METODOLOGÍA.....	28
3 DESARROLLO DEL PROYECTO	29
3.1 Generalidades	29
3.1.1 Localización.....	29
3.1.2 Descripción del sistema.....	29
3.1.3 Geología.....	32
3.1.4 Modelo de elevación digital	32
3.1.5 Reconocimiento de la zona	35
3.2 Estimación del potencial erosivo mediante la implementación del modelo SWAT. 37	
3.2.1 Variables del modelo	37
3.2.2 Unidades de respuesta hidrológica.....	46
3.2.3 Variables que influyen en la producción de sedimentos.....	48
3.2.4 Calibración del modelo	50
3.2.5 Resultados del modelo	52
3.3 Diagnóstico del sistema.....	54
4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	59

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	61
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS	66

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de tamaño para la estructura del suelo.	22
Tabla 2. Código permeabilidad.	22
Tabla 3. Factor P_{USLE} según la pendiente del terreno.	23
Tabla 4. Factor P_{USLE} según el tipo de cosecha.	23
Tabla 5. Factor P_{USLE} para las terrazas cultivadas.	24
Tabla 6. Valores referenciales del criterio Nash-Sutcliffe (CABRERA, 2011).	27
Tabla 7. Información general de las estaciones hidroclimáticas utilizadas.	39
Tabla 8. Coberturas vegetales de la cuenca del embalse La Fe.	42
Tabla 9. Características físico – químicas de los suelos en la cuenca La Fe.	44
Tabla 10. Resultado análisis de sensibilidad.	49
Tabla 11. Cantidad de sedimentos observados y modelado.	52
Tabla 12. Información general de las batimetrías en el embalse La Fe durante el periodo de análisis.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista panorámica del embalse La Fe, se observa la cantidad de sedimentos provenientes de todos sus afluentes (Empresas Públicas de Medellín, 2008).	13
Figura 2. Proceso de producción, transporte y deposición de sedimentos en una parcela de suelo (GARCÍA FLORES & MAZA ÁLVAREZ, 2007).	15
Figura 3. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse (GRACIA SÁNCHEZ, 2000).	17
Figura 4. Metodología de la calibración.	27
Figura 5. Localización cuenca del embalse La Fe.	29
Figura 6. Mapa del sistema de abastecimiento de agua potable operado por EPM.	30
Figura 7. Esquema general de bombeo en el embalse La Fe.	31
Figura 8. Torre de captación embalse La Fe.	31
Figura 9. MDT de la cuenca del embalse La Fe.	33
Figura 10. Perfiles.	34
Figura 11. Curva hipsométrica cuenca embalse La Fe	34
Figura 12. Acumulación de sedimentos por actividades mineras. (EPM, 2013)	35
Figura 13. Intervenciones antrópicas en la parte alta de la cuenca.	36
Figura 14. Ladera sana de la cuenca, cerca al embalse La Fe (EPM, 2013).	36
Figura 15. Localización de las estaciones.	38
Figura 16. Ciclo anual de la precipitación promedia en la cuenca.	40
Figura 17. Ciclo anual de las estaciones disponibles en la zona de estudio para el periodo (1995 – 2013).	41
Figura 18. Ciclo anual de los caudales medios en las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo (1995-2013).	42
Figura 19. Subcuencas del embalse La Fe.	46
Figura 20. Unidades de respuesta hidrológica.	47
Figura 21. Cuadro de dialogo análisis de sensibilidad	48
Figura 22. Caudales simulados vs observados, quebrada Las Palmas.	50
Figura 23. Caudales simulados vs observados, quebrada Espíritu santo.	50
Figura 24. Sedimentos observados vs simulados.	51
Figura 25. Producción de sedimentos anual por cada HRU en la cuenca.	53
Figura 26. Sedimento, coberturas vegetales y pendientes.	54

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 27. MDT 2012.....	56
Figura 28. Sedimentación en el embalse.....	57

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Modelos hidrológicos.....	66
Anexo B. Información de las estaciones.	66
Anexo C. Calibración sedimentos.	66
Anexo D. Calibración de caudales.	66

RESUMEN

En el embalse La Fe, proyecto diseñado y construido para suministrar agua potable a gran parte de la población ubicada en el Área Metropolitana, se han encontrado, según las batimetrías realizadas por Empresas públicas de Medellín (EPM) en años anteriores, algunos bancos de sedimentos que superan el metro de espesor en las confluencias de las quebradas Espíritu Santo y Las Palmas por la cola del embalse, y en la quebrada Potreritos que desemboca por el costado occidental justo en dirección a la torre de captación, zona intermedia del embalse. La acumulación de estos depósitos no afecta solamente en la calidad del agua sino también la vida útil del embalse, que en caso de perderse totalmente, afectaría el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Medellín.

Para contribuir con la solución del problema es necesario caracterizar la cuenca y conocer las posibles causas que inciden en la producción de sedimentos; como son las actividades antrópicas, la pérdida de coberturas vegetales, las condiciones topográficas, entre otros. Así mismo se debe estudiar cómo se está distribuyendo espacialmente la producción de sedimentos en la cuenca, para establecer las zonas y definir las variables más representativas en la producción de sedimentos, lo que permite tener herramientas para establecer medidas de manejo más adecuadas.

En este estudio se pretende estimar el potencial erosivo en la cuenca del embalse La Fe e identificar las variables más incidentes en este proceso. El desarrollo del objetivo se llevará a cabo en 4 etapas, que incluyen la recolección de información y revisión bibliográfica, la caracterización de la cuenca, la estimación y la distribución espacial de la producción de sedimentos por medio del modelo SWAT, el análisis de sensibilidad de las variables más incidentes en la producción de sedimentos, la calibración del modelo de sedimentos a partir de los resultados de las batimetrías realizadas por EPM desde el año 1997 hasta el 2012 y finalmente la integración del proceso de producción en la cuenca con el de sedimentación en el embalse.

Resulta de gran utilidad el énfasis de este tipo de estudios en los embalses, ya que la producción de sedimentos es una variable directamente relacionada con la vida útil de cualquier proyecto de suministro de agua potable o hidroeléctrico y sería un aporte a las empresas como EPM que aprovechan estos sistemas para una adecuada gestión del recurso hídrico.

INTRODUCCIÓN

La construcción de embalses es una práctica milenaria que algunos investigadores atribuyen su origen a la cultura Romana desde finales del siglo I, construidos principalmente para resolver problemas de inundaciones y para el riego de cultivos agrícolas. Con el tiempo, el crecimiento de la población y los desarrollos industriales introdujeron otros usos como la provisión de agua para grandes centros poblados y la generación de energía hidroeléctrica, entre otros.

La duración de estas estructuras es muy variable y depende de múltiples factores, siendo la sedimentación uno de los más importantes en la determinación de su vida útil. Así mismo la construcción de un embalse generalmente tiene asociados unos costos económicos muy altos y la generación de impactos ambientales significativos que la sociedad debe asumir para garantizar la provisión de los servicios básicos de acueducto y energía, al tiempo que los propietarios de estas estructuras deben implementar las medidas de manejo que garanticen la permanencia y prolongación de su vida útil para evitar los costos económicos, ambientales y sociales que generaría la construcción de embalses sustitutos.

El embalse la Fe situado a 32 km al oriente de la ciudad de Medellín, fue construido en el año 1973 para garantizar el suministro de agua potable a los habitantes de la ciudad y posteriormente a los 9 municipios que hoy conforman el área Metropolitana. Su vida útil está definida desde su diseño para 50 años, es decir hasta 2023. No obstante, las experiencias a nivel mundial han demostrado que con un buen mantenimiento de las estructuras asociadas al embalse y un manejo adecuado de la cuenca, estos embalses pueden prolongar significativamente su vida útil, como por ejemplo el embalse Piedras Blancas que entró en operación en 1928, Guadalupe I que entró en 1932, entre otros que hasta la fecha continúan con su normal operación.

Desde hace algunos años se ha observado una acumulación creciente de sedimentos en algunas zonas del embalse La Fe y se han realizado algunas mediciones por parte de EPM, propietaria del embalse, además se vienen realizando estudios que servirán de base para identificar medidas de manejo. Sin embargo la mayoría de estos estudios se concentran en el embalse, dejando de lado la cuenca y desconociendo su importancia como principal aportante de sedimentos al embalse.

En este trabajo se presenta inicialmente el análisis de la problemática del embalse La Fe partiendo de un reconocimiento de campo, del inventario de toda la información disponible en EPM y de un referenciamiento de experiencias similares en otras latitudes, con base en lo cual se define el objetivo general y tres objetivos específicos.

Seguidamente se presenta el marco conceptual que le permite al lector comprender la naturaleza y el ciclo de vida de los sedimentos, es decir desde el momento en que se producen y las formas de transporte hasta que se depositan y se acumulan en los ríos y embalses.

Se encontrará también una recopilación de los modelos más utilizados internacionalmente para el estudio de la sedimentación y la descripción del modelo SWAT (Soil and Water

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Assessment Tool), seleccionado para éste estudio y los anexos con toda la información que requiere el modelo para adaptarlo a las condiciones particulares de la cuenca del embalse La Fe.

Como producto de este estudio y de la caracterización de la cuenca se identifican las principales causas de la sedimentación y localización de las zonas con mayor potencial erosivo, así mismo, las actividades antrópicas relacionadas con la dinámica de la sedimentación y las variables más incidentes en la producción de sedimentos.

Como valor agregado de este trabajo se presenta el modelo SWAT calibrado en sus módulos; hidrológico y de sedimentos para las condiciones específicas del embalse La Fe. Este modelo, a pesar de ser una de las herramientas más aplicadas a nivel internacional no tiene antecedentes conocidos en Colombia de su aplicación y calibración para el tema de sedimentos en embalses.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1 PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El embalse La Fe actualmente abastece de agua para consumo humano gran parte de la población ubicada en el Área Metropolitana y se espera mantener en condiciones adecuadas para garantizar la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras.

La disponibilidad del recurso puede verse afectada por muchos factores, uno de ellos es la sedimentación, proceso que ha ocurrido desde hace algunos años en el embalse La Fe con la detección de bancos de sedimentos en la confluencia de las quebradas Espíritu Santo, Las Palmas y Porteritos, principales afluentes del embalse.

Es sabido que la presencia de sedimentos en un embalse produce alteraciones en algunas variables físicas, químicas y biológicas que impactan el ecosistema y la calidad del agua. Dichos cambios en la calidad del agua que se capta hacen necesario que se tengan que aplicar productos químicos para poder cumplir con los estándares de calidad del agua para consumo humano, exigidos en la Norma Colombiana (decreto 1575 de 2007). Adicionalmente, el sedimento contenido en el agua tiene un efecto abrasivo que acorta la vida útil de las turbinas con las que se genera energía en la Ayurá, una pequeña central hidroeléctrica (PCH), ubicada en el municipio de Envigado. Lo anterior ha generado sobrecostos en el tratamiento del agua para consumo humano y en la operación y mantenimiento de la PCH.

Por otra parte, la acumulación de sedimentos en el embalse reduce su vida útil y puede llegar a comprometer la oferta hídrica para las poblaciones que abastece. En caso de que se presenten tasas altas de sedimentación o en el peor de los casos, de llegar a colmatarse el embalse podría volverse inoperante y demandaría el estudio y desarrollo de nuevas alternativas de abastecimiento con unos costos económicos y ambientales muy superiores a los que pudiera demandar el manejo de la problemática actual.

De acuerdo con los resultados de las batimetrías realizadas por EPM, se han observado depósitos de sedimentos que varían entre 1,0 m y 1,5 m de espesor en las confluencias de las quebradas Espíritu Santo y Las Palmas por la cola del embalse, y en la quebrada Potreritos que desemboca por el costado occidental justo en dirección a la torre de captación, zona intermedia del embalse, esto se evidencia en la Figura 1 (EPM; Subgerencia Ambiental, 2013).

Para avanzar en la solución del problema es necesario caracterizar la cuenca y conocer las actividades antrópicas que pueden incidir en la sedimentación del embalse, tales como la construcción de proyectos urbanísticos del Valle de San Nicolás y del alto de Las Palmas, la pérdida de coberturas vegetales, la posible disminución del caudal de las cuencas por afectación de los acuíferos, el incremento o activación de procesos erosivos por las altas pendientes de la cuenca y el aumento de la escorrentía.

Una vez caracterizada la cuenca se podrá entonces estudiar cómo se están distribuyendo espacialmente los sedimentos en la cuenca, no sólo para establecer las zonas más aportantes del área, sino también para analizar las características que se presentan en estas zonas, con el fin de diagnosticar las variables más incidentes en la producción de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sedimentos, a partir de las cuales se pueda abordar en una fase posterior, la identificación de posibles medidas de manejo.



Figura 1. Vista panorámica del embalse La Fe, se observa la cantidad de sedimentos provenientes de todos sus afluentes (Empresas Públicas de Medellín, 2008).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Analizar la variabilidad espacial de la producción de sedimentos en la cuenca del embalse La Fe y su relación con la sedimentación en el embalse.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar el potencial erosivo de la cuenca para definir las zonas con mayor aporte.
- Determinar las variables con mayor influencia en la producción de sedimento mediante un análisis de sensibilidad.
- Diagnosticar el estado actual del sistema cuenca embalse, integrando la información obtenida en la cuenca con el análisis de la información batimétrica histórica del embalse.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

Para analizar la variabilidad espacial de la producción de sedimentos en la cuenca de un embalse y su relación con la sedimentación, es necesario adoptar una visión global del sistema y comprender cada uno de los procesos a los que se ve sometido el sedimento: producción, transporte y finalmente depositación, como se ve en la Figura 2.

Los sedimentos son partículas procedentes de las rocas o suelos, que son transportadas por el agua y por el viento. Todas estas partículas, son finalmente depositadas a lo largo del cauce, en lagos o lagunas, en el mar o en las partes bajas de la cuenca, principalmente en zonas planas. (GARCÍA FLORES & MAZA ÁLVAREZ, 2007).

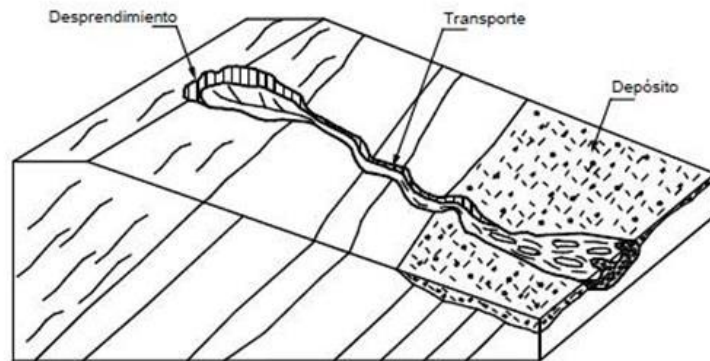


Figura 2. Proceso de producción, transporte y depositación de sedimentos en una parcela de suelo (GARCÍA FLORES & MAZA ÁLVAREZ, 2007).

1.3.1 Proceso de producción

No es posible indicar con precisión todas las fuentes de producción de los sedimentos que llegan a un afluente y que son transportados por su corriente. Sin embargo, la fuente principal la constituyen los suelos y rocas que se encuentran en su cuenca, el agua y el viento son en nuestro medio, los principales agentes de erosión y de transporte. Existen muchas formas de clasificar las fuentes de los sedimentos, García y Maza lo clasifican según su origen y el impacto del hombre en: naturales y artificiales (GARCÍA FLORES & MAZA ÁLVAREZ, 2007).

Las fuentes naturales son:

- Erosión por el viento: ocurre cuando los suelos sin cobertura vegetal son expuestos a altas velocidades del viento. Se presenta en su mayoría en zonas con baja precipitación fluvial.
- Erosión por gotas de lluvia: el impacto de las gotas de agua en suelos sin cobertura vegetal produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas del suelo.
- Erosión laminar: desprendimiento y transporte en capas bien definidas de suelo por acción de la escorrentía. Las áreas de cultivos no permanentes son las más susceptibles.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Erosión en surcos: la concentración de flujo superficial sobre una pendiente produce erosión formando pequeños canales: este tipo de erosión es el mayor causante de producción de sedimentos. La clasificación de los surcos depende de su profundidad, estos canales son llamados surcos hasta que alcanzan una profundidad no mayor de 30 cm.
- Erosión en cárcavas: la unión de varios surcos o al profundizarse y ampliarse cada uno de éstos forman una cárcava. Las zonas de alta pendiente y mantos de suelo de gran espesor son las áreas más susceptibles a la formación de cárcavas.
- Erosión interna: incluye el transporte de partículas en solución, suspensión y arrastre a través de cavernas o ductos a lo largo de cimentaciones. Algunos de los factores que generan este proceso de erosión son la presencia de rellenos no compactados, la desaparición de la cobertura vegetal, el agrietamiento por cambios en la humedad, etc.
- Erosión del cauce principal y sus tributarios: los ríos transportan material de distintos tamaños, depositándolos a lo largo de su longitud en una forma graduada, dependiendo de la velocidad de su corriente.
- Movimientos naturales del terreno: al presentarse deslizamientos de grandes masas, sea de tierra o de roca, queda material suelto y sin protección. Este material por la acción de la lluvia y el viento es transportado hacia las corrientes.

Las fuentes artificiales son:

- Destrucción de la vegetación: las actividades que producen más sedimentos al privar al suelo de su manto protector y dejarlo a disposición del agua, son realizadas por el hombre, algunas de ellas son: abrir terrenos para los cultivos, quema indiscriminada de bosques, desmonte y descapote, etc.
- Obras de ingeniería: la construcción de caminos, carreteras, vías férreas, presas, plantas industriales, ciudades, etc, para el desarrollo de una región, genera que muchos de los materiales, al ser removidos, queden expuestos y sean transportados hacia las corrientes y cuerpos de agua.
- Explotación de minas y canteras: al romper y fracturar rocas y suelos, se produce una gran cantidad de partículas pequeñas o polvo, ocasionando así, grandes cantidades de material suelto.
- Desechos urbanos e industriales: son los materiales arrojados a los ríos y lagos, que son transportados por el drenaje.

En esta tesis se pretende estimar el potencial erosivo asociado a la erosión laminar.

1.3.2 Proceso de transporte

Los sedimentos, luego de ser producidos por algunos de los factores indicados anteriormente, son transportados por una corriente para luego ser depositados. El transporte puede clasificarse según su mecanismo y según el origen de los sedimentos.

