



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EFECTOS
DE CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL
RÍO MIRA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA
EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORAS:

Nuvia Lisbeth Troya Medina

Daniela Alejandra Villarreal Pinchao

DIRECTORA:

Ing. Eleonora Melissa Layana Bajaña, MSc.

IBARRA, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN Nro. 001-073-CEAACES-2013-13

Ibarra-Ecuador

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 06 de noviembre del 2021

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA", de autoría de las señoritas Nuvia Lisbeth Troya Medina y Daniela Alejandra Villarreal Pinchao, estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que las autoras han procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

Ing. Eleonora Layana, MSc.

DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

Ing. Gabriel Jácome, MSc.

MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Oscar Rosales MSc.

MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA IDENTIDAD:	DE	0932079031	
APELLIDOS NOMBRES:	Y	Nuvia Lisbeth Troya Medina	
DIRECCIÓN:	Carondelet, San Lorenzo, Esmeraldas		
EMAIL:	nltroyam@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	N/A	TELÉFONO MÓVIL:	0999430598

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA IDENTIDAD:	DE	0401566799	
APELLIDOS NOMBRES:	Y	Daniela Alejandra Villarreal Pinchao	
DIRECCIÓN:	Nuevo Amanecer, Tulcán, Carchi		
EMAIL:	davillarrealp@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	N/A	TELÉFONO MÓVIL:	0980888537

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA”
AUTOR (ES):	Nuvia Lisbeth Troya Medina Daniela Alejandra Villarreal Pinchao
FECHA: DD/MM/AAAA	06/12/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Eleonora Layana MSc.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 06 días del mes de diciembre de 2021

LAS AUTORAS:



.....
Nuvia Lisbeth Troya Medina



.....
Daniela Alejandra Villarreal Pinchao

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de forma especial a la Universidad Técnica del Norte, a la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables y su cuerpo docente por brindarnos valiosos conocimientos para guiarnos a cumplir con los objetivos propuestos en el ámbito educativo y ser profesionales con buenos estándares.

Al Ing. Paúl Arias MSc. por sus consejos y dedicación en cada momento para el desarrollo de la investigación. A nuestros asesores, Ing. Gabriel Jácome MSc. y Ing. Oscar Rosales MSc. por la paciencia, conocimiento y correcciones oportunas para que se efectuara un buen trabajo.

A nuestra familia por todo su apoyo y motivación diaria, les expresamos nuestros infinitos agradecimientos por ser ese motor que nos dio fuerza en cada instante durante toda la formación profesional y gracias a eso lograr culminar con éxito el presente trabajo.

¡Gracias!
Daniela y Nuvia

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios por brindarme fuerzas y entendimiento en cada parte del proceso de aprendizaje, por haber sido mi norte cada día desde los inicios de mi formación académica.

A mis padres Nuvia y Carlos, con toda mi admiración, profundo amor y respeto, por ser siempre el pilar fundamental en mi vida, por su apoyo, trabajo arduo, consejos y esfuerzo para sacarme adelante, por siempre confiar en mi capacidad y en mí aún en la distancia. Con su ejemplo me han impulsado a seguir y poco a poco alcanzar cada una de mis metas, son mi vida entera, los amo demasiado.

A mis hermanos Carlitos, Lili y María Isabel quienes me han ayudado directa e indirectamente con su alegría, con los buenos momentos que compartimos día a día acompañados de sus ocurrencias aun cuando estábamos lejos, son mi impulso para seguir adelante.

A mi Jorge, quien ha estado apoyándome incondicionalmente en esta etapa de mi vida pendiente de cada avance, gracias por todo el tiempo, palabras precisas de amor y aliento junto a todos los consejos brindados.

A todos mis docentes, por su paciencia y enseñanzas que hicieron posible el desarrollo del presente trabajo.

Nuvia Troya Medina

DEDICATORIA

Con tanta felicidad y satisfacción en mi corazón quiero dedicar este trabajo a mi Dios, por darme tantas bendiciones a lo largo de mi carrera, porque he sentido que me ha concedido el don de la fortaleza, perseverancia y dedicación para cumplir con uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Nancy y Carlos por ser mis guías, porque gracias a su sacrificio, trabajo y amor me han permitido continuar con este proceso, pero sobre todo por ser un ejemplo para alcanzar objetivos, por motivarme a cumplir con todo lo propuesto y creer en mí y en mis capacidades.

A mis hermanos Paula y Carlos Andrés por llenar mi vida de alegrías y darme tanto apoyo en todo momento, ha sido muy importante para mí su compañía y ayuda, sus palabras y consejos me han llevado a ser mejor persona.

A Cristian porque su amor ha sido muy importante para llenar de esperanza mi vida y una ayuda para realizar este trabajo, sus palabras me han motivado a crecer como persona y pronto como profesional, porque tras tantas dificultades estamos creciendo juntos.

A mi hijo Aaron Daniel por ser mi más grande inspiración y motivación, por acompañarme en el trayecto de este trabajo desde mi vientre y ahora en mis brazos, “Tu llegada ha cambiado mi vida por completo, pero sin duda ahora eres mi motor para salir adelante y cumplir todos mis objetivos. Hoy me debo a una persona y esa persona eres tú hijo mío”.