Según el mecanismo de transporte se clasifican en (SILVA M, 2003):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Los sedimentos en suspensión, los cuales son los más finos que llegan a la corriente. En su mayoría por el lavado de material suelto.
- En estado de saltación, se produce por causa de las irregularidades en el fondo, la carga de fondo sube y se mantiene en suspensión por periodos cortos.
- Los sedimentos de fondo, son la carga más sólida, materiales más gruesos y sedimentos que conforman el lecho. Son transportados por procesos de remoción de masas.

Según el origen de los sedimentos, se clasifican en (UNIVERSIDAD DEL CAUCA, 2003):

- Carga de lavado, tiene su origen por la erosión producida en la cuenca hidrográfica y eventualmente en las laderas del cauce. Está formada por partículas muy finas que son mantenidas fácilmente en suspensión.
- Material de lecho, tienen su origen en el lecho del cauce, generalmente la carga es granular como piedras, gravas y arenas.

En esta tesis se pretende estimar la carga de lavado potencial, generada por la lluvia y transportada por la esorrentía.

De los totales de erosión que se producen en el mundo, cerca de 1/4 a 1/3 de los sedimentos se transportan hasta el mar y los demás se depositan en los planos de las inundaciones, los canales de los ríos, los lagos, y los embalses (SUÁREZ DÍAZ, 2001).

1.3.3 Proceso de sedimentación

El sedimento que llega al embalse, se deposita formando un delta de sedimento como se muestra en la Figura 3. Típicamente, las partículas más gruesas, que se depositan inmediatamente, llegan al embalse. Las partículas más finas, siguen una corriente de densidad, formando una turbidez para luego depositarse (GRACIA SÁNCHEZ, 2000).

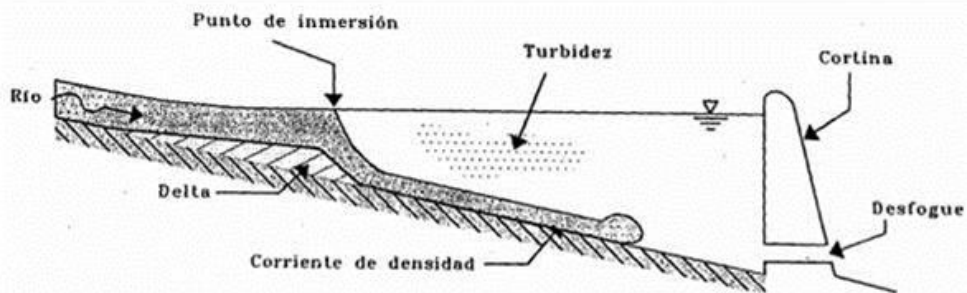


Figura 3. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse (GRACIA SÁNCHEZ, 2000).

Una de las formas de medir como se están depositando los sedimentos que llegan al embalse, es a través de levantamientos o sondeos batimétricos. Estos son procedimientos que consisten en determinar la topografía del fondo del embalse o del lecho de las corrientes de agua. Este trabajo puede realizarse para diferentes objetivos como son determinar la capacidad de almacenamiento del cuerpo de agua, conocer en cualquier sitio la configuración general del fondo del embalse, determinar el avance de los depósitos de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sedimentos o evaluar procesos de sedimentación, mediante comparación entre sondeos de épocas diferentes. Este trabajo, usualmente se complementa con el levantamiento de secciones a vadeo, en los ríos y quebradas principales afluentes al embalse en las cabeceras del mismo.

En los últimos 35 años, desde 1997, EPM ha realizado 7 sondeos batimétricos con el objetivo de monitorear la evolución en la capacidad útil mediante comparaciones sucesivas.

La información batimétrica será utilizada en este trabajo para la calibración del modelo SWAT, los trabajos anteriores en el embalse La Fe apoyados en el modelo SWAT, hacen referencia a la calibración de modelo solo a partir de variables hidrológicas. Se busca realizar la calibración del modelo a partir de las variables hidrológicas y de las incidentes en la producción de sedimentos, así mismo, se utilizará para evaluar la evolución de la distribución de los sedimentos en el embalse y como información de apoyo para establecer la relación entre producción de sedimentos en la cuenca y la sedimentación en el embalse.

1.3.4 Métodos de estimación de la producción de sedimentos

A lo largo de la historia se han venido implementando diversos modelos matemáticos que facilitan la evaluación de pérdida de suelo por erosión a diferentes escalas, incluso apoyados por entidades como la Agencia de Protección Ambiental (USEPA), el Departamento de Agricultura (USDA) de los EE.UU. y por la Unión Europea (DUMAS SALAZAR, 2012).

Estos modelos de erosión se clasifican en tres grupos dependiendo de la forma matemática como estén expresados los fenómenos físicos:

1. Modelos empíricos: Se basan en el análisis estadístico de datos obtenidos mediante observación. Son generalmente los más sencillos de aplicar.
2. Modelos conceptuales: Representan la erosión partiendo de una serie de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas.
3. Modelos de base física: Basados en leyes físicas que controlan las relaciones entre los parámetros y los procesos observados.

En el Anexo A se resumen algunos de los modelos comúnmente utilizados en la estimación de la producción de sedimentos (DUMAS SALAZAR, 2012).

Estos modelos han sido ampliamente utilizados y los resultados obtenidos con su aplicación son buenos. Casi todos estos están basados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual ha tenido diversas modificaciones, que han surgido de la necesidad de muchos autores de acercarse más a la realidad.

Esta ecuación o modelo base, además de haber sido modificada, ha sido computarizada en modelos que permiten calcular automáticamente la producción de sedimentos con todo el proceso hidrológico y con la capacidad de modelar escenarios con el fin de estimar la respuesta de una cuenca ante posibles eventos.

El SWAT es uno de los modelos más utilizados para la estimación de sedimentos en una cuenca grande y es el modelo a utilizar para desarrollar el estudio.

1.3.4.1 SWAT

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Según el informe realizado por Blackland Research Center o Texas Agricultural Experiment Station en el año 2005, se describió el modelo SWAT de la siguiente manera (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005):

El SWAT (Soil and Water Assessment Tool), fue desarrollado para predecir el impacto en el manejo del agua, sedimentos y químicos agrícolas en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, usos y manejos en un tiempo prolongado. Este modelo trabaja a escala temporal diaria y presenta las siguientes características:

- Modelo conceptual en el cálculo de caudales debido a que usa el balance hídrico, en la parte del cálculo de sedimentos, se asemeja a un modelo empírico ya que usa la ecuación empírica MUSLE.
- Opera en grandes cuencas
- De tiempo continuo y simula grandes períodos
- Se basa en datos de entrada disponibles

Para mayor precisión en la estimación de sedimentos y de caudales presentes, el modelo divide la cuenca en pequeñas subcuencas y para mayor facilidad y exactitud en los cálculos, trabaja con Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) que corresponden al cruce de los diferentes tipos de suelos, con las posibles coberturas vegetales y usos del suelo (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005).

Los datos de entrada al modelo son:

- Topografía – DEM
- Suelos: textura, profundidad, conductividad, hidráulica, etc.
- Uso del suelo: vegetación, sectores urbanos.
- Manejo: uso de fertilizantes, tipo de labranza, número de cabezas de ganado.
- Datos de caudal de ríos y salidas de represas.
- Fuentes de contaminación puntuales.

Datos meteorológicos:

- Precipitación
- Temperatura del aire
- Velocidad del viento
- Humedad relativa
- Radiación solar

1.3.4.1.1 Cálculo de caudales

El modelo utiliza el balance hídrico para calcular la cantidad de agua que entra a la cuenca, la cantidad que sale y lo que almacena. Lo calcula de la siguiente manera:

$$SWt = Sw + \sum_{i=1}^t (Ri - Qi - ETi - Pi - QRi)$$

Donde,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- SW_t , es el contenido de agua en el suelo en el día t
- Sw , es el agua aprovechada por las plantas
- t , es el tiempo en días
- R , es la precipitación diaria
- Q , es la cantidad de escorrentía diaria
- ET , es la evapotranspiración diaria
- P , es la percolación diaria
- QR , es el flujo de retorno

Todas las variables se miden en milímetros.

La escorrentía es calculada con base en datos diarios de lluvia y está determinada por el tipo de suelo, la cobertura vegetal y el uso o manejo que a este se le dé. La manera para calcularla se fundamenta en la metodología del Número del Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

El agua infiltrada en el suelo puede comportarse de varias maneras; puede simplemente contribuir con la humedad del suelo, fluir subsuperficialmente como flujo lateral hasta desembocar en canales de drenaje o almacenarse en los acuíferos más profundos. El modelo incluye flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

Para estimar la evapotranspiración potencial, el modelo ofrece tres métodos que difieren entre sí en los datos de entrada necesarios para la estimación, la decisión de cual metodología emplear depende de la información disponible.

En caso de no tener información de precipitación y de humedad, el modelo tiene la capacidad de simularlas, no es recomendable debido a la incertidumbre y a la imprecisión de los resultados que arroja el modelo.

1.3.4.1.2 Producción de sedimentos

El modelo calcula la producción de sedimentos para cada Unidad de Respuesta Hidrológica con la ecuación modificada de la pérdida universal de suelo (MUSLE).

$$sed = 11.8 * (Q_{surf} * Q_{peak} * \text{Área}_{HRU})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG$$

Donde,

- Sed , es la cantidad de sedimentos producidos en un día (t)
- Q_{surf} , es el volumen de escorrentía superficial (mm/ha)
- Q_{peak} , es la tasa de escorrentía pico (m^3/s)
- Área_{HRU} , es el área de la Unidad de Respuesta Hidrológica (ha)
- K_{USLE} , es el factor K USLE de erodabilidad
- C_{USLE} , es el factor C USLE de manejo de cobertura
- P_{USLE} , es el factor P USLE de práctica de manejo
- LS_{USLE} , es el factor LS USLE topográfico
- $CFRG$, es el factor de contenido rocoso del primer horizonte de suelo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Factor de erodabilidad (K)

K_{USLE} o factor de erodabilidad del suelo, es definido según Wischmeier y Smith (1978), como el promedio de pérdida de suelo por índice de erosión unitario. Debido a que la estimación directa de este factor requiere de mucho tiempo y altos costos económicos, Wischmeier (1971), desarrolló una ecuación general para calcular el factor de erodabilidad cuando el contenido de arenas y materiales finos no alcanza el 70 % del tamaño de la distribución de partículas de suelo (URIBE RIVERA, 2010).

$$K_{USLE} = \frac{0,00021 * M^{1,14} * (12 - OM) + 3,25 * (C_{soilstr} - 2) + 2,5 * (C_{perm} - 3)}{100}$$

Donde,

- K_{USLE} , es el factor de erodabilidad del suelo
- M , es el parámetro de tamaño de la partícula en porcentaje
- OM , es el porcentaje de materia orgánica
- $C_{soilstr}$, es el código de estructura de suelo usado en la clasificación
- C_{perm} , clase de permeabilidad del perfil

- El parámetro de la partícula M , es calculado de la siguiente manera:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) * (100 - m_c)$$

Donde,

- m_{silt} , es el porcentaje de contenido de aluvión, diámetro de partículas entre 0,002 y 0,05 mm
- m_{vfs} , es el porcentaje de contenido muy fino de arenas, diámetro de partículas entre 0,05 y 0,1 mm
- m_c , es el porcentaje de contenido de arcillas, diámetro de partículas menor de 0,002 mm
- El porcentaje de materia orgánica, OM , se calcula de la siguiente manera:

$$OM = 1,72 * orgC$$

- $orgC$, es el porcentaje de carbón orgánico en la capa de suelo
- Los códigos de la estructura del suelo se clasifican, según la clase de estructura de tierra presente en la capa de suelo, de la siguiente manera:
 - Plato, partículas en un plano generalmente horizontal
 - Tipo prismático, partículas alrededor de una línea vertical y salteada por superficies verticales planas. Se clasifican en prismático, por falta de redondeo en las puntas superiores y columnar, con caras redondeadas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Tipo bloque, partículas alrededor de un punto, formado de superficies planas y redondeadas con moldes y se clasifican así:
 - Bloque angular: redondeado por planos que cruzan en ángulos relativamente agudos
 - Bloque sub-angular: tiene mezcla de caras redondeadas y con vértices
- Esferoide: partículas alrededor de un punto y formado por superficies curvas o muy irregulares. Se clasifican en muy poroso y no poroso.

Los criterios del tamaño para la clase, varían de acuerdo con el tipo de estructura y se muestran en la Tabla 1.

Los códigos para $C_{soilstr}$ son los siguientes:

1. Muy fino granular
2. Fino granular
3. Medio áspero o granular
4. Bloque o plato

Tabla 1. Criterios de tamaño para la estructura del suelo.

Clases de tamaño	Tamaño (mm)			
	Plato	Columnar	Bloque	Granular
Muy fino	< 1	< 10	< 5	< 1
Fino	1 a 2	10 a 20	5 a 10	1 a 2
Mediano	2 a 5	20 a 50	10 a 20	2 a 5
Apero	5 a 10	50 a 100	20 a 50	5 a 10
Muy Áspero	> 10	> 100	> 50	> 10

- La permeabilidad es la capacidad que tiene el suelo de dejar pasar agua y aire por el horizonte más restringido cuando este está húmedo y depende de la conductividad hidráulica del suelo. Los códigos para C_{perm} se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Código permeabilidad.

Código	Vel. Perm (mm/hora)
1. Rápido	> 150
2. Moderado a rápido	50 a 150
3. moderado	15 a 50
4. lento a moderado	5 a 15
5. lento	1 a 5
6. muy lento	< 1

Factor de cobertura vegetal

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

C_{USLE} o factor de cobertura vegetal, es definido según Wischmeier y Smith (1978), como la proporción de pérdida de suelo cosechado bajo unas condiciones específicas. La erosión se ve afectada por el dosel de planta debido a la reducción de la energía efectiva de la lluvia (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005). El SWAT calcula este factor de la siguiente manera:

$$C_{USLE} = \exp([\ln(0,8) - \ln(C_{USLE,mn})] * \exp[-0,00115 * rds_{surf}] + \ln[C_{USLE,mn}])$$

Donde,

- $C_{USLE,mn}$, es el valor mínimo de para el factor de cobertura vegetal para la cobertura de tierra y puede estimarse a partir de un factor conocido $C_{USLE,aa}$, con la ecuación de Arnold y William, (1995) (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005).

$$C_{USLE,mn} = 1,463 * \ln(C_{USLE,aa}) + 0,1034$$

- $C_{USLE,aa}$, es el factor de cobertura vegetal para la cobertura de tierra promedio anual.
- rds_{surf} , es la cantidad de residuo en el suelo (kg/ah).

Factor de práctica de apoyo

P_{USLE} o factor de práctica de apoyo, está definido como la pérdida de suelo con una práctica específica, cuando se habla de práctica se refiere al uso que se le está dando al suelo, como por ejemplo cultivo de contorno, líneas de cosecha en el contorno y sistemas de terraza. Los cultivos y las cosechas aunque protegen el suelo contra la erosión en tormentas de baja intensidad, pueden destruirse cuando ocurren tormentas de un grado mayor (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005).

Según Wischmeier y Smith (1978), el valor P_{USLE} limita la longitud de las pendientes del terreno y se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Factor P_{USLE} según la pendiente del terreno.

Pendiente (%)	P_{USLE}	Máxima longitud (m)
1 a 2	0,6	192
3 a 5	0,5	91
6 a 8	0,5	61
9 a 12	0,6	37
13 a 17	0,7	24
17 a 20	0,8	18
21 a 25	0,9	15

El factor P_{USLE} , según el tipo de cosecha, puede tomar los siguientes valores (Tabla 4).

Tabla 4. Factor P_{USLE} según el tipo de cosecha.

Pendiente	P_{USLE}	Ancho línea	Máxima longitud
-----------	------------	-------------	-----------------

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

(%)	A	B	C	(m)	(m)
1 a 2	0,3	0,45	0,6	40	244
3 a 5	0,25	0,38	0,5	30	183
6 a 8	0,25	0,38	0,5	30	122
9 a 12	0,3	0,45	0,6	24	73
13 a 17	0,35	0,52	0,7	24	49
17 a 20	0,4	0,6	0,8	18	37
21 a 25	0,45	0,68	0,9	15	30

Donde el factor A, se refiere a una rotación de 4 años de cosecha de fila con grano pequeño y 2 años de gramilla, el factor B a una rotación de 2 a 4 años de cosecha de grano de invierno y 1 año de gramilla y el factor C a cosecha con tiras alternas de grano de invierno y cosecha en fila.

Las terrazas son tipos de terraplenes en medio laderas, estas pueden ser de origen naturales o construidas por el hombre, y pueden clasificarse según su conformación de la siguiente manera: terrazas de base ancha, escarpadas de laderas inclinadas y terrazas embalsadas o con salidas subterráneas (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005).

Según Wischmeier y Smith (1978), el factor P_{USLE} para terrazas cultivadas se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Factor P_{USLE} para las terrazas cultivadas.

Terreno	Plan de cultivos		Computo de producción de sedimentos	
	Ladera (%)	Factor PUSLE contorno	Factor PUSLE cultivo líneas	Salidas graduadas de canales de gramilla
1 a 2	0,6	0,3	0,12	0,05
3 a 8	0,5	0,25	0,1	0,05
8 a 12	0,6	0,3	0,12	0,05
13 a 16	0,7	0,35	0,14	0,05
17 a 20	0,8	0,4	0,16	0,06
21 a 25	0,9	0,45	0,18	0,06

Los valores de las últimas dos columnas de la Tabla 5 son utilizados para el control de sedimento y para estimar el aporte del campo a la producción de sedimentos en una cuenca.

Factor topográfico

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

L_{SUSLE} o factor topográfico, está definido como la pérdida esperada de tierra por área unitaria de pendiente de campo de una longitud de 22,1 m con 9% de pendiente (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005). Este factor es calculado de la siguiente manera:

$$L_{SUSLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22,1}\right)^m * (61,41 * (\sin \alpha_{hill})^2 + 4,52 * \sin \alpha_{hill} + 0,65)$$

Donde,

- L_{hill} , es la longitud de la pendiente m.
- α_{hill} , es el ángulo de la pendiente en grados.
- L_{hill} se calcula con base en la ecuación de la pendiente m, que se calcula de la siguiente manera:

$$m = 0,6 * (1 - \exp(-35,835 * slp))$$

- slp , es la pendiente de la HRU y se calcula de la siguiente manera:

$$slp = \tan \alpha_{hill}$$

Factor de rocoso

$CFRG$ o factor rocoso del suelo, se calcula de la siguiente manera:

$$CFRG = \exp(-0,053 * ROCK)$$

Donde,

- $ROCK$, es el porcentaje de piedra en la primera capa de suelo.