Daniela Villarreal Pinchao

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Revisión de antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema y justificación	2
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Hipótesis	5
1.5.1 Hipótesis nula.....	5
1.5.2 Hipótesis alterna.....	5
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Marco teórico referencial	6
2.1.1 Cuenca hidrográfica	6
2.1.2 Relación entre el recurso hídrico y el recurso suelo en las cuencas hidrográficas	7
2.1.3 Cambio de uso del suelo y su impacto en las cuencas hidrográficas.....	9
2.1.4 Erosión hídrica y sus implicaciones.....	10
2.1.5 Aplicación de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica.....	11
2.1.6 Modelos hidrológicos en el análisis de producción de sedimentos	13
2.2 Marco legal	16
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	18
3.1 Descripción del área de estudio	18
3.1.1 Ubicación	18
3.1.2 Parámetros morfométricos y geomorfología.....	20
3.1.3 Suelos	22
3.1.4 Hidrología	23
3.1.5 Clima y relieve	23
3.1.6 Diagnóstico social.....	24

3.2 Métodos.....	24
3.2.1 Modelamiento de la generación de sedimentos bajo escenarios de cambio de uso del suelo.....	25
3.2.2 Validación de la generación de sedimentos por erosión hídrica anual en las subcuencas	39
3.2.3 Análisis de las causas antrópicas de la variación de erosión hídrica	40
3.3 Materiales y equipos	42
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1 Modelamiento de la generación de sedimentos bajo escenarios de cambio de uso del suelo.....	43
4.1.1 Evaluación del cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018	43
4.1.2 Análisis de cambio de uso de suelo mediante matriz de transición	44
4.1.3 Caudales simulados de la cuenca media-alta del río Mira	48
4.1.4 Calibración y validación de datos	49
4.1.5 Producción de sedimentos.....	53
4.2 Validación de la generación de sedimentos por erosión hídrica anual en las subcuencas	56
4.2.1 Simulación de la producción de sedimentos desde 2007 a 2021	59
4.2.2 Análisis de muestras de agua	60
4.3 Análisis de causas antrópicas de la variación de erosión hídrica de la cuenca media-alta del río Mira.....	62
4.3.1 Regresión Geográfica Ponderada.....	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1 Conclusiones	67
5.2 Recomendaciones.....	68
REFERENCIAS	69
ANEXOS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de los puntos extremos de la cuenca media-alta del río Mira.....	19
Tabla 2. Cantones por cada provincia que conforma la cuenca media-alta del río Mira.....	20
Tabla 3. Pendientes presentes en la cuenca media-alta del río Mira.....	21
Tabla 4. Significado de los valores del índice de Kappa	29
Tabla 5. Estaciones meteorológicas de la cuenca media-alta del río Mira	32
Tabla 6. Estaciones hidrológicas de la cuenca media-alta del río Mira	32
Tabla 7. Parámetros climáticos requeridos en el modelo SWAT	33
Tabla 8. Parámetros edáficos requeridos en el modelo SWAT	34
Tabla 9. Rangos y relieves de pendientes	35
Tabla 10. Criterios de aceptabilidad del R^2 para la Regresión Geográfica Ponderada.....	41
Tabla 11. Materiales y equipos utilizados en la investigación.....	42
Tabla 12. Matriz de transición para el periodo 1996 – 2018 (los valores marcados de color gris son porcentajes de áreas de las coberturas que se mantienen conforme avanza el tiempo).....	47
Tabla 13. Parámetros sensibles para la calibración.....	50
Tabla 14. Valores de caudales promedio reales y los calibrados.....	51
Tabla 15. Valores de sedimentos promedio reales y calibrados	54
Tabla 16. Valores de generación de sedimentos por períodos en las microcuencas	56
Tabla 17. Resultados de los análisis de agua en la estación hidrológica H0015 ..	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del marco legal.....	17
Figura 2. Ubicación de la cuenca media-alta del río Mira en Ecuador.....	18
Figura 3. Curva hipsométrica de la cuenca media-alta del río Mira.....	21
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en el estudio.....	25
Figura 5. Flujograma del proceso para la realización de cartografía del cambio de uso del suelo de la cuenca media-alta del río Mira.....	30
Figura 6. Flujograma del proceso para la modelación hidrológica en SWAT.....	38
Figura 7. Representación de cobertura y uso de suelo de la cuenca media-alta del río Mira: A) Año 1996; B) Año 2007 y C) Año 2018	43
Figura 8. Disminución y aumento porcentual de coberturas y usos de suelo entre 1996-2018 (datos presentados con respecto al valor total de la cuenca en estudio).	45
Figura 9. Comparación caudal observado con el simulado periodo 1996-2007...48	
Figura 10. Comparación caudal observado con el simulado periodo 2007-2018.49	
Figura 11. Comparación caudal observado con el calibrado periodo 1996-2007.52	
Figura 12. Comparación caudal observado con el calibrado en el periodo 2007-2018.....	53
Figura 13. Representación de la generación de sedimentos en las subcuencas: A) Periodo 1996-2007 y B) Periodo 2007-2018	58
Figura 14. Proyección a 2021 de la producción de sedimentos.....	59

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EFECTOS DE
CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO
MIRA

Nuvia Lisbeth Troya Medina

Daniela Alejandra Villarreal Pinchao

RESUMEN

La alteración de la calidad del suelo referente al cambio de su cobertura por factores antrópicos ha conllevado al deterioro de las condiciones bióticas y abióticas del entorno influyendo directamente en la sostenibilidad de las cuencas condicionándolas a ser menos productivas. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la variación de erosión hídrica en la cuenca media-alta del río Mira en el periodo 1996-2018 mediante la aplicación del modelo SWAT. Se utilizaron imágenes satelitales de tres años para evaluar el cambio espacio-temporal de la cobertura vegetal y uso de suelo. La erosión hídrica del suelo se estimó mediante la aplicación del modelo SWAT y se empleó una regresión geográficamente ponderada para conocer la asociación espacial entre el cambio de uso de suelo y la erosión hídrica. De acuerdo con el análisis, se obtuvo una disminución del bosque, vegetación arbustiva, páramo y otros en un 7.48%, 17.58%, 1.98% y 13.95% respectivamente, mientras que el área sin vegetación, cultivos, zona urbana, pastos y otros aumentaron un 2.60%, 24.60%, 0.34%, 10.69% y 2.76%. En cuanto a los modelos hidrológicos los caudales fueron validados satisfactoriamente de acuerdo con los estadísticos R^2 , PBIAS y Nash Sutcliffe, lo que permitió estimar una erosión hídrica de 34.18 t/ha/año con mayor concentración en la subcuenca del río Rumichaca y una producción total de 17 248 933.67 toneladas de sedimento. Según la regresión geográficamente ponderada hubo asociación espacial alta entre los cultivos y pastos demostrando relación con la expansión de la frontera agrícola y ganadera. En conclusión, se logró estimar la producción de erosión hídrica y determinar las áreas más afectadas en la cuenca a la vez que se relacionó con la influencia de los factores antrópicos.

Palabras clave: Caudales, sedimentos, SWAT, factores antrópicos

ABSTRACT

The alteration of the quality of the soil related to the change of its coverage due to anthropic factors has led to the deterioration of the biotic and abiotic conditions of the environment directly influencing the sustainability of the watersheds conditioning them to be less productive. The objective of this study was to analyze the variation of water erosion due to the change of land use in the middle-upper Mira River watershed in the period 1996-2018 by applying the SWAT model. Three-year satellite images were used to assess the spatio-temporal change in vegetation cover and land use. Soil water erosion was estimated by applying the SWAT model and a geographically weighted regression was applied to know the spatial association between land use change and water erosion. As results, decrease of the forest, shrub vegetation, paramo and others was obtained by 7.48%, 17.58%, 1.98% and 13.95% respectively, while the area without vegetation, crops, urban area, pastures and others increased 2.60%, 24.60%, 0.34%, 10.69% and 2.76%. Regarding the hydrological models, the flows were satisfactorily validated according to the R^2 statistics, PBIAS and Nash Sutcliffe, which allowed estimating a water erosion of 34.18 t/ha/year was estimated with a higher concentration in the sub-basin of the Rumichaca River and a production of 17 248 933.67 tons of sediment. According to the geographically weighted regression, there was a high spatial association between crops and pastures, demonstrating a relationship with the expansion of the agricultural and livestock frontier. In conclusion, it was possible to estimate the production of water erosion and determine the most affected areas in the basin while it was related to the influence of anthropic factors.

Key words: Streamflow, sediments, SWAT, anthropic factors

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión de antecedentes

Ecuador posee varias cuencas hidrográficas afectadas por una alta presión de las actividades que se ejercen dentro y alrededor de ellas para satisfacer las necesidades básicas del ser humano (Martínez y Villalejo, 2018). Frente a esta situación la alteración de la calidad del suelo con respecto al uso que se le da ha conllevado al deterioro de las condiciones bióticas y abióticas del entorno influyendo en la sostenibilidad de las cuencas y condicionándolas a ser menos productivas (Peña et al., 2006). Hasta la actualidad, varios estudios sobre el cambio y uso suelo a escala de cuenca en Ecuador han sido reconocidos en referencia a un alto número de factores que actúan sucesivamente en el transporte y almacenamiento de sedimentos (Harden y Scruggs, 2003; Portillo, 2005).

De acuerdo con lo mencionado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2006), los bosques han tenido una pérdida de 7.3×10^6 ha/año, cuyas mayores afectaciones residen en Sudamérica dentro del cual Ecuador el país con mayor tasa de pérdida anual (-1.7%). A la vez, el cambio de uso del suelo frente al reemplazo de las zonas boscosas por tierras agrícolas con frecuencia tiene repercusión sobre el ciclo hidrológico y sus procesos (Portillo, 2005). Estudios como el de Fleischbein et al. (2006) indican que uno de los efectos de la deforestación es el incremento de caudales medios y, en consecuencia, una mayor afectación de la precipitación sobre el suelo, dando lugar a la erosión hídrica.