1.3.4.1.3 Análisis de sensibilidad

Realizar un análisis de sensibilidad se convierte en una práctica muy importante antes de correr cualquier modelo matemático, esto nos permite identificar las mejores prácticas de gestión y toma correcta de decisiones; pues el análisis realiza la predicción de parámetros que tienen mayor impacto sobre la simulación, saber cuándo una solución sigue estando en un rango óptimo, dadas algunas modificaciones ya sea en el entorno del problema o en los datos del problema mismo y permite racionalizar las etapas de calibración. La disminución de tiempo es el reto más importante en la calibración del modelo y en el análisis de la incertidumbre.

La variación en estos datos del problema se analizó individualmente, es decir, se analiza la sensibilidad de la solución debido a la modificación de un dato a la vez, asumiendo que todos los demás permanecen sin alteración alguna. El objetivo principal es establecer un intervalo de números reales en el cual el dato que se analiza puede estar contenido, de tal manera que la solución sigue siendo óptima siempre que el dato pertenezca en dicho intervalo (TNC, 2012).

Para el análisis de sensibilidad se utilizó el método LH-OAT, incorporado por el modelo SWAT-2005, el cual basa su análisis en la combinación del diseño OAT (One factor At a Time) y el método de muestreo aleatorio LH (Latin Hypercube), estableciendo como puntos iniciales para el diseño OAT el muestreo de Latin Hypercube (TNC, 2012).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El método de muestro aleatorio LH, se basa en el método Monte Carlo, pero utiliza para una estimación más eficiente de los rangos de las variables de entrada al modelo, un método de muestreo aleatorio estratificado. En este método cada parámetro es distribuido en N rangos, con probabilidad de ocurrencia igual a $1/N$. El modelo ejecuta N corridas al azar de las combinaciones aleatorias de cada uno de los parámetros. Los valores aleatorios de los parámetros que el modelo genera son de tal forma que cada intervalo es simulado una sola vez. Los output del modelo son detenidamente analizados con métodos de correlación estadística o con variables de regresión lineal multivariada. Aunque el método LH, por su solidez y eficiencia, son aplicados en modelos de calidad de agua, presenta inconvenientes por la hipótesis sobre la linealidad (TNC, 2012).

Por otro lado el método de análisis local propuesto por Morris (1991), OAT, es el ejemplo de una combinación de un método que analiza sensibilidad local a un método que analiza sensibilidad global. Este consiste en el análisis de los resultados de una modelación, al cambiar el valor de una variable y dejar las otras constantes. El resultado final en este método, corresponde a la suma de los efectos parciales de cada uno de los cambios hechos en cada variable, de esta manera las sensibilidades locales se integran a una medida de la sensibilidad global (TNC, 2012).

Así pues el método conjunto LH-OAT, combina la garantía de que todos los rangos de los parámetros sean incluidos en la muestra y la precisión en los cambios de los parámetros de entrada (TNC, 2012).

1.3.4.1.4 Calibración del modelo

El SWAT es un modelo hidrológico en el cual sería imposible calibrar todos los parámetros, la calibración de este tipo de modelos se realiza de forma manual seleccionando algunos de los parámetros de mayor influencia y comparando los resultados simulados por el modelo con resultados obtenidos en el campo. En el siguiente esquema se presenta la metodología para la calibración del modelo Figura 4 (URIBE R & VALENCIA G, 2011).

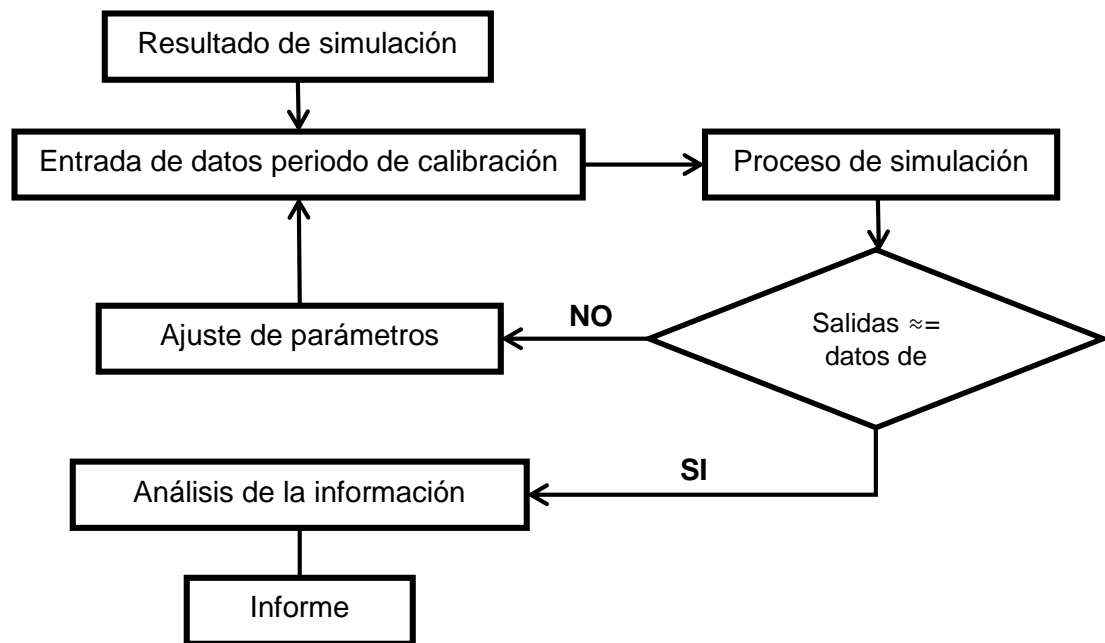


Figura 4. Metodología de la calibración.

Una manera de evaluar la bondad del ajuste del modelo es por medio del criterio de eficiencia Nash- Sutcliffe. Este criterio es uno de los más usados en hidrología y está definido de la siguiente manera:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - Q_{obs\ i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Donde,

$Q_{sim\ i}$, corresponde al caudal simulado en el periodo i .

$Q_{obs\ i}$, corresponde al caudal observado en el periodo i .

Q_{obs} , corresponde al promedio de los datos observados.

El parámetro NS puede tomar valores desde $-\infty$ hasta 1, donde $NS = 1$ corresponde a una perfecta predicción de los datos observados y los datos modelados, un coeficiente $NS = 0$, quiere decir que la media de los datos modelados está muy aproximada a la media de los observados. Fundamentalmente entre más alejado esté el parámetro de 1, menos poder predictivo tiene (URIBE R & VALENCIA G, 2011). Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones se resumen de la siguiente manera Tabla 6.

Tabla 6. Valores referenciales del criterio Nash-Sutcliffe (CABRERA, 2011).

NS	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
>0,8	Excelente

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2 METODOLOGÍA

El análisis de variabilidad espacial de los sedimentos en el embalse La Fe se hizo en cuatro etapas, las cuales se cumplieron en su totalidad y se llevaron a cabo acorde con el cronograma planteado. Cada una de ellas da cumplimiento a los objetivos específicos obteniendo así como resultado la consecución del objetivo general.

En la etapa inicial de este proyecto, se consultaron las fuentes bibliográficas entre las cuales podemos resaltar: trabajos anteriores del embalse La Fe, informes del modelo SWAT, análisis de sensibilidad de modelos utilizados, trabajos de sedimentación, etc. Estas fuentes fueron de gran utilidad para el desarrollo de nuestro trabajo. Se revisaron y analizaron los estudios con la información histórica de la región, hidrología, cartografía y batimetría. Se identificaron los procesos de inestabilidad, los sectores más afectados y por último, se compararon las características históricas con las actuales y como estas pueden incidir en la situación actual. Esta primera etapa, estuvo acompañada de visitas de campo.

En la segunda etapa, de acuerdo a la actividad 2 del cronograma, se realizó la caracterización de la cuenca para determinar su potencial erosivo y su variación espacial. En esta etapa, se estimaron las variables hidrológicas más representativas y que inciden directamente en la producción y transporte de sedimentos en la cuenca como son: la precipitación y el caudal. Se trabajó con el modelo SWAT, extensión de ArcGis, utilizando información, entre los años 1995-2013, suministrada por EPM y el IDEAM.

En la tercera etapa, se realizó un análisis de sensibilidad para encontrar las variables más sensibles y de mayor incidencia en la producción de sedimentos. Este análisis se realizó con la aplicación extensión análisis de sensibilidad del SWAT-2005, gracias a la información encontrada en el modelo SWAT en la plataforma ArcGis. Esta aplicación permite realizar un análisis de sensibilidad completo y con el enfoque escogido, para este caso el análisis se realizó con las variables más influyentes en la sedimentación. Además de realizar este análisis, se calibró el modelo comparando los resultados obtenidos en campo con los resultados arrojados por el modelo y se modificaron algunas de las variables más influyentes para disminuir el delta en los resultados comparados.

En la cuarta y última etapa, se evaluó la dinámica de sedimentación del embalse, conociendo sus condiciones específicas, como son: la existencia de una barrera en la mitad del embalse (antigua presa de Los Salados), la ubicación de la torre de captación, los afluentes del embalse (por gravedad y por bombeo) y los datos históricos de las batimetrías realizadas por EPM. Además se integró la información ya obtenida de la producción de sedimentos con la información del embalse para diagnosticar el estado actual del sistema.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 Localización

La cuenca abastecedora del embalse La Fe se localiza en la periferia de la ciudad de Medellín en el Departamento de Antioquia. Esta cuenca hace parte de la Región Andina con pisos térmicos cálidos, templados, fríos y muy fríos. Abarca un área de aproximadamente 77 millones de metros cuadrados, compuestas por suelos arcillosos, de color rojo pardo y rojizo, rico en material orgánico y nitrógeno. Se ha visto muy afectada por la topografía de la región; sus escarpadas pendientes, la alta intensidad de lluvias y factores antrópicos como construcciones, actividades artesanales, entre otros, que han contribuido en gran manera en la formación de procesos erosivos que son los responsables de la acumulación de sedimentos en el embalse (TNC, 2012).

El embalse está ubicado en el municipio del Retiro, primer municipio que se encuentra al desplazarse hacia el Oriente Antioqueño, a solo 32 km de la ciudad de Medellín por carretera asfaltada; según las coordenadas geográficas, el municipio se encuentra a $6^{\circ} 03' 31''$ de latitud y a menos $75^{\circ} 30' 16''$ de longitud. (El Retiro Antioquia, 2012).

En la Figura 5 se muestra la localización de la cuenca.

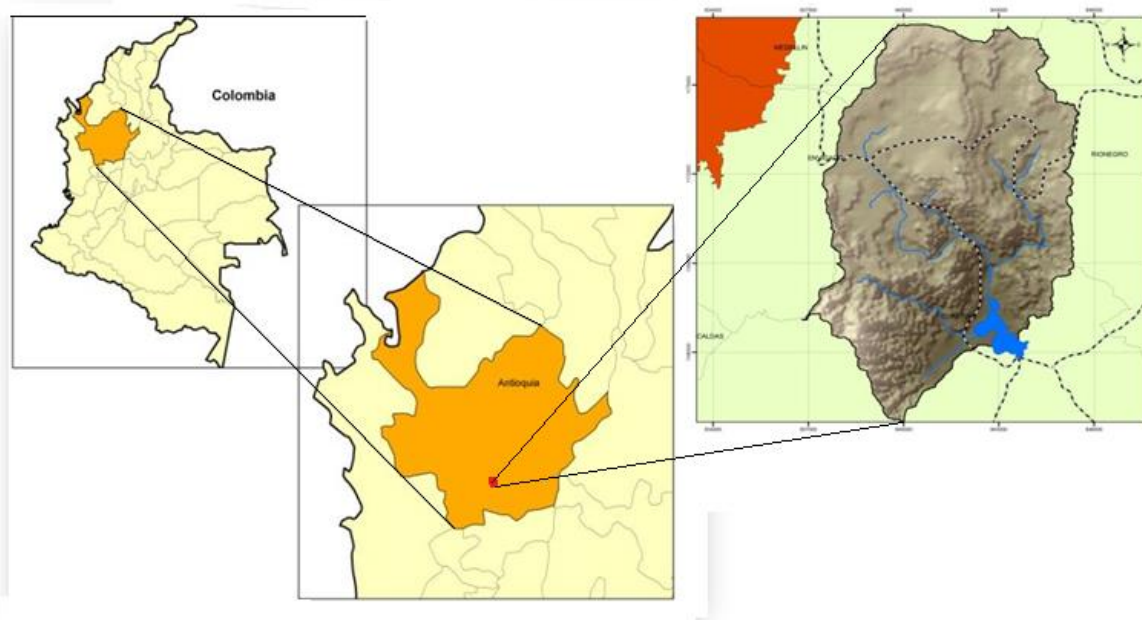


Figura 5. Localización cuenca del embalse La Fe.

3.1.2 Descripción del sistema

El embalse La Fe abastece, junto con los embalses de Piedras Blancas, Riogrande II y otras fuentes menores, la demanda actual de agua potable de la ciudad de Medellín y de los

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

municipios que conforman el Área Metropolitana (ver Figura 6). El agua proveniente de La Fe, es tratada para el sistema de acueducto en la planta La Ayurá, la cual tiene una capacidad de 9,22 m³/s. También es empleada para la generación de energía eléctrica en la central hidroeléctrica con una capacidad efectiva de 18 MW (EPM, 2008).



Figura 6. Mapa del sistema de abastecimiento de agua potable operado por EPM.

Originalmente, en 1967, el embalse se formó con una pequeña presa de gravedad llamada Los Salados, la cual quedó posteriormente sumergida cuando se construyó una presa más grande, 800 m aguas abajo, que formó el embalse actual que se conoce con el nombre de embalse La Fe cuyo primer llenado se llevó a cabo el 5 de junio de 1973 (EPM, 2008).

El embalse, que tiene una capacidad aproximada de almacenamiento de 12 millones de metros cúbicos, se surte de tres afluentes principales que son las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo y Potreritos. Además, durante la época de estiaje, es alimentado por las aguas que se bombean de los ríos Buey, Piedras y Pantanillo desde la estación de Pantanillo (ver Figura 7).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

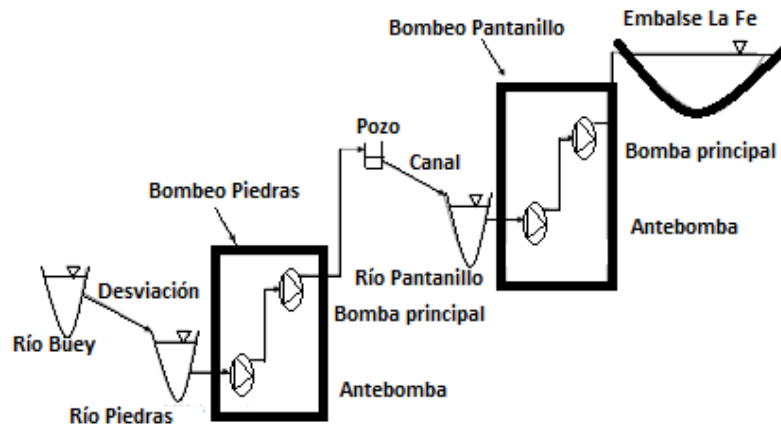


Figura 7. Esquema general de bombeo en el embalse La Fe.

El vertedero es un canal abierto excavado en roca revestido en concreto, sin compuertas, con un pozo de quietamiento en el extremo aguas abajo. Se diseñó de tal manera que pudiera evacuar un caudal de diseño de $795 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al 87% de la creciete en el sitio de presa, generada por la precipitación máxima probable. El nivel normal de operación o nivel de vertimiento está en la cota 2155,55 msnm, el nivel máximo que alcanza cuando se presenta la creciete de diseño es 2160,83 msnm, lo cual arrojaría una lámina de vertimiento de 4,45 m, y el nivel mínimo de operación es 2142 msnm (EPM, 2008).

La torre de captación es del tipo superficial, de sección circular de 2,8 m de diámetro interior, situada sobre un pozo vertical de 36 m. Posee tres compuertas deslizantes de 0,91 m por 1,83 m y tres orificios de captación en las cotas 2.139,4, 2.143,5 y 2.148,4 msnm, por los cuales ingresa el agua hacia un túnel de 8,6 km de longitud que la conduce hasta la planta de potabilización La Ayurá, ubicada en el municipio de Envigado (ver Figura 8) (ORTEGA A., RESTREPO, CORREA U., GÓMEZ G., & TORO B., 2010).

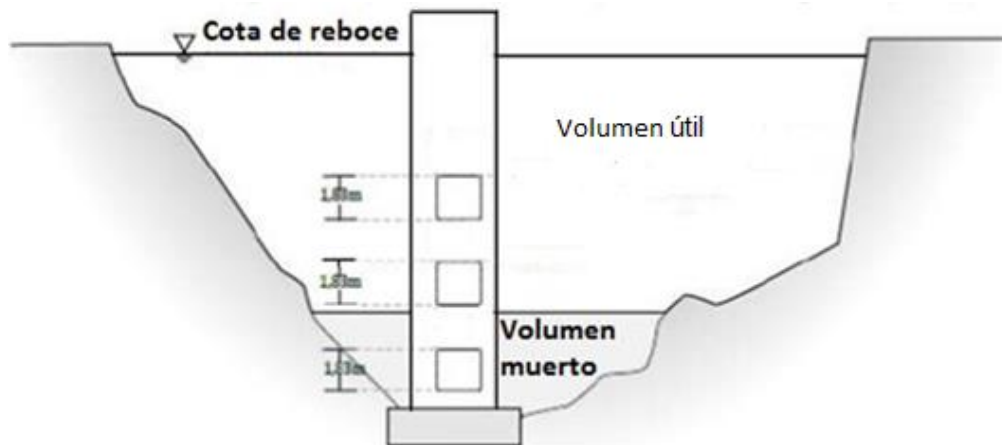


Figura 8. Torre de captación embalse La Fe.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la revista ingeniería de presas de Empresas Públicas de Medellín se presenta una descripción detallada de la infraestructura asociada al embalse La Fe, a continuación se resumen algunos aspectos importantes (EPM, 2008).