Según Wang y Hu (2009) el adecuado manejo y administración del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica parte del conocer la influencia cuantitativa de los factores del ciclo hidrológico. En este ámbito, la sedimentación es un factor clave para las propuestas de desarrollo a nivel local y regional. Para esta labor, es importante el empleo de la herramienta de simulación hidrológica SWAT “Soil and Water Assesment Tool” desarrollado por el Departamento de

Agricultura de Estados Unidos (USDA). Según Oñate-Valdivieso y Aguilar-Naranjo (2009), un caso de análisis con SWAT corresponde a la cuenca binacional del río Catamayo - Chira, en la cual se determinó la relación existente entre el cambio de cobertura vegetal y la producción de sedimentos frente a la disposición del recurso hídrico para las comunidades.

En este contexto, el modelamiento hidrológico que emplea SWAT ha resultado importante para estudios en cuencas de la región andina de Ecuador pues considera las condiciones climatológicas y topográficas. De tal forma, enfocados en analizar el comportamiento del suelo en relación con el clima Castillo y Ortega (2009) evidenciaron que en cuatro microcuencas de montaña una alta presencia de bosque disminuyó el efecto erosivo de la precipitación sobre la tierra. De forma similar, el estudio realizado por Jácome (2016) demostró el comportamiento relacionado del suelo con el agua al indicar que a medida que disminuye la cobertura vegetal, los sedimentos aumentan en la cuenca del río Bobo, razón por la que en el año 2002 tuvo una generación de 0.06 t/ha/día, aumentando a 0.45 t/ha/día para 2015.

1.2 Planteamiento del problema y justificación

La problemática actual en el Ecuador respecto a la gestión del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas reside en el almacenamiento, calidad y distribución del agua relacionados a su naturaleza y uso en respuesta a las variaciones climáticas y afectaciones antrópicas (Rodríguez et al., 2014). El recurso suelo también recibe un alto impacto al estar expuesto permanente a situaciones tales como actividades agrícolas y expansión urbana. Ambos recursos tienden a convertirse en el punto de inflexión dentro de las cuencas hidrográficas al ser las unidades paisajísticas de mayor importancia (Hurtado y Yáñez, 2015).

La cuenca del río Mira presenta un afluente que tiende a aumentar y disminuir a lo largo de las temporadas secas y lluviosas, dichas variaciones y concentraciones se han visto alteradas por el cambio de uso de suelo. Pasando progresivamente de bosques a otros usos relacionados a la agricultura, ganadería y asentamientos humanos, motivo por el cual se ha diagnosticado la presencia de una potencial

erosión hídrica (Villacrés, 2015). Por lo general, este tipo de erosión conduce a una alta producción de sedimentos que se depositan en el afluente del río lo que disminuye su capacidad de embalse y su calidad (Hurtado y Yáñez, 2015).

El grado de afectación por la generación de sedimentos debido a la erosión hídrica depende de la sección de la cuenca a analizar ya que hay influencia del relieve, porcentaje de la pendiente y el suelo (Laino et al., 2015). Las partes media y baja de una cuenca hidrográfica generalmente presentan mayores repercusiones de la problemática sedimentaria que en la cuenca alta por sus condiciones fisiográficas como lo indica Jadán et al. (2016). Sin embargo, para fines de gestión, mitigación y prevención es necesario siempre tomar en cuenta todas las secciones de la cuenca (González, 2017) por las decisiones pertinentes al presentarse conflictos ambientales por la contaminación de las vertientes, aprovechamiento y distribución del recurso hídrico (Jácome, 2017).

Con respecto a la situación, para el presente estudio se ha tomado como base de análisis a la cuenca media-alta del río Mira en el período 1996-2018. Esto como respuesta de un cambio pragmático de uso del suelo al evidenciar el aumento de la frontera agrícola y disminución de la cobertura vegetal (Ortiz et al., 2017). Además, la falta de acciones dirigidas al análisis del comportamiento de la cuenca y sus factores debido a las condiciones climáticas y antrópicas actuales conducen a la urgencia de conocer a profundidad el tránsito de los caudales en relación con la generación de sedimentos a lo largo del tiempo (Abad, 2020).

La investigación se orienta en dar a conocer un análisis acerca de los cambios que ha experimentado la cuenca media-alta del río Mira en la producción de sedimentos. El principal antecedente es el cambio de uso del suelo en el periodo 1996 – 2018 con enfoque en la repercusión que ha tenido en el mantenimiento de caudales y el servicio de provisión del recurso hídrico. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2007) manifiesta que depende de la cobertura del suelo la calidad de los servicios ecosistémicos como son la oferta y el suministro mundial de agua dulce para uso doméstico, agrícola e industrial (Guzmán, 2007).

En particular, una cuenca hidrográfica que presente pérdida de su cobertura vegetal va a conllevar una rápida erosión por exposición del suelo a las fuertes lluvias y vientos. Además, existe una alteración de la dinámica en la capa fértil del suelo frente a la modificación de sus componentes (Cotler et al., 2007). Por este motivo, es necesaria la gestión y planificación como apoyos importantes en los estudios previos que se diagnostiquen en las zonas.

El estudio se ha planteado tomando en cuenta a las actividades antrópicas que conllevan al cambio de uso de suelo para la producción agrícola y ganadera dentro de la cuenca media-alta del río Mira. Debido a que causan un fuerte impacto en el almacenamiento de agua y aceleran los procesos erosivos de los suelos. Con esta perspectiva, estudios como el de Henry et al. (2013) demostraron una diferencia de producción de sedimentos de 7.02 t/ha/año de las áreas cultivadas frente a las no cultivadas en la cuenca ecuatoriana del río Chimbo lo que valida la relación entre el cambio de uso del suelo y los sedimentos.

El uso de modelos hidrológicos presenta alto protagonismo como herramienta para la predicción de los impactos ambientales debido a cambios de uso y manejo de suelo (Barrios y Urribarri, 2010; Valenzuela, 2005). Por consiguiente, el desarrollo de un modelamiento hídrico con SWAT a escala de cuenca básicamente permite hacer una simulación válida de los impactos que tienen las actividades de manejo de suelo en la producción de agua, sedimentos y químicos de la agricultura (Barrios y Urribarri, 2010). El uso de los Sistemas de Información Geográfica se ha vuelto indispensable para el desarrollo y levantamiento de información de la cuenca media-alta de río Mira.

Los resultados de la presente investigación son significativos ya que ayudan a entender la evolución del cambio de uso de suelo. De la misma forma, presenta dos modelaciones con las respectivas generaciones de sedimentos a lo largo de los años de estudio, lo que posibilita conocer las áreas con mayor incidencia de esta problemática y sus relaciones con varios aspectos del cambio de uso del suelo en la cuenca media-alta del río Mira. Los modelamientos sirven de base para proyectos de planificación que se realicen posteriormente en cuanto al recurso hídrico y el manejo adecuado de suelos. A la vez, aporta al eje de Transición

Ecológica del Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2021). Objetivo 11: Conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la variación de erosión hídrica en la cuenca media-alta del río Mira en el periodo 1996-2018 mediante la aplicación del modelo SWAT.

1.4.2 Objetivos específicos

- Modelar la generación de sedimentos producidos por erosión bajo condiciones de cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018.
- Validar la generación de sedimentos por erosión hídrica anual en las subcuencas.
- Analizar las causas antrópicas de la variación de erosión hídrica de la cuenca media-alta del río Mira.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis nula

No existe relación entre el avance de la frontera agrícola con la generación de sedimentos en la cuenca media-alta del río Mira en el período 1996-2018.

1.5.2 Hipótesis alterna

Existe relación entre el avance de la frontera agrícola con la generación de sedimentos en la cuenca media-alta del río Mira en el período 1996-2018.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico referencial

En la presente sección se da a conocer información recopilada de investigaciones previas que han usado las mismas pautas de estudio. Es, por tanto, la base teórica de referencia que permite comprender el problema con el fin de obtener una clara comprensión del tema.

2.1.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica fue considerada por Ekbladh (2002) como una unidad territorial con influencia de un sistema de drenaje superficial delimitada por los puntos topográficos más altos. En el área se produce captación del agua que precipita al suelo, lugar donde se da el proceso de escurrimiento e infiltración hasta un punto de salida común. En otras concepciones, una cuenca hidrográfica es considerada como una unidad integral que cumple un papel importante en la planificación del uso del suelo para tener una mejor gestión de los recursos naturales en el medio (Molle et al., 2010).

Las cuencas hidrográficas asemejan a un sistema de ámbitos económicos, sociales y biológicos integrados en constante dinámica, cuyo objetivo es servir de base para el desarrollo de la vida natural y las actividades humanas (Sadeghi et al., 2009). Molle (2017) enmarca a las cuencas hidrográficas en un medio interdisciplinario, mostrándola como morfodinámica por sus formaciones especiales, el patrón de drenaje, la acumulación de sedimentos y la creación de meandros. Consecuentemente, es vista como un medio de transformación social por sus relaciones constantes entre los sistemas de producción y las condiciones de relieve (Carofilis, 2018).

Los estudios enfocados en la asignación de determinados usos a la tierra se basan en el redistribuir de forma equitativa los recursos dentro de las cuencas hidrográficas, basándose en los puntos estratégicos de la misma (Audigier y

Alencar, 2010). Por lo tanto, dentro del plan de gestión de los recursos de la cuenca hidrográfica se toma en cuenta los aspectos sociales, económicos y ambientales para conservar de forma sustentable los principales recursos como son el agua y el suelo en sus distintas aplicaciones. En relación con esto, una cuenca bien gestionada funciona como una alternativa de sustentabilidad para los recursos incluyendo el suelo como lo aclara González et al. (2016) en su análisis de las cuencas hidrográficas en América Latina.

Son varios los beneficios obtenidos de las cuencas hidrográficas y entre ellos el principal de acuerdo con Briones et al. (2019) es el beneficio económico-ambiental que se ve inmerso al suministrar y gestionar los recursos naturales de la cuenca hidrográfica en relación con las actividades productivas de las poblaciones que habitan en ella. Sin embargo, Ramakrishna (1997) afirma que una mala administración y manejo conlleva a conflictos socio-ambientales graves, problemas de disponibilidad y degradación de los recursos en la cuenca, añadida la alteración en los ciclos naturales en el entorno que a la vez mantienen el equilibrio de la cuenca hidrográfica (Audigier y Alencar, 2010).