La presa fue construida con y sobre suelos residuales de una roca denominada neis, de origen metamórfico, perteneciente al Grupo Ayurá Montebello.

La composición mineralógica del neis de cuarzo, feldespatos y mica, en condiciones climáticas de alta precipitación, desarrolla un perfil de meteorización con suelos adecuados para la fundación y como material de construcción para presas de tierra.

El suelo de fundación está constituido por limo arcilloso y limo arenoso de baja compresibilidad, de color pardo amarillo, cuyo espesor varía entre un metro en el lecho del río y 30 m en los estribos. En el lado aguas arriba, el suelo residual está cubierto por una capa de depósitos aluviales de aproximadamente 2,5 m de espesor.

El terraplén, en la zona de aguas arriba, está conformado con limo, mientras que en la zona de aguas abajo se compone de una mezcla de limo y roca descompuesta proveniente de la excavación del vertedero. Dispone de un sistema de drenaje constituido por un filtro inclinado, un manto de drenaje sobre el talud aguas abajo y un colector principal.

Sobre ambos estribos de la presa se construyeron llenos de refuerzo con el fin de aumentar la resistencia de los taludes y controlar las infiltraciones a través de dichas zonas.

3.1.3 Geología

La cuenca del embalse La Fe se encuentra sobre terrenos del Batolito Antioqueño, en esta zona se encuentran principalmente anfibolitas, migmatitas y granulitas localizadas en parte alta del sitio de presa, consideradas como las ortoanfibolitas basales del Grupo Ayurá Montebello y posteriormente denominadas anfibolitas de Medellín. En la parte baja se encuentran aluviones procedentes de los cauces del río Pantanillo y la quebrada Las Palmas (EPM, 2008).

Los suelos del Oriente Antioqueño están regularmente cubiertos de cenizas volcánicas, variando la profundidad de tales depósitos en función de la topografía. En la reserva estos se han visto afectados por factores naturales como las pendientes fuertes a escarpadas y la alta intensidad de lluvias, provocando procesos erosivos, baja fertilidad en su composición mineral, y por factores antrópicos como la presión que ejercen las personas que visitan la reserva y las obras de infraestructura que se realizan constantemente, entre ellas; construcción de viviendas y aperturas de vías.

3.1.4 Modelo de elevación digital

En la Figura 9 se muestra el modelo de elevación digital de la cuenca y dos secciones (ver Figura 10), que comunican las partes más altas de la cuenca con las más bajas, para tener una idea de la conformación topográfica de la cuenca que pueden ser un indicativo del comportamiento de los sedimentos en la misma. La altura máxima de la cuenca es 2912 msnm y la mínima de 2135.9 msnm, en el fondo del embalse.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

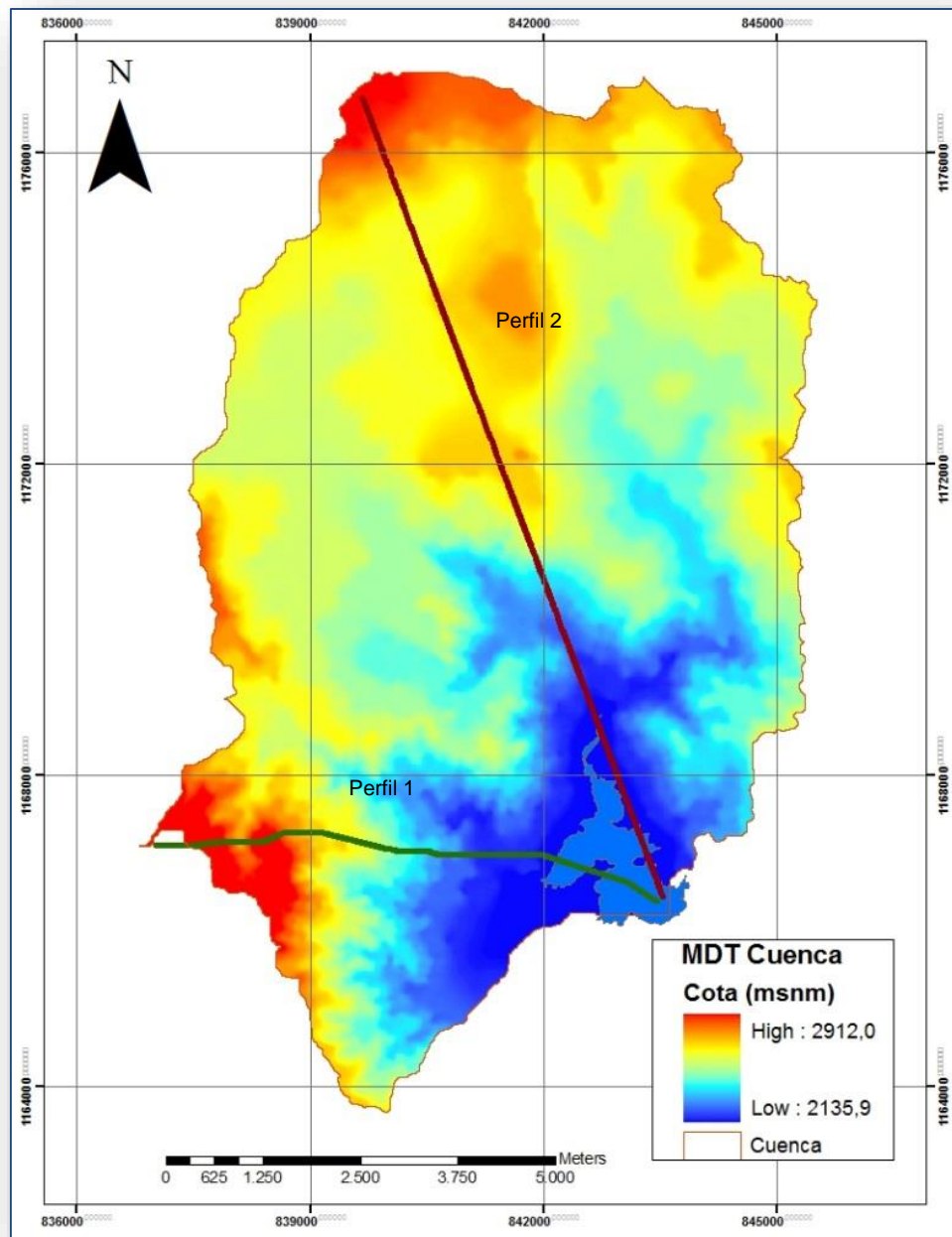


Figura 9. MDT de la cuenca del embalse La Fe.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

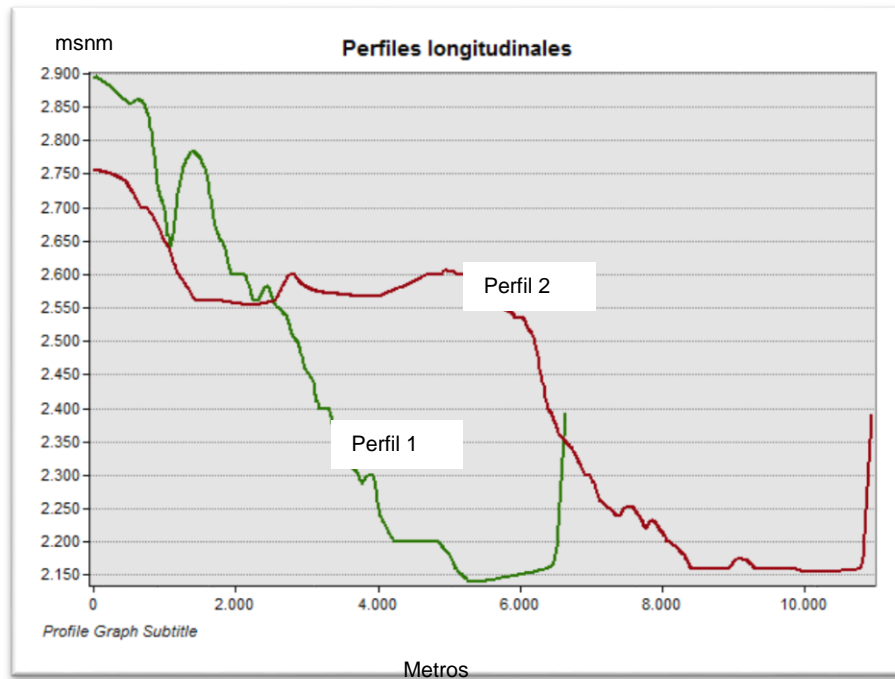


Figura 10. Perfiles

El perfil 1 presenta una pendiente escarpada lo cual puede contribuir a la producción de sedimentos y a un transporte de los mismo, el perfil 2 por el contrario, presenta valles extensos en los que se podrían depositar los sedimentos, evitando que lleguen al embalse. A partir del modelo de elevación digital se calculó la curva hipsométrica (ver Figura 11), a partir de la cual se realizó un análisis.

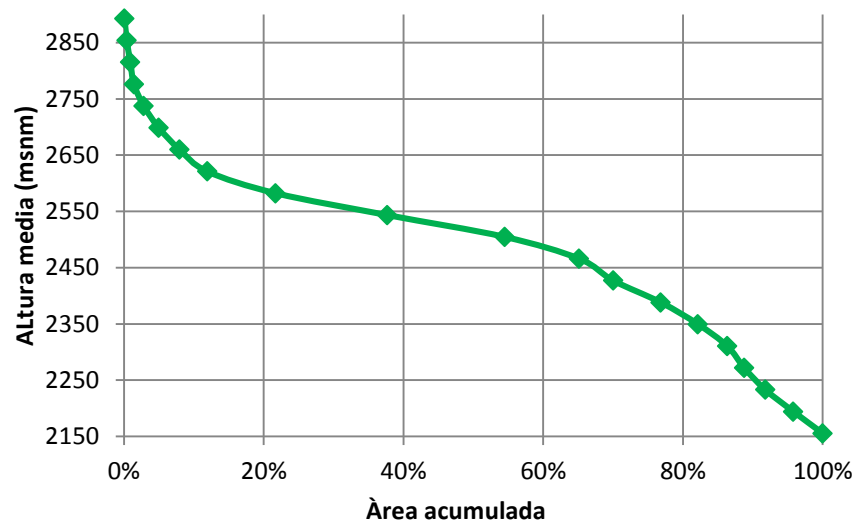


Figura 11. Curva hipsométrica cuenca embalse La Fe

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La curva muestra que la cuenca presenta un estado de equilibrio y que es geológicamente madura, se le llama pie de montaña. Presenta extensos valles lo cual puede generar una localización de sedimentos y una respuesta lenta.

3.1.5 Reconocimiento de la zona

El reconocimiento de la zona por medio de las visitas de campo, permitió tener una idea de la conformación de la cuenca y de las prácticas antrópicas que pueden ser causa importante en la producción de sedimentos. Se recorrieron los alrededores de la cuenca y se navegó el embalse encontrando algunas predominancias en el área que se explican a continuación.

Se detectaron fuentes de sedimentos en los cauces de las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo, por su conformación topográfica, se evidencian intervenciones antrópicas (ver Figura 12), la actividad artesanal contribuye con los procesos de sedimentación y socavación, generando relocalización de sedimentos.



Figura 12. Acumulación de sedimentos por actividades mineras. (EPM, 2013)

En la zona intermedia de la cuenca, desembocadura del río Pantanillo, se presentan altas intervenciones antrópicas (ver Figura 13); la construcción de urbanizaciones, parcelaciones, casas de veraneo y todo lo concerniente a un proyecto de este tipo en la parte alta de la cuenca, es considerada una de las fuentes de producción de sedimentos más importantes debido a la alta acumulación de tierra y escombros.

La última zona, ubicada entre la antigua presa los salados y la presa actual, es evidentemente la zona más sana de la cuenca, no se observan deslizamientos en las laderas, ni actividades antrópicas consideradas fuentes importantes de producción de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sedimentos, por el contrario existe preservación de bosques reforestados que afectan positivamente en el embalse (ver Figura 14).



Figura 13. Intervenciones antrópicas en la parte alta de la cuenca.



Figura 14. Ladera sana de la cuenca, cerca al embalse La Fe (EPM, 2013).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EROSIVO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT.

El periodo para la estimación del potencial erosivo depende de la disponibilidad de información, en este caso se contaba con el modelo hidrológico implementado desde el año 1995 hasta el 2009, y como parte de las actividades de esta tesis, se actualizó el modelo incluyendo la información climática del año 2009 hasta el año 2013. El resto de las variables permanecieron constantes porque no se dispone de información actualizada de ellas.

Las variables climáticas utilizadas fueron (ver Anexo B):

- Precipitación diaria de las estaciones La Fe y Las Palmas
- Temperatura máxima y mínima diaria de las estaciones Córdoba y Las Palmas
- Radiación solar diaria de la estación Córdoba
- Humedad diaria de la estación Córdoba

3.2.1 Variables del modelo

El modelo hidrológico SWAT, incluye en su simulación innumerables variables que lo hacen más preciso y eficiente, sin embargo en este numeral se explicarán y se definirán las variables de entrada más representativas para la producción y el transporte de los sedimentos y las usadas en la calibración del modelo, ellas son las variables hidrológicas precipitación y caudal, incluyendo los caudales bombeados y las variables asociadas a suelos y sus usos, como el caso de las coberturas vegetales, tipos de suelos y sus propiedades.

3.2.1.1 Variables hidrológicas

EPM cuenta en la cuenca del embalse La Fe con 2 estaciones pluviométricas, que hoy en día tienen más de 60 años de registro y 2 estaciones limnigráficas, instaladas en el 2002, las cuales están ubicadas en las fuentes naturales que hacen parte del embalse (RN 36 en la quebrada las Palmas y RN 37 Espíritu Santo y Potreritos).

Las estaciones que miden las variables de humedad, temperatura y radiación solar, utilizadas por el modelo es propiedad del IDEAM y están ubicadas en el aeropuerto José María Córdoba (Ver Figura 15).

La información general de cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 7.

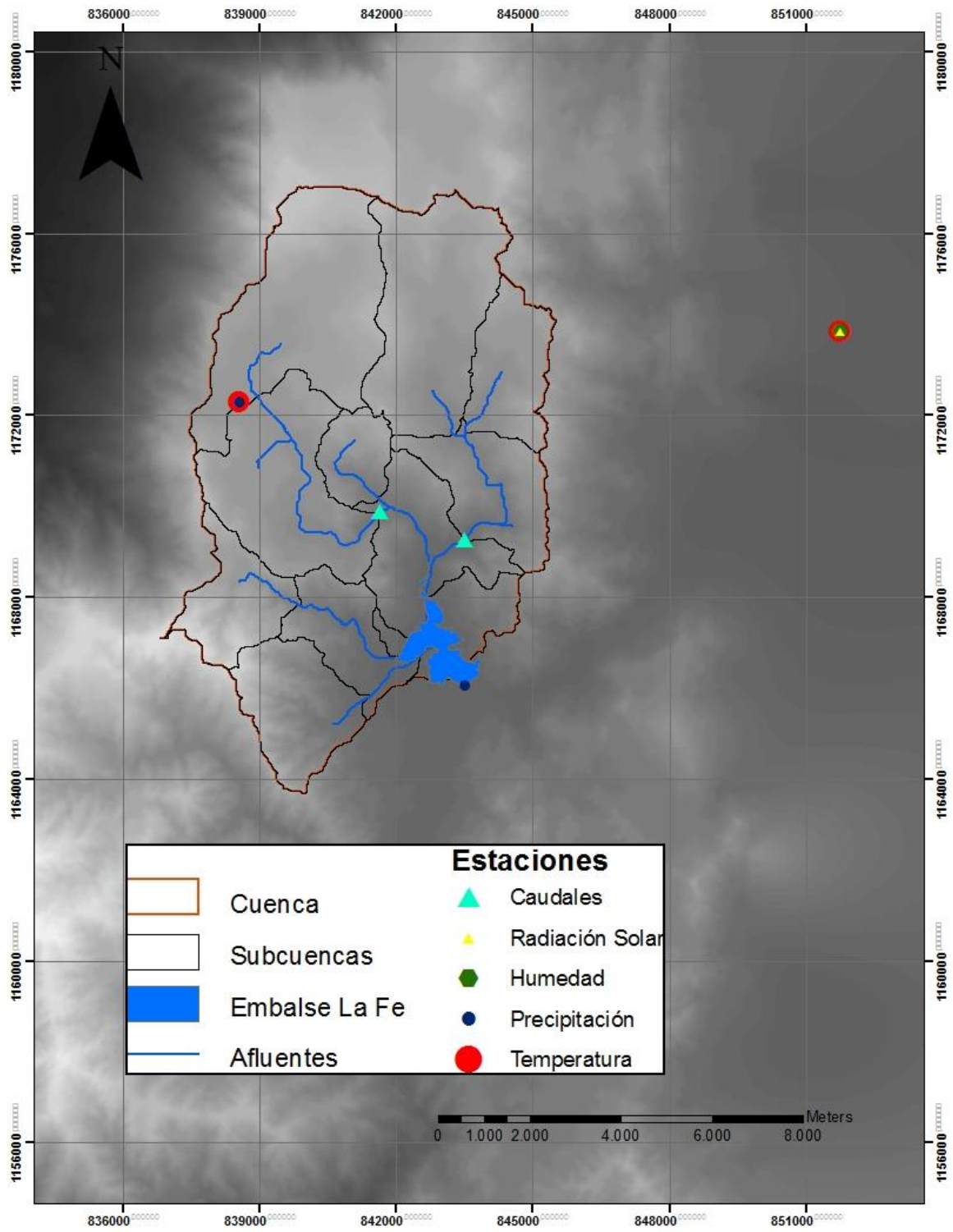


Figura 15. Localización de las estaciones.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 7. Información general de las estaciones hidroclimáticas utilizadas.

PRECIPITACIÓN					
Código	Nombre	Coordenada Norte	Coordenada Este	Media multianual (mm/año)	Factor de ponderación (%)
2308021	La Fe	1166060	843500	1988	35.3
2308023	Las Palmas	1172290	838550	2021	48.5
CAUDAL					
Código	Nombre	Coordenada Norte	Coordenada Este	Media multianual (m³/s)	Fuente
2308938	RN-36 (Las Palmas)	1170190	841609	1.22	Q. Las Palmas
2308939	RN 37 (Espíritu Santo)	1169300	843450	1.04	Q. Espíritu Santo
HUMEDAD, TEMPERATURA Y RADIACIÓN SOLAR					
Código	Nombre	Latitud	Longitud	Propiedad	
23085200	A. J. M. CORDOBA	6.168639	-75.425889	IDEAM	

3.2.1.1.1 Precipitación

La precipitación media mensual en la cuenca se estimó con un promedio ponderado de los valores presentados en cada estación.