2.1.2 Relación entre el recurso hídrico y el recurso suelo en las cuencas hidrográficas

El agua y el suelo son considerados los recursos más importantes para el desarrollo y mantenimiento de las poblaciones a nivel social y ambiental, pero están constantemente afectados por su desmedido manejo (Ramakrishna, 1997). En este contexto, se ha establecido una fuerte relación entre ambos recursos dentro de las cuencas hidrográficas, independientemente de las condiciones propias de la cuenca que puedan contribuir a potenciar la degradación de los recursos presentes (Villegas, 2004). Ribeiro (2009) muestra a la agricultura como una de las principales actividades antrópicas en las cuencas hidrográficas directamente relacionada a las afectaciones en la disponibilidad, calidad y cantidad del recurso hídrico frente a las alteraciones del recurso suelo (Green et al., 2002).

Según Gleick (1999) el agua es un recurso de carácter primordial para la vida en el planeta su análisis facilita el crecimiento y ordenamiento de las sociedades a través de su manejo por parte de las poblaciones beneficiarias. Por ello, a nivel mundial de acuerdo con el United States Geological Survey (USGS, 2005) el total del agua en el planeta es de 1387 millones de km³, del cual alrededor del 4% es agua dulce, con un total de 93 100 km³ de agua almacenada de ríos, lagos y ríos, lo que demuestra la importancia de su adecuado manejo. De igual manera, el suelo dentro de cada cuenca hidrográfica representa la base del desarrollo para cada ser vivo al poseer naturalmente las condiciones adecuadas que posibilitan la existencia de vida con distintos parámetros en cada sección de la cuenca (FAO, 2015).

Como recurso el agua es el motor para la estabilidad y funcionamiento del entorno en todos sus procesos (Edmunds, 2009). De hecho, la población recurre al agua para desarrollarse a plenitud, empleándola para todos los campos sociales directa e indirectamente y ocurre semejantes incidencias con el recurso suelo (Fernández, 2014). Sin embargo, como todo recurso natural éstos tienden a ser insostenibles en el tiempo si hay un mal manejo y gestión, lo que perjudica a todos los elementos y sus interacciones, desde el medio acuático hasta el terrestre (suelo), lo que provoca que se ejerza presión sobre la fauna y flora del medio (Halliday et al., 2015).

De acuerdo con Campos (1998) las etapas del ciclo hidrológico que se ven involucradas en la problemática de la erosión hídrica y del suelo, son la precipitación y la escorrentía. En la etapa de precipitación y la cantidad de agua depositada sobre el suelo influyen en su desgaste con base en la magnitud y la fisionomía de este. La escorrentía por su parte representa la posibilidad de transportar el agua sobre la superficie, la cual a su paso lleva partículas suspendidas del suelo. El agua en muchos casos se infiltra pasando a recargar acuíferos subterráneos luego se evapora y vuelve a la atmósfera (Wang et al., 2020), o es interceptada por la vegetación u otras áreas (Shen et al., 2017), todo depende de las características presentes en el suelo.

2.1.3 Cambio de uso del suelo y su impacto en las cuencas hidrográficas

De acuerdo con Parveen y Kumar (2012) el uso del suelo se refiere a la utilidad que el ser humano le da sea por un tiempo definido o indefinido. Esta perspectiva es concatenada por Pacheco et al. (2019) quien indica que la dinámica de uso del suelo en Ecuador ha experimentado fuertes cambios a razón de la variación de la cobertura vegetal en grandes áreas dentro de las cuencas hidrográficas. Esto es ocasionado frecuentemente por las actividades agrícolas y agropecuarias que se han efectuado con el crecimiento urbano y los factores naturales que inciden sobre él (Panagos et al., 2016).

El cambio de uso del suelo presenta repercusiones en todos los elementos incluyendo de manera directa las condiciones climatológicas. En efecto, estudios como el de Preti y Petrone (2013) evidencian las consecuencias relacionadas a las modificaciones climáticas y a menudo se habla de una degradación ambiental, pues se altera la dinámica en cuanto a la productividad y capacidad del suelo. Específicamente, conlleva como respuesta una infinita cadena de acción y reacción en los ciclos naturales lo que se relaciona directamente con la pérdida de biodiversidad ya que se da paso a los agentes erosivos que impiden el aporte de restos vegetales y carbono al suelo (Panagos et al., 2016).

En las cuencas hidrográficas el cambio de uso y cobertura del suelo repercute sobre el bienestar del ser humano a grandes rasgos en aspectos de salud y desarrollo económico (López et al., 2015). A medida que el suelo modifica su uso por uno distinto en cualquier parte de la cuenca, especialmente en la cuenca alta, el cambio se refleja directamente en la calidad del agua del resto de la cuenca, el bienestar de los animales que tomen dicha agua y en la salud o economía de las personas que consuman al animal o que la beban directamente (Ortega et al., 2006).

La erosión del suelo es uno de los principales procesos de afectación y degradación que representan mayor interés a la hora de tomar decisiones (Guevara y Montalvo, 2014). Harden (1992) afirma que la erosión podría afectar hasta un 80% de la superficie del suelo donde se practican actividades agrícolas como dato

a nivel global. La erosión del suelo se da por la presencia de muchos factores sean definidos o condicionantes entre los cuales se tiene a las condiciones climáticas, la precipitación, el viento e incluso el relieve del suelo que interviene en la intensidad erosiva que se presente (Noni y Trujillo, 1999).