Para el periodo de análisis (1995-2013), el promedio mensual de lluvias en la cuenca presenta un comportamiento bimodal, con dos periodos húmedos en los trimestres abril, mayo y junio en la primera parte del año y septiembre, octubre y noviembre en la segunda parte (ver Figura 16).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

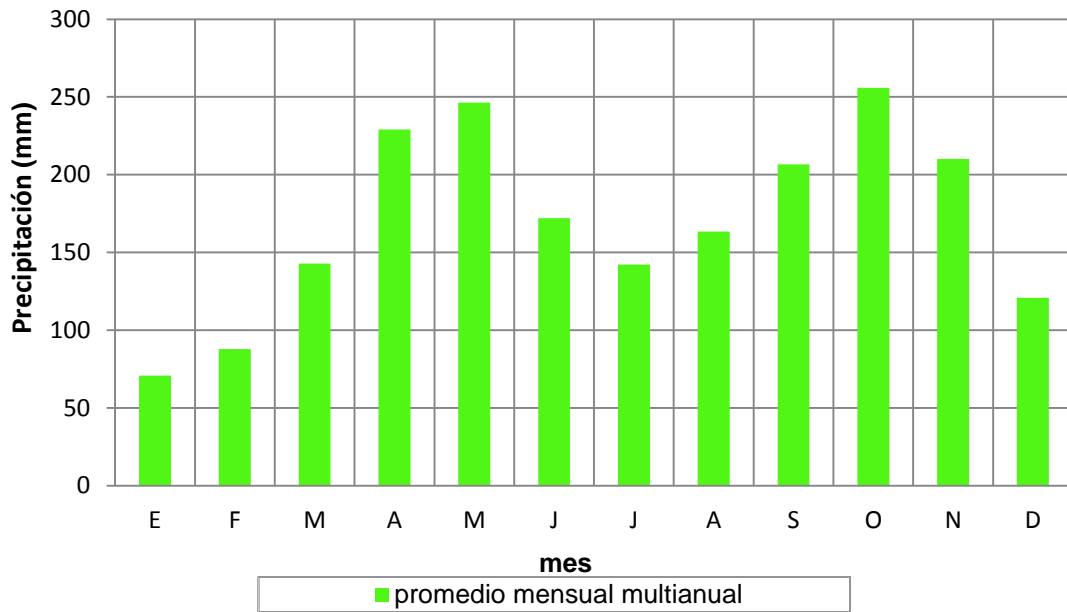


Figura 16. Ciclo anual de la precipitación promedio en la cuenca.

El mes de mayo es el más lluvioso del primer trimestre con un promedio de 246 (mm/mes) pero en el segundo trimestre, en el mes de octubre, se presentan las lluvias más intensas del año con un promedio de 256 (mm/mes). Por otra parte en el trimestre diciembre, enero y febrero se evidencia el verano más seco del año, con un mínimo en enero de 71 (mm/mes), en los meses julio y agosto se presenta también un verano no muy intenso con promedios de lluvia más altos, llamado comúnmente en Colombia “Veranillo de San Juan”.

Cuando se analizan todas las estaciones (ver Figura 17), se encuentran diferencias espaciales debidas a efectos orográficos y a circulaciones locales que influyen en la magnitud de las lluvias de la zona pero conservando el mismo ciclo bimodal.

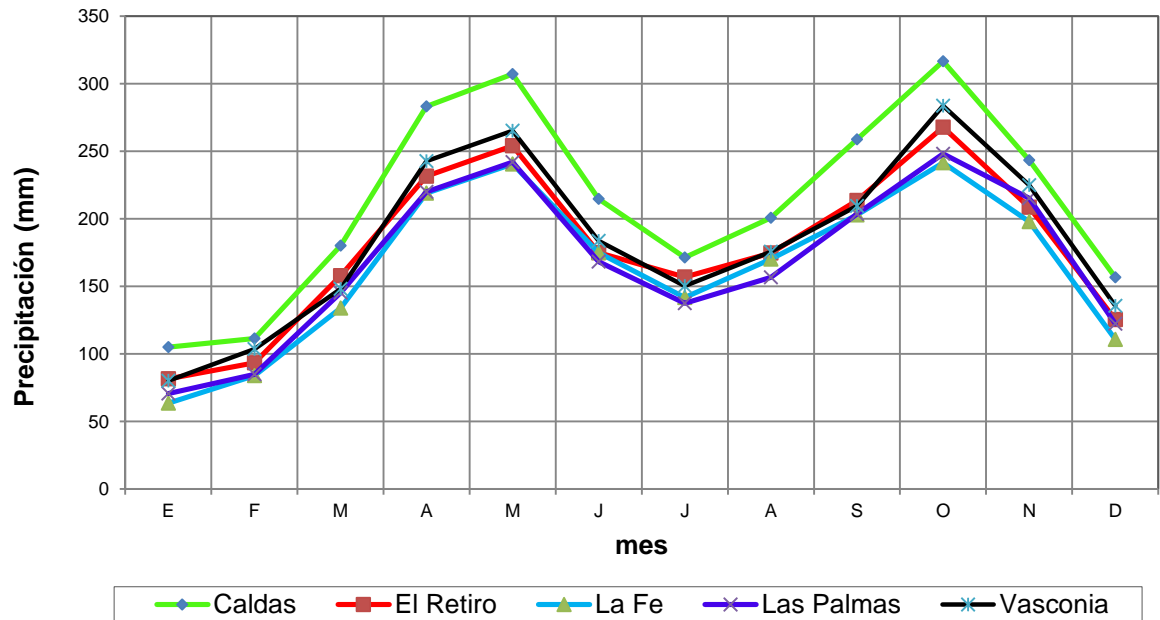


Figura 17. Ciclo anual de las estaciones disponibles en la zona de estudio para el periodo (1995 – 2013).

Para la modelación se ingresó la información de lluvia diaria de Las estaciones La Fe y Las Palmas, desde 1995 hasta el 2013.

3.2.1.1.2 Caudales

La información de las estaciones permitió analizar cómo han evolucionado las quebradas a través del tiempo e identificar los años y los meses de caudales más altos registrados.

En la Figura 18 se muestra el ciclo anual de los caudales medidos por las estaciones ubicadas en los principales afluentes del embalse. Como se puede observar, las dos quebradas presentan un ciclo bimodal con un registro alto de caudales en los trimestres abril, mayo, junio y septiembre, octubre noviembre. Los caudales máximos promedio de las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo en el periodo (1995 – 2013) ocurren en el mes de noviembre con valores de 1,99 y 1,54 (m³/s) respectivamente, por otro lado se puede ver que en el mes de febrero ocurren los registros más bajos, con valores de 0,63 (m³/s) para la quebrada Las Palmas y 0,70 (m³/s) para la quebrada Espíritu Santo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

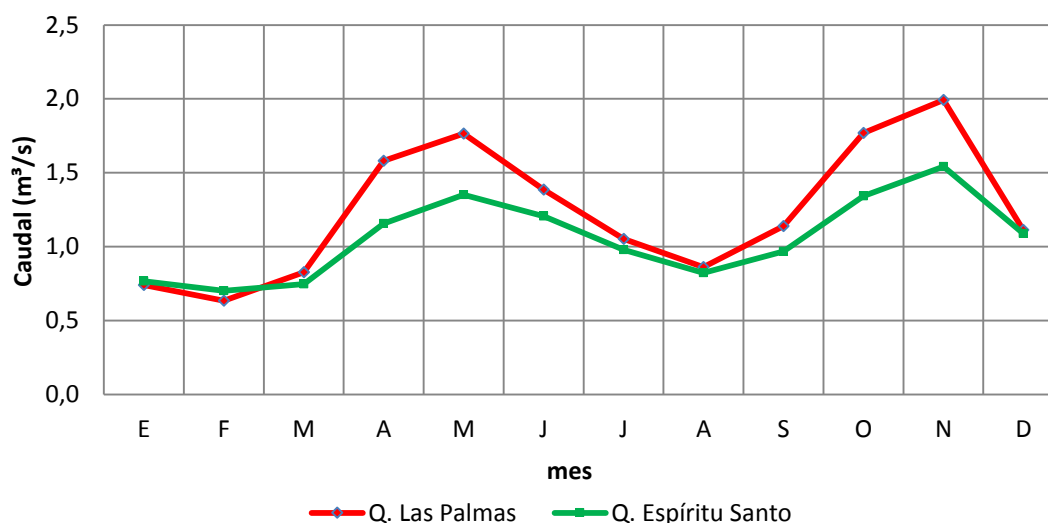


Figura 18. Ciclo anual de los caudales medios en las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo (1995-2013).

En el modelo se utilizó la información de caudales, de 1995 hasta 2013, para comparar los resultados simulados con los observados.

3.2.1.2 Cobertura Vegetal

En la Tabla 8, se muestra la distribución de las coberturas vegetales. En la cuenca del embalse La Fe predominan bosques naturales fragmentados, bosques plantados y pastos limpios abarcando aproximadamente un 73 % del área total de cuenca. La otra parte del área corresponde a cultivos, tejidos urbanos, zonas industriales y fincas de recreo.

La asignación de los parámetros de la cobertura vegetal para la modelación, se fundamentó en el conocimiento del comportamiento de las coberturas de la Zona Andina Tabla 8 (TNC, 2012).

Tabla 8. Coberturas vegetales de la cuenca del embalse La Fe.

Cobertura	Cód. SWAT	CN	n	Área (ha)
Bosque natural denso	FRST	25-40-65-72	0,1	497,319
Bosque natural fragmentado, con arbustos y matorrales	MESQ	30-46-63-66	0,1	1955,224
Bosque natural fragmentado, con pastos y cultivos	MESQ	30-46-63-66	0,1	48,54
Bosque plantado – coníferas	PINP	25-45-70-77	0,1	1.860.686
Bosque plantado –latifoliadas	PINU	25-45-70-78	0,1	19,447
Embalses y cuerpos de agua superficiales	WATR	92-92-92-92	0,01	127,53
Fincas de recreo – parcelaciones	URLD	0-0-0-0	0	6,11
Instalaciones recreativas	URLD	0-0-0-0	0	528,781

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Cobertura	Cód. SWAT	CN	n	Área (ha)
Mosaico de cultivos	CANT	66-77-83-87	0,1	73,202
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	RYEG	25-50-74-81	0,14	340,325
Mosaico de pastos y cultivos	RYEG	25-50-74-81	0,14	183,855
Mosaico de pastos y espacios naturales	RYEG	25-50-74-81	0,14	3,377
Otros cultivos permanentes	CANT	66-77-83-87	0,1	8,045
Pastos arbolados	RYEG	25-50-74-81	0,14	49,587
Pastos enmelazados o enastrojados	RYEE	25-48-72-79	0,15	156,303
Pastos limpios	RYEG	25-50-74-81	0,14	1793,809
Tejido urbano continuo	URHD	0-0-0-0	0	0,287
Tejido urbano discontinuo	URHD	0-0-0-0	0	22,855
Tierras desnudas o degradadas	PAST	25-55-70-77	0,14	12,859
Zonas industriales o comerciales	URHD	0-0-0-0	0	17,583

Donde,

- Cód. SWAT, corresponde al código que representa cada cobertura vegetal para ingresar al modelo.
- El Número de Curva (CN), es un parámetro en función del cual se calcula la escorrentía de una determinada tormenta, depende del tipo y uso del suelo, de las condiciones de la superficie de suelo y de las condiciones de humedad. Es un factor adimensional que oscila entre 1 y 100, donde un CN=1 indica una capacidad de retención máxima en la cuenca y CN=100 una capacidad nula de retención (GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, 2005).
- Rugosidad de Manning, (n), es un coeficiente que indica la resistencia al flujo en un canal o una superficie específica, este depende de muchos factores entre los cuales se encuentran; la rugosidad del terreno, el tipo de vegetación, la irregularidad y el alineamiento de la superficie o del canal, la erosión y la obstrucción (DUQUE GUZMÁN, 1998).
- Área, corresponde al área del cada tipo de cobertura vegetal en la cuenca del embalse La Fe, medido en hectáreas.

3.2.1.3 Características del suelo

Las propiedades físico químicas de las partículas de suelo, la conductividad hidráulica, la densidad aparente y la disponibilidad de agua en el suelo se ajustaron con base en estudios de suelo en zonas volcánicas de la Región Andina Tabla 9 (TNC, 2012).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 9. Características físico – químicas de los suelos en la cuenca La Fe.

Pefil	SNAM	K (USLE)	Sol_Z prof. (mm)	Densidad Aparente (g/cm3)	Dispo. de agua en el suelo (mm/mm)	Conduc. Hidráulica (mm/hr)	SOL_CNB Carbono (%)	% Arcilla (CLAY)	% Limos (SILT)	% Arena (SAND)
A367	ALd	0,13	200	0,97	0,16	60,02	5,6	18	30	52
		0,13	450	1,27	0,09	132,58	2,5	2	22	76
		0,14	800	1,38	0,09	114,75	1,7	2	26	72
		0,14	1000	1,42	0,08	96,59	1,5	4	22	74
		0,13	1500	1,44	0,07	124,85	1,2	2	18	80
A547	LPa	0,15	350	1,56	0,07	61,91	0,5	8	16	76
		0,18	860	1,57	0,12	25,03	0,6	12	38	50
		0,18	1200	1,57	0,12	25,03	0,6	12	38	50
A224	NQf3	0,12	400	1,4	0,12	6,29	2,2	32	22	46
		0,15	800	1,59	0,1	7,37	0,2	26	16	58
		0,16	1500	1,61	0,09	14,56	0,2	20	18	62
A351	TEb	0,13	300	0,62	0,19	131,09	8,1	13	26	61
		0,1	650	1,04	0,1	161,29	4,4	3	16	81
		0,14	800	1,48	0,07	88,65	1,07	5	18	77
		0,15	900	1,61	0,09	11,13	0,22	23	14	63
		0,11	1200	1,39	0,12	0,15	0,2	53	10	37
		0,11	1600	1,13	0,11	0,2	0,2	72	10	18
A478	TEb1	0,13	220	1,44	0,41	612,9	17,3	6	25	69
		0,13	520	0,54	0,1	63,15	2,4	10	21	69
		0,15	1200	1,21	0,12	2,6	0,3	34	22	44
A448	TEc2	0,14	160	0,52	0,76	1470,21	28,8	10,7	29,96	59,34
		0,14	470	0,49	0,15	149,45	4,9	4,28	32,1	63,62
		0,14	880	0,78	0,09	114,29	1,8	2,16	25,94	71,89
		0,12	1400	1,43	0,08	125,77	1,8	2,14	19,3	78,56
A348	TEd1	0,14	100	0	0,29	305,46	12,9	12	31	57
		0,14	300	0,66	0,18	164	7,1	8	28	64
		0,13	600	1,16	0,12	52,57	4,6	16	26	68
		0,11	800	1,12	0,09	158,4	3,7	2	18	80
		0,11	1200	1,18	0,09	121,01	3,5	5	17	78

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Pefil	SNAM	K (USLE)	Sol_Z prof. (mm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Dispo. de agua en el suelo (mm/mm)	Conduc. Hidráulica (mm/hr)	SOL_CNB Carbono (%)	% Arcilla (CLAY)	% Limos (SILT)	% Arena (SAND)
		0,16	1250	1,15	0,1	0,98	0,5	67	23	10
A482	TEd2	0,14	280	0,42	0,42	612,25	17,4	8	29	63
		0,13	510	0,51	0,14	139,62	5,8	7	24	69
		0,14	770	1	0,11	14,2	1,3	22	24	53
		0,18	1200	1,02	0,14	9,32	0,2	18	46	36
A481	TEe2	0,14	270	0	0,34	469,01	14,1	10	37	52
		0,14	460	0,96	0,13	152,82	4,8	4	26	70
		0,12	1030	1,14	0,1	132,17	3,7	4	20	76
		0,13	1200	1,38	0,1	55,41	2,2	11	21	68
A356	TEf1	0,14	50	0	0,34	531,02	14,5	17	54	29
		0,17	110	1,4	0,14	2,43	0,7	38	40	22
		0,17	390	0	0,31	327,39	9,8	13	65	22
		0,14	640	0,96	0,18	54,18	5,2	20	47	38
		0,14	790	1,31	0,1	109,33	2,3	3	28	69
		0,13	1040	1,45	0,1	31,96	1,8	16	19	65
A352	TEf2	0,14	100	0,37	0,2	292,71	8,2	2	30	68
		0,18	250	1,59	0,11	20,91	0,4	14	34	52
		0,13	700	1,44	0,13	6,41	1,5	30	28	42
		0,13	900	1,51	0,11	2,3	0,8	36	14	50
		0,17	1500	1,44	0,15	2,97	0,6	34	42	24
	ZU	0,28	1524	1,5	0,1	500	0	15	30	55
	Agua	0	25,4	1,72	0	260	0	0	0	0

Donde,

- SNAM, corresponde al código que representa cada tipo de perfil de suelo para ingresar al modelo.
- K (USLE), es el factor de erodabilidad de cada tipo de perfil de suelo.
- Sol_Z (Profundidad), es el espesor de cada perfil se suelo medido en mm.
- La densidad aparente, relación entre el volumen y el peso seco de cada perfil de suelo, es una propiedad de la cual se puede concluir mucho acerca de algunas características del suelo, entre ellas; porosidad, capacidad de drenaje, etc. Se mide en (g/cm³) (Construmatica, 2000)
- La disponibilidad de agua en el suelo, es la cantidad de agua disponible en cada perfil de suelo medida en (mm/mm).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- La conductividad hidráulica es una propiedad del suelo (medio poroso), que establece la movilidad del agua dentro del perfil de suelo, esta depende del grado de saturación y de la naturaleza de mismo. El conocimiento de este valor, es de gran importancia, ya que permite conocer la hidrodinámica del agua dentro del suelo y es esencial para el análisis de problemas de presas y embalses. Se mide en (mm/hr) (DONADO GARZÓN, 2004).
- SOL_CNB, corresponde al porcentaje de carbono en cada perfil de suelo.
- El % arcilla corresponde al porcentaje de arcilla C en cada perfil de suelo.
- El % limo corresponde al porcentaje de limo en el suelo en cada perfil de suelo.
- El % arena corresponde al porcentaje de arena en el suelo en cada perfil de suelo.

3.2.2 Unidades de respuesta hidrológica

Una vez definidos los límites de la cuenca, se dividió la cuenca en pequeñas subcuencas con el fin obtener más precisión en los resultados del cálculo de caudales y de sedimentos Figura 19.

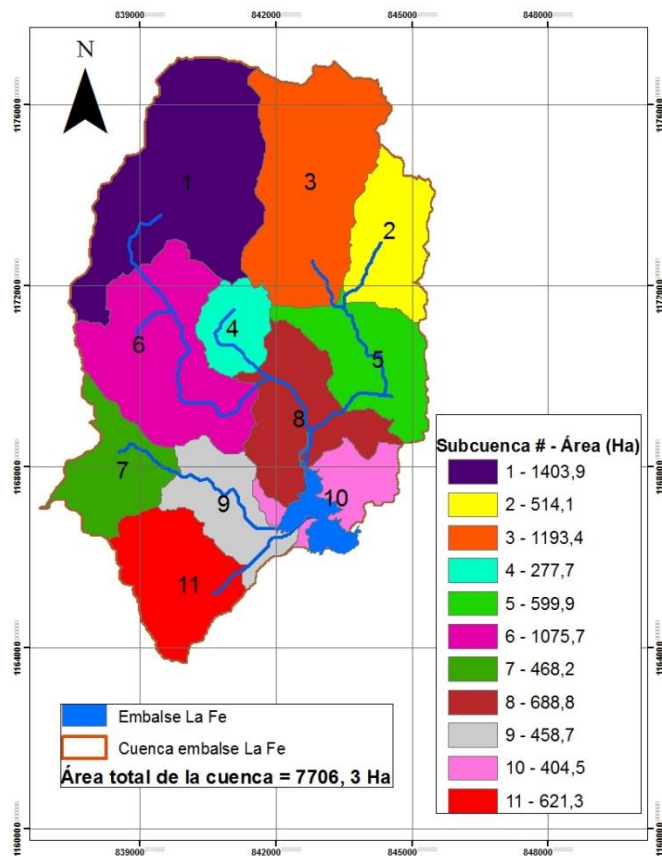


Figura 19. Subcuencas del embalse La Fe.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Con la integración de toda la información anterior, se determinaron las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) (ver Figura 20), que corresponden a fragmentos de tierra con unas condiciones de suelo, cobertura vegetal y topografía que generan un impacto sobre la cantidad y calidad de agua en la cuenca. A partir de esta información se estimó cuanto es el aporte de sedimentos de cada HRU. La modelación se realizó para el periodo 1995 - 2013.

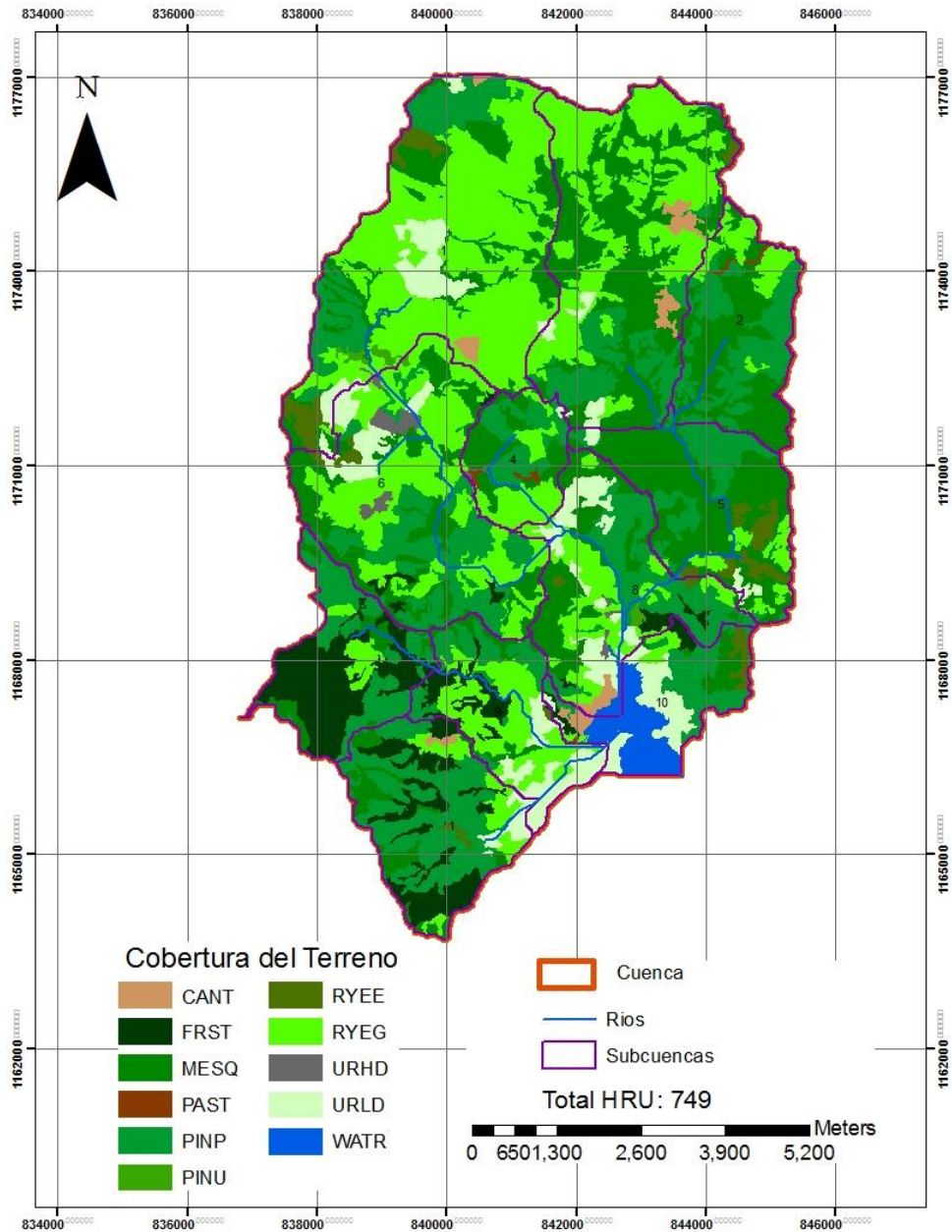


Figura 20. Unidades de respuesta hidrológica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.3 Variables que influyen en la producción de sedimentos.

La identificación de las variables que más influyen en la producción de sedimentos se hizo mediante el análisis de sensibilidad descrito en el marco teórico (numeral 1.3.4.1.3).

Como ya se mencionó anteriormente, el SWAT cuenta con una aplicación que permite realizar un análisis de sensibilidad de las variables que influyen en los procesos de sedimentación y caudal. En la Figura 21, se muestra el cuadro de dialogo que permite realizar este análisis.

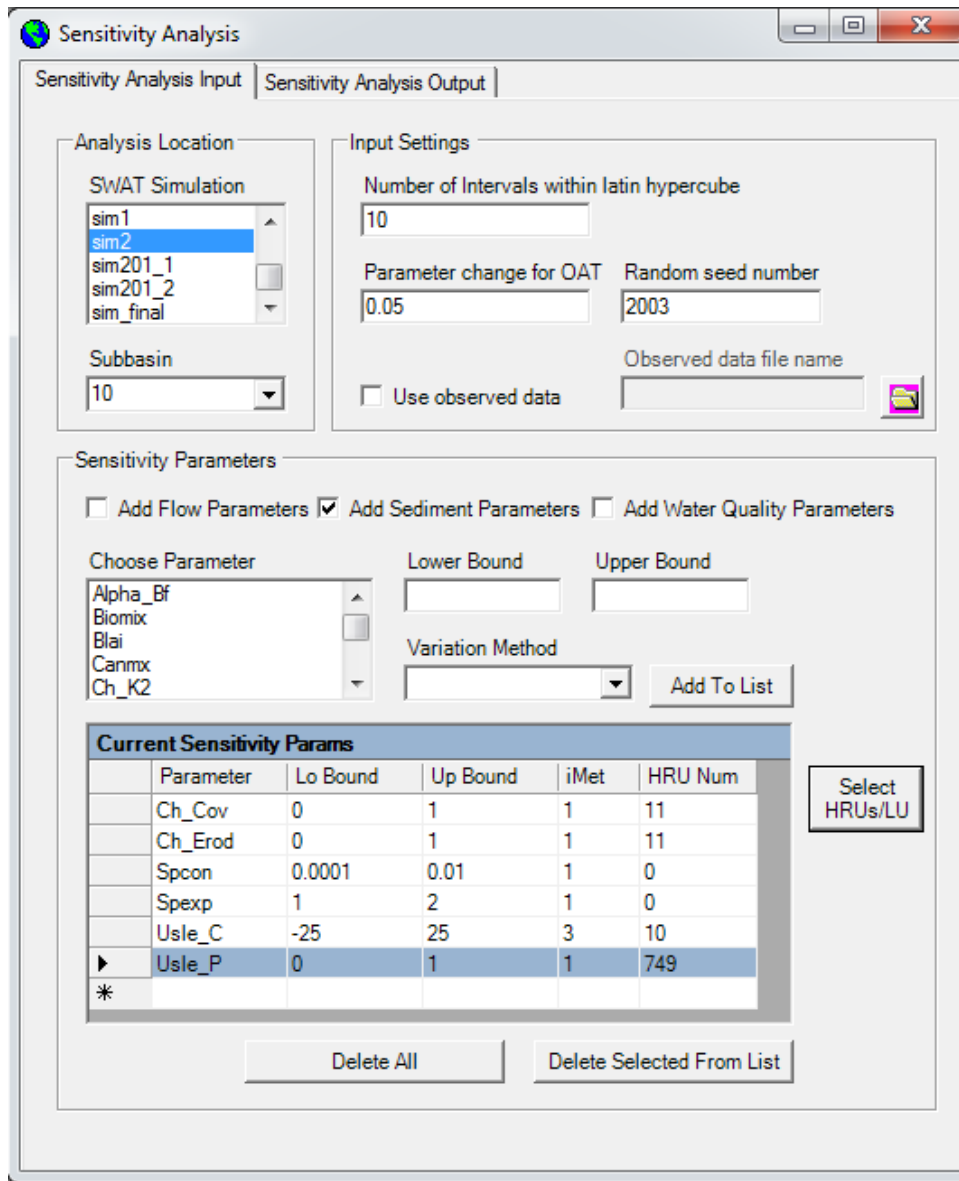


Figura 21. Cuadro de dialogo análisis de sensibilidad

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La configuración para el análisis se llevó a cabo completando la ventana mostrada anteriormente. Se escogió una simulación, en este caso sim 2, a partir de la cual haría el análisis, la cubcuenca a analizar fue la 10, debido a que allí se encuentra localizado el embalse. Los valores de número de intervalos dentro del método LH (N), el número de cambio de parámetro para el método OAT y el número de iniciación aleatorio, se dejaron por defecto, ya que consideramos servirían para el análisis. Para este caso no se contó con datos observados.

Los parámetros a tener en cuenta en el análisis de sensibilidad se encogieron a partir de la recopilación de resultados de trabajos anteriores, los cuales indican que las prácticas del hombre son uno de los factores más incidentes en la problemática de producción de sedimentos. Además se tuvo en cuenta la recomendación del manual del SWAT el cual incluye en el análisis grupos de parámetros que afectan a variables específicas como caudal y sedimentos.

En la Tabla 10 se presentan los resultados arrojados por el análisis de sensibilidad para los 6 parámetros que inciden en la variable producción de sedimentos. El modelo para determinar el grado de sensibilidad de cada parámetro los clasifica en un rango que va desde 1 hasta 7, (la amplitud de este rango depende de la cantidad de parámetros que son evaluados), el cual indica la importancia de cada parámetro en la producción de sedimentos, la clasificación de cada parámetro de acuerdo al rango está dado por:

1 muy importante

2 – 4 importante

4 – 6 relativamente importante

7 no importante

Tabla 10. Resultado análisis de sensibilidad

Parámetro	Rango	Comentario	Proceso
USLE_P	1	Factor de práctica de manejo (USLE)	Erosión
USLE_C	2	Factor de cobertura vegetal (USLE)	Erosión
Spcon	3	Parámetro lineal para calcular la cantidad máxima de sedimentos en el cauce de enrutamiento	Canal
Spexp	4	Parámetro exponencial para calcular la cantidad máxima de sedimentos en el cauce de enrutamiento	Canal
Ch_Erod	7	Factor de erodabilidad del canal	Erosión
Ch_Cov	7	Factor de cobertura del canal	Erosión

Se encontró que el parámetro USLE_P es el más sensible de todos los evaluados y hace parte del proceso de erosión, el USLE_C, el Spcon y el Spexp tienen una influencia importante y finalmente se encontró que ni el Ch_Erod, ni el Ch_Cov influyen en la producción de sedimentos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.4 Calibración del modelo

3.2.4.1 Calibración caudal

Para la calibración del caudal en el modelo se tomaron como referencia parámetros establecidos en el trabajo realizado por el TNC (The Nature Conservancy), llamado "Modelación hidrológica de las cuencas abastecedoras de los embalses La Fe, Riogrande II y Piedras Blancas, departamento de Antioquia" en el año 2011.

A continuación en la Figura 22 y Figura 23. Caudales simulados vs observados, quebrada Espíritu santo., se muestran los resultados arrojados en la calibración de las estaciones Las Palmas y Espíritu Santo, realizada por el TNC, al año 2009. Como alcance de este trabajo el modelo se validó hasta el año 2013 (Ver Anexo D).

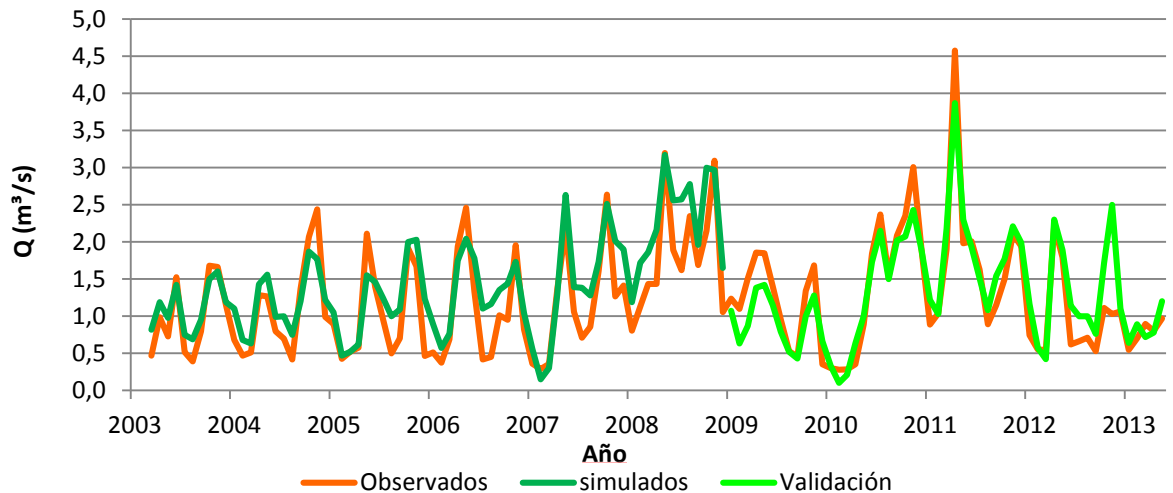
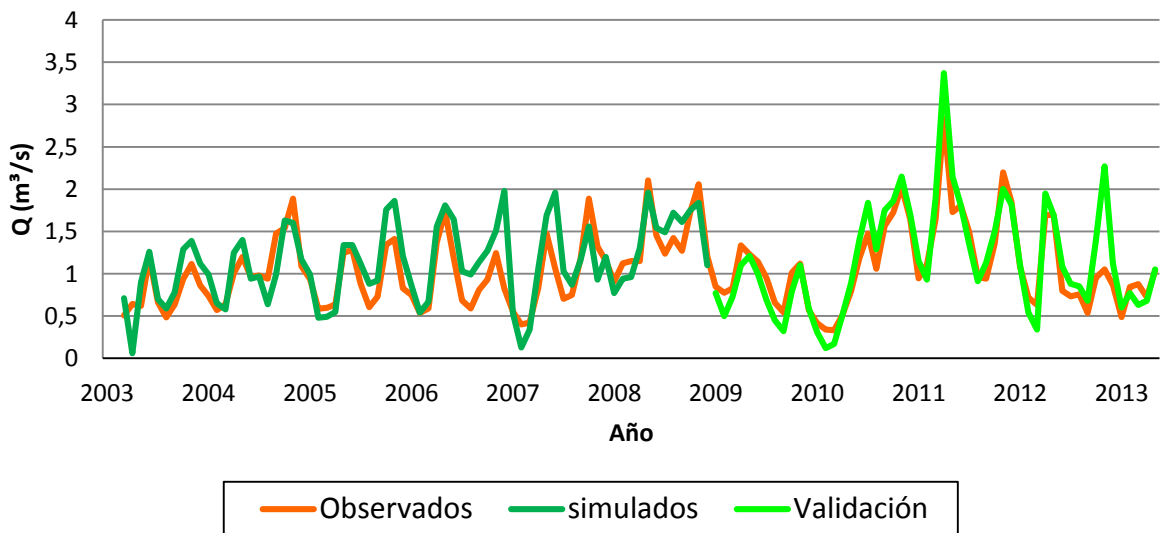


Figura 22. Caudales simulados vs observados, quebrada Las Palmas.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 23. Caudales simulados vs observados, quebrada Espíritu santo.

Según la teoría del coeficiente de Nash explicada en el marco teórico, numeral 1.3.4.1.4, se calculó el coeficiente para las quebradas Espíritu Santo y Las Palmas, arrojando valores de 0,61 y 0,74 respectivamente.

3.2.4.2 Calibración sedimentos

EPM realiza batimetrías aproximadamente cada 4 años, por la tanto para la calibración del modelo para el periodo de análisis (1995-2013), se contó con la información de los años 1997, 2000, 2003, 2006 y 2008 y para la validación con la información de los años 2008 y 2012.

La calibración se llevó a cabo comparando los resultados simulados con los observados y modificando los parámetros más sensibles (ver numeral 3.2.3), para aproximarlos a los datos observados (ver Figura 24)

En el Anexo C se encuentra la hoja de cálculo de la calibración del modelo y los resultados detallados.