En Ecuador el 47.9% de la superficie se encuentra en proceso de erosividad (Noni y Trujillo, 1999), en el rango de intensidad activa y muy activa, con mayor afectación a la región andina, y el 39.13% de las cuencas hidrográficas en esta región presenta erosividad crítica (Cruz et al., 2010). Esto ocurre debido a que las pendientes son más pronunciadas, por cuanto da lugar al desprendimiento de masa con facilidad ante cualquier agente erosivo (Almaguer y Guarado, 2006). Entre los causantes de la erosión sobresale la que se presenta al hacer un inadecuado manejo del suelo en el proceso de siembra y cultivo de una especie vegetal (Cruz et al., 2010). Seguido de las que se dan por intervención pecuaria en la que el ganado por sus pisadas disminuye las cavidades porosas del suelo (Muñoz et al., 2014).

La erosión del suelo en su totalidad no es producida como consecuencia de malas prácticas agrícolas en las cuencas hidrográficas, existen otros factores que condicionan la aparición del problema erosivo (Muñoz et al., 2014). En época seca dentro de Ecuador, predomina la erosividad eólica, con mayor incidencia en zonas donde la vegetación es casi inexistente y existe una mayor velocidad del viento, es decir, zonas con mayor altitud y pendientes pronunciadas (Ochoa et al., 2016). Pero la situación se torna grave en épocas lluviosas donde predomina la erosión hídrica dada las altas precipitaciones y por ende mayores escurrimientos superficiales (Hasan y Wyseure, 2018).

2.1.4 Erosión hídrica y sus implicaciones

De acuerdo con Harden (1992) la erosión hídrica se presenta en el momento en que las precipitaciones desprenden partículas de la superficie del suelo en forma de agregados. A su vez pasan a ser transportadas por el escurrimiento superficial de acuerdo con el grado de inclinación del suelo, la velocidad del viento y la fuerza hidráulica (Noni y Trujillo, 1999). Los tipos de erosión hídrica son la

erosión por salpicadura, la erosión laminar, erosión en surcos y en cárcavas (Rorke, 2000). La erosión hídrica más fuerte está relacionada a la formación de cárcavas en el suelo, que deterioran su composición y capacidad productiva al afectar la capa superficial directamente (Rhoades et al., 2000).

Dentro de las cuencas hidrográficas el problema de erosión hídrica tiene un nivel de afectación más elevado en las partes altas debido al grado de inclinación que presentan (Fernández, 2012). Esta situación facilita el desprendimiento y transporte del material, que una vez separado del lugar de origen pasa a conocerse como sedimento, el cual casi inmediatamente es depositado en los drenajes de las cuencas provocando una alteración la composición del agua (Ochoa et al., 2016). La tasa de sedimento producido se regula o incrementa con base en el tipo del suelo presente y de la cobertura vegetal en el sitio en cuenta el tipo de vegetación (Gavilánez et al., 2017).

2.1.5 Aplicación de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica

Sabins (1987) define a la teledetección, *Remote Sensing* en inglés, como el resultado de medición de la radiación electromagnética que es rebotada de la sección superficial de la Tierra (Rey, 1993). La medición se realiza mediante instrumentos que están generalmente ubicados a largas distancias del lugar a analizar para obtener información enfocada en características o propiedades del fenómeno u objeto (Rey, 1993). En las últimas tres décadas los métodos de teledetección han evolucionado en la búsqueda de la operación en una amplia gama de escalas de imágenes de alta importancia para la planificación en el uso de tierras (Rogan y Chen, 2004).

Las herramientas usadas para la teledetección son satélites espaciales u otros vehículos de carácter aéreo o terrestre que poseen sensores con la capacidad de medir la energía reflejada del planeta (Romero y Romero, 2006). Finalmente, Glenn et al. (2011) menciona que la información obtenida del proceso es registrada para su análisis en forma de imagen satelital. A partir de ello, la información en bruto pasa por otros procesos informáticos que permiten la

reducción del costo de sus datos y aumento de la resolución de las plataformas satelitales para conocer las características deseadas del lugar objetivo.

Escalante et al. (1997) indica que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o también conocidos en inglés como *Geographic Information System*, desde 1966 a partir de la creación del primer SIG (*Canadian Geographic Information System*) se convirtieron en una disciplina científica definida como una integración consecuente del hardware, el software y los datos obtenidos de forma georreferenciada con apoyo o no de la Teledetección (Díaz y Bustamante, 2007). Se orientan a la gestión de la geoinformación, lo que le da el carácter de ser una herramienta informática de apoyo a la investigación con enfoque multidisciplinario en materia ambiental y social (Gutiérrez et al., 2013).

Los SIG pronto se han transformado en una herramienta de uso diario como respuesta a la necesidad del ser humano de representar y modelar la superficie de la Tierra junto a sus elementos y a partir de ello ofrecer soluciones a problemáticas relacionadas (Balbontin et al., 2016). Llorente et al. (2013) menciona que las principales cuestiones a tratar la localización de los objetos sobre la superficie, el análisis de las condiciones de un objeto, la tendencia que presentan diversos escenarios frente a su entorno, modelos de fenómenos para entender la situación temporal, entre otras aplicaciones.