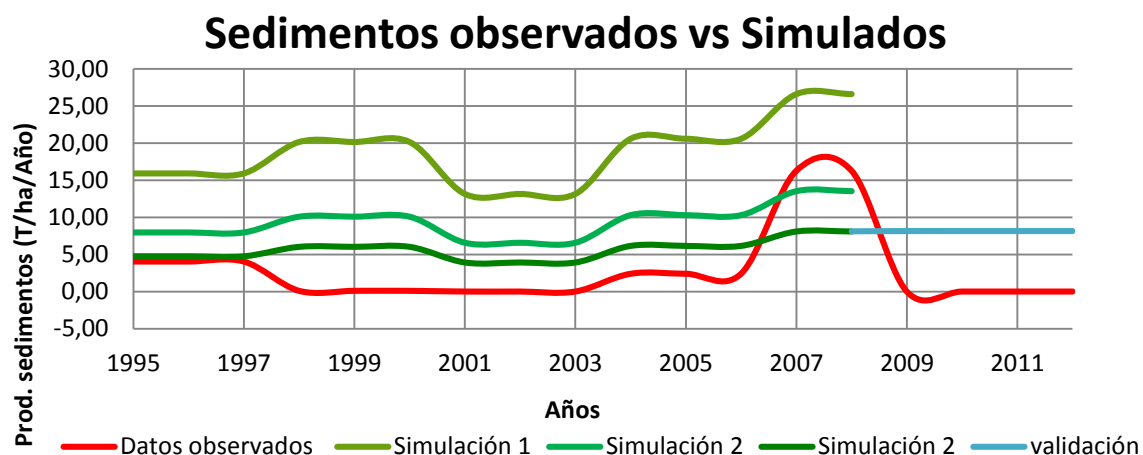


Figura 24. Sedimentos observados vs simulados.

La calibración de la producción de sedimentos no es precisa y esto puede estar asociado a muchos factores, entre ellos: la frecuencia en los levantamientos de las batimetrías, la imprecisión en la realización de las mismas. Así mismo porque el modelo estima el potencial erosivo, el cual generalmente es mayor a la erosión real generada y lo estima para toda la cuenca suponiendo que el 100 % del sedimento generado llega al embalse. Esto no ocurre en la realidad, porque la cuenca actúa como un gran depósito que almacena sedimentos y los retiene por largos periodos de tiempo. La producción de sedimentos se estima con base en el caudal diario simulado. En la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 11 se muestra una comparación de los volúmenes de sedimentos calculados según las batimetrías y los modelados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 11. Cantidad de sedimentos observados y modelado

Descripción	Fecha					
	1997	2000	2003	2006	2008	2012
Tasa de sedimento observada (m³/año)	31188	746	17	18633	125500	0
Tasa de sedimento simulada (m³/año)	36785	46597	30389	47574	62498	62941

Tanto la precisión como las falencias del SWAT dependen fundamentalmente de la zona donde este se vaya a implementar, en países como Estados Unidos se ha estudiado y se ha implementado tanto este modelo, que se considera sin fallas y perfectamente calibrado, incluso se encuentran en la literatura que funciona sin calibración. En algunas universidades de Colombia, como por ejemplo en la universidad de los Andes, donde también se ha implementado el modelo SWAT, se han encontrado falencias en la modelación de los sedimentos por la ecuación de la MUSLE. Esta presenta valores empíricos; como el LS (Factor de topográfico) y el USLE P (factor de práctica de manejo), los cuales fueron ajustados en EEUU y no funcionan en algunas áreas de aquí. El modelo por ejemplo fue establecido para suelos con un porcentaje de materia orgánica menor que 12 % y aquí en Colombia tenemos suelos con un porcentaje mucho mayor de materia orgánica. Además de esto el cálculo de la escorrentía superficial se ha visto afectado por el cálculo del número de curva (CN), este parámetro tiene valores asociados a las prácticas agrícolas los cuales son difíciles de obtener para cada cobertura vegetal y cada tipo de suelo. Debido a todos estos inconvenientes en la medición de muchas variables, se han utilizado en este trabajo valores y datos estimados para suelos de EEUU con características un poco similares, valores que pueden ser la causa de estas diferencias.

3.2.5 Resultados del modelo

A continuación se presenta la estimación del potencial erosivo de la cuenca del embalse La Fe, por cada Unidad de Respuesta Hidrológica en el periodo 1995-2013. Los resultados se expresan en toneladas por hectárea por año (Figura 25).

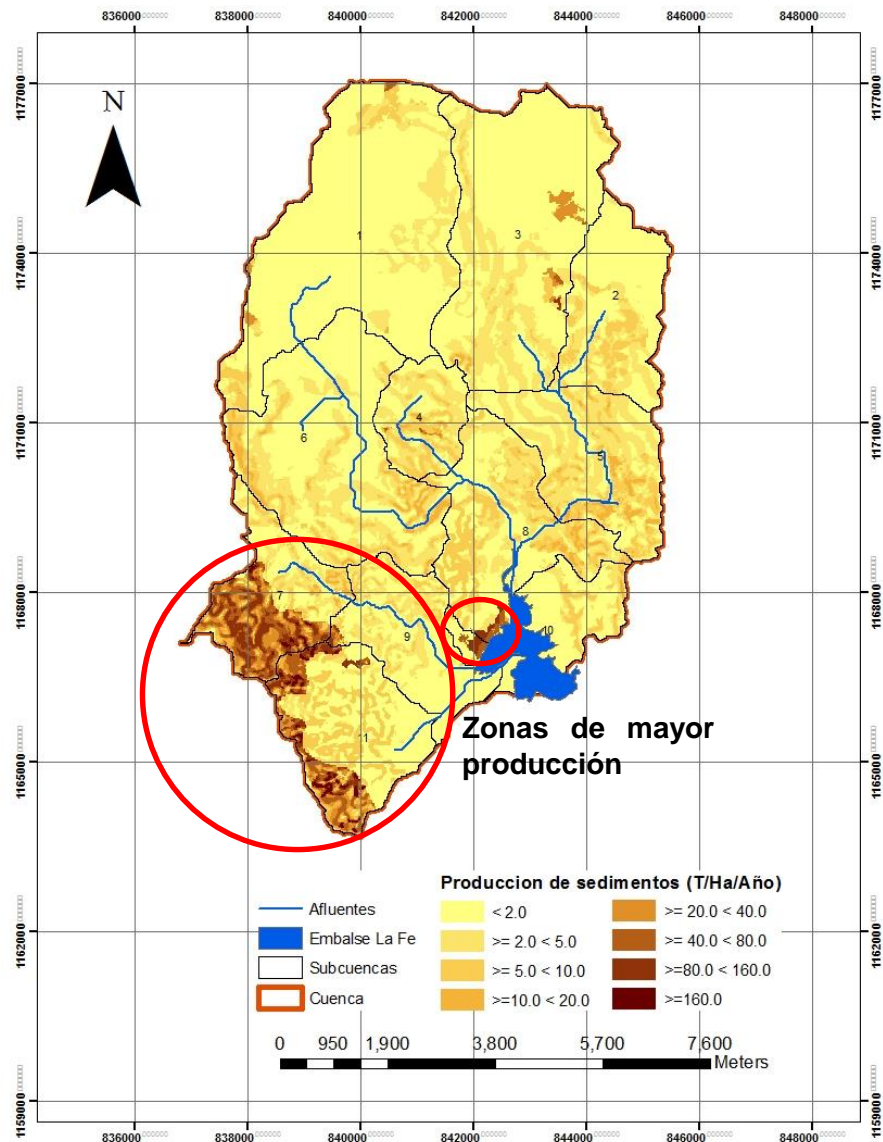


Figura 25. Producción de sedimentos anual por cada HRU en la cuenca.

Según los resultados arrojados por el modelo, se identifican unas zonas con mayor aporte de sedimentos, indicadas en la Figura 25, las cuales exigen un análisis detallado con el fin de detectar esas características y condiciones locales que están contribuyendo considerablemente con la producción de sedimentos.

En el 94 % de las HRUs de toda la cuenca, se presenta una producción de sedimentos menor de 20 ton/ha/año, con una media de 2.3 ton/ha/año. En estas HRUs se presentan coberturas vegetales muy variables sin alguna predominancia. En el 5 % de las HRUs se presenta una producción de sedimentos promedio de 63 ton/ha/año, en estas predominan cultivos y bosques plantados. La zona más crítica en producción de sedimentos se produce en el 1% de las HRUs de la cuenca, las tasas superan los 160 ton/ha/año. En estas zonas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

predominan coberturas vegetales de bosques plantados (PINP), de cultivos (CANT) y de diferentes tipos de pastos (RYEG), que sumados a altas pendientes, dan lugar a una alta producción de sedimentos (Ver Figura 26). En el tipo de coberturas vegetales que predominan esta zona crítica, se presentan actividades de remoción de tierra, además de esto la fuerza de la gravedad, debido a las altas pendientes, se convierte en una aliada, facilitando los procesos de producción y de transporte.

Los resultados del análisis de sensibilidad y de la estimación de producción de sedimentos coinciden en el gran impacto que tiene el uso que se le dé al suelo. Aunque las variables climáticas y topográficas tienen importancia en los procesos erosivos, se considera la acción del hombre, el detonante que altera el ciclo natural de evolución de la cuenca acelerando los procesos de sedimentación.

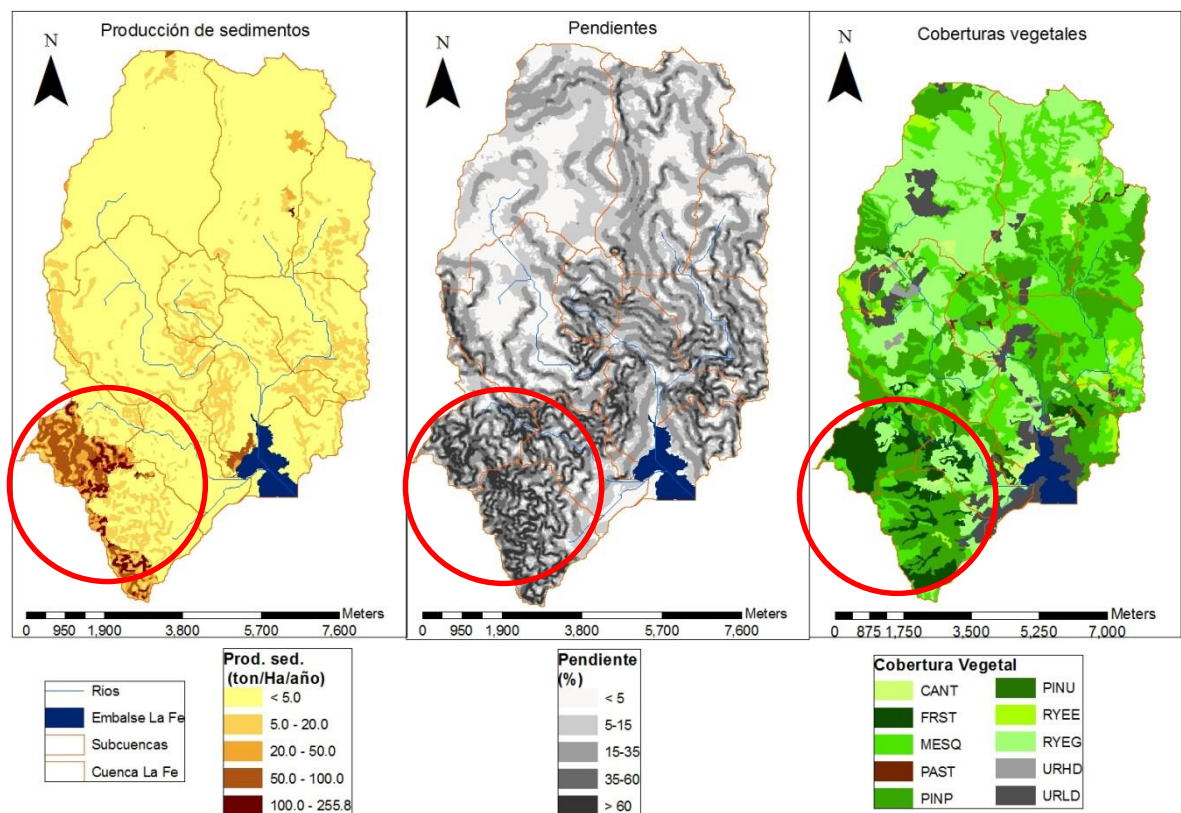


Figura 26. Sedimento, coberturas vegetales y pendientes

3.3 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA

Este análisis se realizará integrando la información obtenida en la cuenca con la existente en el embalse. Los numerales anteriores describieron con detalle las características de la cuenca y la aplicación de un modelo hidrológico para obtener la variabilidad espacial de sedimentos producidos en la misma y el aporte que esta hace en promedio al embalse. A

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

continuación se describirán los aspectos más importantes relacionados con la sedimentación en el embalse y finalmente se integraran ambos aspectos.

La sedimentación en el embalse se obtiene a partir de la información batimétrica histórica existente. Para este embalse se tiene información de ocho periodos, en la Tabla 12, se resumen los resultados obtenidos en las últimas cinco batimetrías usadas para la calibración del modelo y en la Figura 27 se muestra el Modelo Digital del Terreno (MDT) del fondo del embalse construido con la información obtenida en el 2012.

Tabla 12. Información general de las batimetrías en el embalse La Fe durante el periodo de análisis.

Descripción	Fecha						
	1989	1997	2000	2003	2006	2008	2012
Volumen total (Mm³)	14.29	14.044187	14.042	14.0419	13.9860	13.735	13.8534
Volumen útil (Mm³)		11.69	11.79	14.04	11.67	11.58	11.41
Tasa de sediment. (m³/año)	16314	31188	746	17	18633	125500	0

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

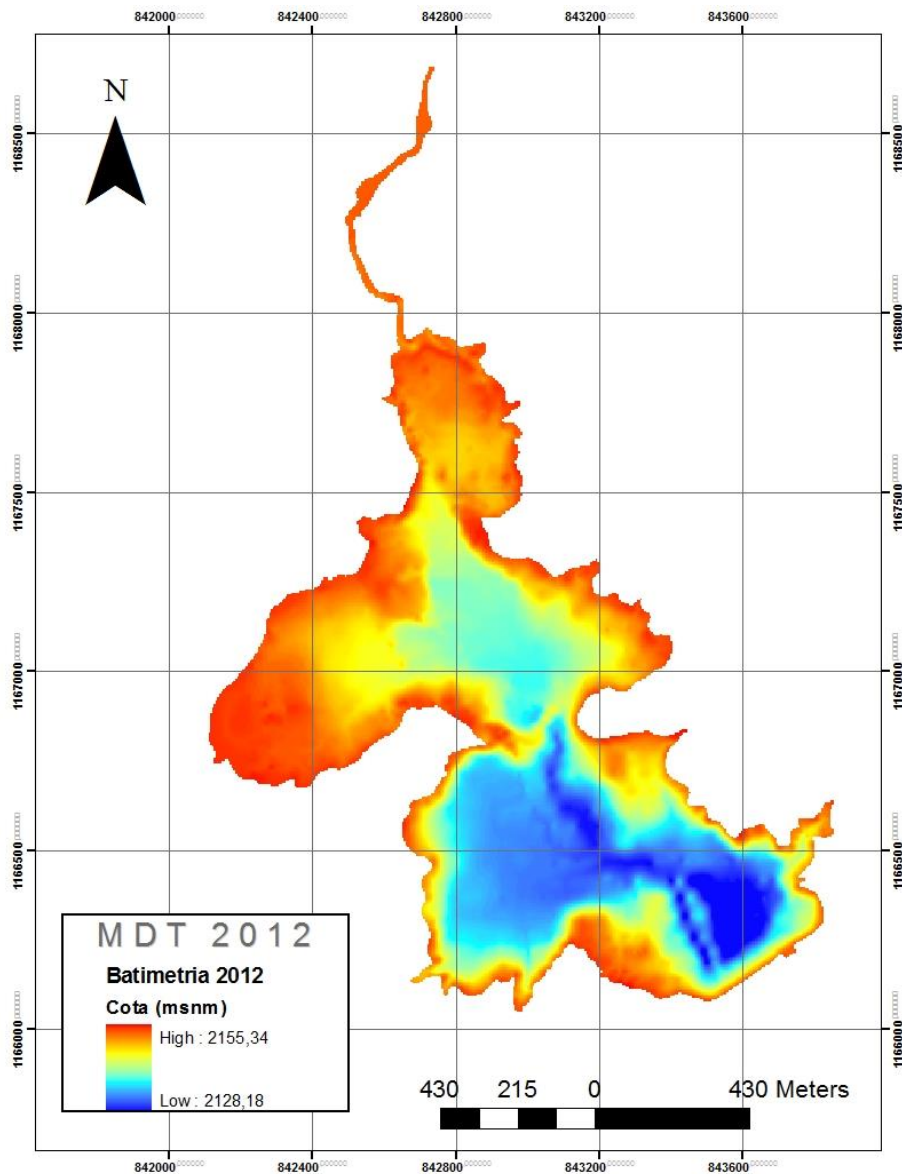


Figura 27. MDT 2012

En caso de mantenerse la tasa de sedimentación más crítica del periodo modelado, la del 2008 con 125500 (m³/año), el embalse quedaría inoperante en 17 años, por esta razón se recomienda establecer medidas de manejo para atacar esta amenaza.

Las tasas de sedimentación correspondientes a cada año muestran un comportamiento poco uniforme, presentando las tasas más altas en los periodos de los años 1997 y 2008 y las menores en los años 2000 y 2003. Específicamente en el año 2008 la actividad antrópica fue intensa, las construcciones de parcelas y carreteras fueron una fuente importante de producción de sedimentos. La última batimetría, realizada en el 2012,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

presenta unos resultados diferentes con respecto a las batimetrías pasadas, esto puede deberse al cambio de equipo para la medición.

En la Figura 28 se muestra la distribución espacial de la sedimentación. Esta se obtuvo con la diferencia entre el MDT estimado en el año 2012 y el estimado en el 1997.

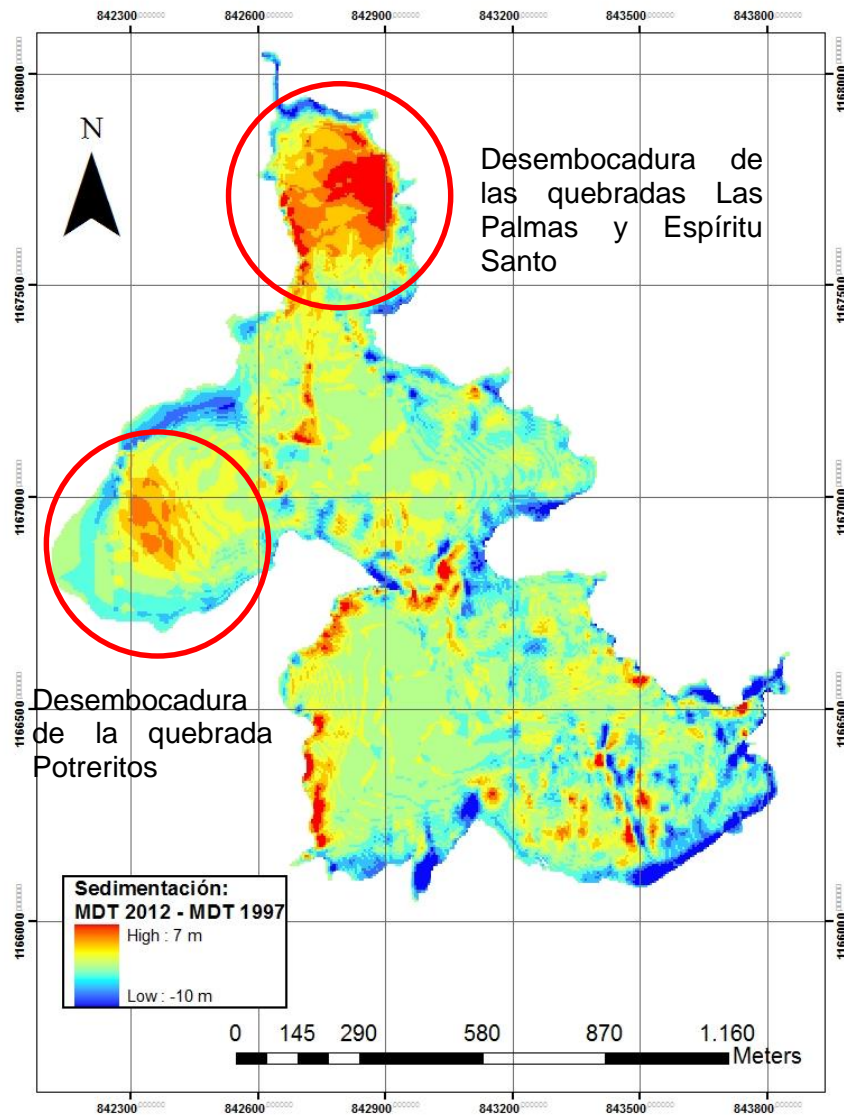


Figura 28. Sedimentación en el embalse.

El mapa muestra que los sedimentos se distribuyen con cierta uniformidad en todo el embalse, a excepción de la zona por la que desembocan las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo, que presenta una alta depositación de sedimentos con espesores que alcanzan los 6 metros. La corriente de estas quebradas arrastra los sedimentos que se

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

producen en gran parte de la cuenca, hasta un punto donde las condiciones de flujo las controla el embalse, estableciendo un flujo más lento y generando la depositación. A esto se debe la localización de este depósito.

Se observan también zonas altamente socavadas distribuidas en el área del embalse, esto puede deberse a condiciones internas de flujo relacionadas con la hidrología y la operación del embalse en diferentes épocas del año.

Siendo consecuentes con los resultados arrojados por el modelo, la zona con mayor sedimentación debería ser la cercana a la desembocadura de la quebrada Potreritos, sin embargo, los resultados de la batimetría muestran que la mayor depositación se presenta en las zonas cercanas a la desembocadura de las quebradas Las Palma y Espíritu Santo, no coincidiendo con los resultados del modelo. Esto podría deberse a una localización de sedimentos en alguna parte de la cuenca cerca a la quebrada Potreritos y un mayor transporte y drenaje de sedimentos en las zonas cercanas a las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo debido a que recorren una porción más grande de la cuenca.

Los afluentes son el principal agente de transporte de sedimentos y su capacidad de arrastre está determinada por el caudal y por muchas otras variables, entre ellas; la pendiente del canal, las profundidades de flujo, que requerirían un análisis más profundo para concluir que condiciones de flujo generan un mayor o menor aporte de sedimentos.

Cabe mencionar que no todos los sedimentos que llegan al embalse se originan necesariamente en la cuenca, algunos de estos pueden generarse en el mismo embalse. La fluctuación de niveles de agua que el embalse pueda tener, es una causa importante en la formación de procesos erosivos en las orillas y a la desestabilización de las márgenes de los cauces agua arriba, este fenómeno es más común para embalses destinados a la generación de energía cuyas fluctuaciones son más abruptas porque atienden demandas de generación de energía inesperadas. Para el caso de La Fe, por tratarse de un embalse para el acueducto, donde la demanda es más constante, no se considera un fenómeno aportante a la problemática de sedimentación.

Por otra parte, la distribución de sedimentos en el embalse no depende exclusivamente del aporte de sedimentos de la cuenca. El embalse está controlado por su hidrodinámica, por lo tanto la localización de los depósitos depende en gran medida de las corrientes internas que se generan por la entrada de los afluentes y por las fluctuaciones debidas a la operación del embalse. A pesar de esto los análisis en la cuenca representan una herramienta muy valiosa en la definición de estrategia de manejo de la problemática porque permite identificar las principales fuentes de sedimentos y su distribución espacial, lo que conlleva a que la problemática se atienda desde su origen, estableciendo así estrategias proactivas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para darle cumplimiento a los objetivos del proyecto, se hizo un barrido de todos los aspectos que caracterizan la cuenca, con el fin de adoptar una visión global que nos permitiera entender el sistema cuenca embalse. El estudio de los aspectos hidrológicos es tal vez uno de los más importantes a la hora de evaluar producción de sedimentos en cualquier lugar del mundo, se llevó a cabo analizando las principales variables relacionadas con el clima regional; precipitación y caudales. Aunque esta información no indica la cantidad de sedimentos que se están produciendo en la cuenca, son un indicativo considerable de que en estos periodos del año pudo haber un mayor aporte de sedimentos por la erosividad y la inestabilidad de terrenos que el agua puede generar. Es muy importante también evaluar el papel del hombre en la producción de sedimentos, el estudio de este aspecto vino acompañado principalmente del reconocimiento de la zona por medio de salidas de campo y mapas de usos del suelo, que nos permitieron entender la incidencia del hombre en este fenómeno, allí se identificaron proyectos de construcción de urbanizaciones, carreteras, y otras intervenciones antrópicas, entre ellas; actividades mineras, cultivos, etc., que representan focos importantes de producción.

El reconocimiento de la zona, aunque representa una actividad importante a la hora de estudiar la evolución de un proyecto de cualquier tipo, no nos permite profundizar mucho en la transformación del área en el tiempo, por el cambio de algunas variables como sedimentos, por esta razón se optó por la modelación matemática de la cuenca por medio del modelo hidrológico SWAT.

Para una estimación aproximada del potencial erosivo de la cuenca, fue necesario inicialmente, realizar una revisión bibliográfica de todas las batimetrías practicadas al embalse La Fe, esto con el fin de conocer la cantidad de sedimentos que se acumulan anualmente en el embalse, para en una etapa posterior, proceder a la calibración del modelo al año 2012. La calibración del modelo, se llevó a cabo a partir de la modificación de las variables más sensibles a la producción de sedimentos según el resultado del análisis de sensibilidad.

El parámetro USLE_P, primero en análisis de sensibilidad, es el factor de práctica de apoyo y se define como la pérdida de suelo debido a una práctica específica. Es una de las variables de la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE), al igual que el factor de cobertura vegetal USLE_C, segunda en el rango del análisis de sensibilidad, la cual se define como la proporción de pérdida de suelo cosechado bajo unas condiciones específicas. El tercer parámetro en el rango del análisis de sensibilidad es el Spcon y define como el factor lineal para el cálculo de la cantidad máxima de sedimentos que puede arrastrar canal de enrutamiento durante un determina tiempo.

Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que las intervenciones del hombre son la principal causa de producción de sedimentos; seguidas por las altas pendientes y los altos regímenes de lluvias. Entre las actividades del hombre más influyentes en la producción de sedimentos se pueden destacar: la deforestación por parte de los terratenientes para despejar sus terrenos, construcciones y demás actividades, las cuales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

representan un gran aporte de sedimentos que se reflejan en las altas tasas de sedimentación del embalse, como las presentadas en los años 2006, 2007 y 2008 de aproximadamente 61000 m³/año, por intensas construcciones de parcelaciones y de casas de veraneo.

Este análisis, resultan también un llamado a la conciencia ambiental, que nos indica que está en nuestras manos la reducción de estas altas tasas de sedimentación y que un buen manejo del suelo, como la preservación del bosque reforestado, representaría una posible solución para atacar esta problemática.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- La modelación de la cuenca del embalse La Fe mostró que en los últimos 4 años se están produciendo aproximadamente 62.940 toneladas de sedimento por año.
- La zona más crítica en cuanto a producción de sedimentos se encuentra en las veredas Pantanillo y Fizebad y su producción supera las 160 ton/ha/año. En caso de establecer medidas de control, se recomendaría priorizar acciones en estos sitios.
- Una vez las quebradas afluentes transportan el sedimento hasta el embalse, las condiciones de transporte cambian. El embalse controla el flujo obligando a gran parte del sedimento a depositarse cerca de la desembocadura, la otra parte de material fino, puede quedar suspendido en el vaso de agua, para luego depositarse en otros lugares del embalse o ingresar a la torre de captación.
- Según los resultados arrojados por el análisis de sensibilidad, se encontró que el parámetro más sensible en la producción de sedimentos en la cuenca es la práctica de manejo del suelo.
- La fluctuación de nivel de un embalse es una causa importante en la formación de procesos erosivos en las orillas y a la desestabilización de las márgenes de los cauces agua arriba, este fenómeno es más común para embalses destinados a la generación de energía cuyas fluctuaciones son más abruptas porque atienden demandas inesperadas. Para el caso de La Fe por tratarse de un embalse para el acueducto, donde la demanda es más constante, no se considera un fenómeno aportante a la problemática de sedimentación.
- Las medidas de manejo de la problemática de sedimentación en la cuenca deben estar por consiguiente orientadas a incorporar medidas de conservación en los planes de ordenamiento territorial (POT) de los municipios del área de influencia del embalse y en los planes ordenamiento y manejo de cuencas aportantes (POMCAS). Igualmente realizar la gestión interinstitucional que permita establecer condicionantes ambientales en el ordenamiento territorial en la cuenca especialmente en la determinación de las densidades máximas por hectárea, ya que asociado a esto hay un uso recreativo que ejerce presión sobre las coberturas vegetales protectoras y por consiguiente afecta los procesos erosivos.
- En desarrollo de este estudio se tuvo conocimiento de algunas iniciativas de la alianza pública-privada Cuenca Verde (Fondo de Agua) que pretende proteger las cuencas abastecedoras de los embalses La Fe y Riogrande II, en las cuales se harán actividades de reforestación, aislamiento de corrientes, restauración de ecosistemas, gestión y conservación del recurso hídrico y biodiversidad, entre otras.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Este tipo de iniciativas deben fortalecerse con la participación de otros actores con mayor incidencia en la problemática de la sedimentación en la cuenca.

- El modelo aplicado en esta cuenca es una herramienta que queda disponible para determinar las zonas más productoras de sedimentos en cualquier condición futura, estimar la tasa de sedimentación en tiempo real y conocer los parámetros más incidentes en condiciones particulares.
- Siendo consecuentes con las zonas de mayor producción, la zona con mayor sedimentación debería ser la cercana a la desembocadura de la quebrada Potreritos, sin embargo, los resultados de la batimetría muestran que la mayor depositación se presenta en las zonas cercanas a la desembocadura de las quebradas Las Palma y Espíritu Santo, no coincidiendo con los resultados del modelo. Esto podría deberse a una localización de sedimentos en alguna parte de la cuenca cerca a la quebrada Potreritos y un mayor transporte y drenaje de sedimentos en las zonas cercanas a las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo.
- El embalse La Fe presenta unas condiciones especiales que lo diferencian de otros embalses, ya que la antigua presa Los Salados, hoy sumergida en la garganta del embalse, se convierte en una trampa de sedimentos que incide en la distribución espacial en el embalse y afecta la normal operación de las compuertas de la torre de captación. Un complemento de este estudio podría orientarse a profundizar en la incidencia de la presa de Los Salados en relación con la dinámica de los sedimentos al pie de la torre de captación.
- Este proyecto se fundamentó en el modelo hidrológico SWAT, el cual además de requerir información de entrada a la cual tuvimos acceso en Empresas Públicas de Medellín, es un modelo que tiene estrecha relación con el sistema de información geográfico (ArcGis) que permiten una visualización de la cuenca, el uso de bases de datos, una buena representación digital y un mejor análisis de los datos de salida del modelo.
- La representación hidrológica y sedimentológica por medio de modelos como SWAT, exigen una previa calibración, para no incurrir en resultados sin sentido con ningún parecido a la realidad. Por esta razón es una práctica esencial, para lograr un ajuste aproximado de la magnitud de los datos observados y modelados.
- Como recomendación, se sugiere realizar trabajos similares con otros modelos hidrológicos, con el fin de llevar a cabo comparaciones detalladas que permitan identificar, según los resultados modelados, las posibles ventajas y desventajas de los diferentes modelos aplicados en diferentes lugares con condiciones ambientales específicas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Es importante tener en cuenta que se está asumiendo que las causas de la producción de sedimentos corresponden a eventos dentro del periodo de análisis (1995-2012), porque es probable también que la producción sea por eventos pasados que se están manifestando dentro del periodo de la modelación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

BIBLIOGRAFÍA

- CABRERA, J. (2011). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima.
- Construmatica. (2000). *Construmatica*. Recuperado el 2013, de http://www.construmatica.com/construpedia/Densidad_Aparente
- DONADO GARZÓN, L. D. (2004). *MODELO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN SUELOS; Tesis de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos*. Bogotá.
- DUMAS SALAZAR, Á. (2012). *Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo*. España.
- DUQUE GUZMÁN, L. M. (1998). *Hidráulica; Artículos; Coeficiente de Manning*. Recuperado el 2013, de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/manning/manning.htm>
- El Retiro Antioquia. (2012). *El Retiro*. Recuperado el 2013, de <http://www.elretiro-antioquia.gov.co>
- EPM. (2008). *Ingeniería de presas en Empresas Públicas de Medellín*. Medellín.
- EPM. (2013). *Sondeo Batimétrico del Embalse La Fe*. Medellín.
- EPM; Subgerencia Ambiental. (2013). *Informe final sondeo batimétrico de 2012*. Medellín.
- GARCÍA FLORES, M., & MAZA ÁLVAREZ, J. A. (2007). *Manual Ingeniería de ríos: origen y propiedades de los sedimentos*. Medellín: Versión actualizada del instituto de ingeniería UNAM.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. (2005). *Hidrología de cuencas de tamaño medio. Hidrograma unitario*. Madrid.
- GRACIA SÁNCHEZ, J. (2000). *Manual de Ingeniería de Ríos, sedimentación en embalses cap. 18*. Medellín: Instituto de Ingeniería UNAM para la Comisión Nacional del Agua.
- Neitsh, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation; version 2005*. Texas.
- ORTEGA A., S., RESTREPO, J. P., CORREA U., R., GÓMEZ G., A., & TORO B., M. (2010). *ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA DE EMBALSES TROPICALES*. Medellín.
- SILVA M, G. A. (2003). *Transporte de sedimentos en ríos*. Bogotá.
- SUÁREZ DÍAZ, J. (2001). *CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES*. Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- TNC. (2012). *Estructuración de un fondo de conservación para las cuencas abastecedoras de los embalses de Medellín y el Valle de Aburrá*. Cartagena.
- UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (2003). *Transporte de sedimentos*.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

URIBE R, N., & VALENCIA G, J. (2011). *MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS ABASTECEDORAS DE LOS EMBALSES LA FE, RIOGRANDE II Y PIEDRAS BLANCAS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA*. Cali.

URIBE RIVERA, N. (2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario: versión SWAT 2005*. cali.

VAHOS M, Juan David. (2012). *Modelamiento Hidrológico y Batimétrico con el modelo SWAT para la cuenca de Piedras Blancas*. Medellin.

ANEXOS

Anexo A. Modelos hidrológicos.

Anexo B. Información de las estaciones.

Anexo C. Calibración sedimentos.

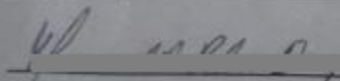
Anexo D. Calibración de caudales.

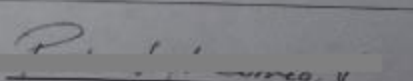


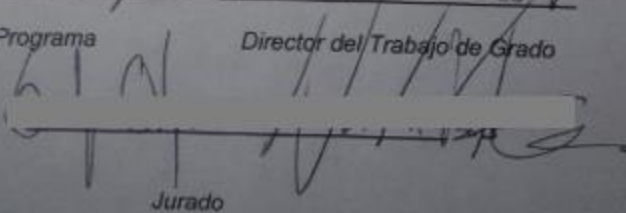
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	22/11/2013						
Nombre del proyecto:	Variabilidad espacial de los sedimentos en la cuenca del embalse La Fé						
Director del proyecto:	Winston Cuellar						
<table border="1"><thead><tr><th>Nombre del estudiante</th><th>Programa académico</th></tr></thead><tbody><tr><td>Felipe Londoño</td><td>Ingeniería Civil</td></tr><tr><td>Santiago Zapata</td><td>Ingeniería Civil</td></tr></tbody></table>		Nombre del estudiante	Programa académico	Felipe Londoño	Ingeniería Civil	Santiago Zapata	Ingeniería Civil
Nombre del estudiante	Programa académico						
Felipe Londoño	Ingeniería Civil						
Santiago Zapata	Ingeniería Civil						
Nombre del Jurado:	Santiago Ortega Nicolas Velázquez Giron						
Evaluación del proyecto:							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado							
Espacio exclusivo para jurado							
<input checked="" type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							


Director del Programa


Director del Trabajo de Grado


Jurado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.