Tanto la Teledetección como las SIG, dentro de la materia ambiental, ofrecen facilidades en la generación de información, la gestión y manejo de los recursos, puesto que, al ser herramientas tecnológicas de amplia apertura, dan oportunidades para la interpretación y uso de los recursos al unir datos climatológicos, sociales y geográficos (Gutiérrez et al., 2013). Entre los principales fenómenos y características ambientales estudiadas con los SIG y la Teledetección están la contaminación atmosférica, la localización de especies marinas y terrestres, la distribución de temperaturas con análisis temporal, modelamiento de cuencas hidrográficas, distribución de los recursos en un área y análisis de posibles cambios a futuro sobre la disposición de recursos naturales renovables y no renovables (Balbontin et al., 2016).

En estudios realizados por Castaño (1999), Guillén et al. (2015) y Orúe et al. (2007) referente a la distribución de la precipitación, escorrentía en el suelo y la degradación de estos con una consecuente producción de sedimentos, se emplearon como base los SIG y las técnicas de Teledetección. Las facilidades que ofrecen las técnicas de Teledetección y SIG permiten un mejor análisis multitemporal de las imágenes satelitales con atención en la distribución espacial en relación con el tiempo del recurso hídrico en el suelo. La eficiencia demostrada de los análisis indican una buenas aceptabilidad del uso de las herramientas en las investigaciones de este ámbito (Castaño, 1999).

2.1.6 Modelos hidrológicos en el análisis de producción de sedimentos

La evolución de la modelación hidrológica ha sido constante desde el siglo XIX y actualmente se la considera como una herramienta importante en la ejecución de proyectos. Se trata de una metodología que permite realizar una simulación de sistemas físicos que se fundamentan en fórmulas matemáticas (Heijkers y Van, 2011). Los modelos hidrológicos permiten modelar el comportamiento del agua en el suelo de una cuenca con el uso de datos del punto objetivo (Loaiza y Valentin, 2011). Predicen algunos impactos ambientales que se pueden presentar como consecuencia del cambio de uso y manejo del suelo que genera la producción de sedimentos y provoca alteraciones al caudal (Barrios y Urribarri, 2010; Pokhrel, 2018).

El uso de un modelo hidrológico se realiza en periodos y áreas definidas, con la existencia de la posibilidad de simular escenarios futuros a partir de las condiciones actuales razón por la cual es un instrumento útil en la gestión y planeamiento de calidad y disponibilidad del recurso hídrico y en el manejo del suelo (Meneses, 2017). Por lo tanto, el análisis previo del cambio de uso de suelo en las cuencas hidrográficas influye altamente en el proceso de generar escenarios prospectivos en la modelación hidrológica, debido a que dichos cambios permiten entender las variaciones en los factores biofísicos y socioeconómicos de las localidades lo que posibilita generar propuestas adecuadas (Castella et al., 2007; Gillet, 2008).

Para Meneses (2017) en el modelamiento de una cuenca se definen dos categorías principales: material y formal. La primera hace referencia a representación física del prototipo y la segunda a una abstracción matemática que se complementa con el uso de tecnología. Dentro de la categoría formal existen los modelos conceptuales que son representaciones simplificadas de los procesos físicos mediante el uso de descripciones matemáticas para obtener un enlace entre el modelo de entrada y el de salida (Castaño, 1999). Una herramienta de esta categoría es el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT por sus siglas en inglés).

2.1.7 Modelo Soil and Water Assessment Tool

El modelo SWAT permite simular procesos físicos que se presentan en el ciclo hidrológico y predice el impacto que causan algunas actividades con relación al suelo. Entre los impactos que predice está la generación de sedimento y producción de sustancias agrícolas químicas dentro de una cuenca hidrográfica (Neitsch et al., 2005; Uribe, 2010). Los instrumentos para la planificación en cuanto a las actividades agrícolas, agropecuarias, ordenamiento y zonificación y de manejo de agua se obtienen mediante la información que otorgan las variables físicas que se analizan en el modelo (Meneses, 2017).

Para la aplicación del modelo hidrológico es necesario dividir la cuenca en subcuencas debido a la existencia de variabilidad de condiciones climatológicas y geomorfológicas que son afectadas de diferente manera e impactan a la hidrología del lugar en distintos grados (Neitsch et al., 2005). Cada subcuenca recibe información de entrada, la misma es organizada en diferentes categorías como: clima, Unidades de Respuesta Hidrológica HRU (cobertura de tierra, suelo y pendiente), estanques/humedales, agua subterránea, canal principal y drenado (Uribe, 2010). El modelo hidrológico de SWAT está compuesto por dos componentes o fases: terrestre y de tránsito o enrutamiento del ciclo hidrológico (Fernández de Villarán, 2017).

Según Uribe (2010) la fase terrestre simula la cantidad de agua que llega al caudal principal a partir de las subcuencas, utiliza la ecuación general del balance hídrico

e implica varias entradas y procesos. El balance hídrico es una forma de estimar la cantidad de agua que puede presentar una región en un periodo de tiempo lo que posibilita evaluar y diagnosticar el recurso hídrico en su oferta, demanda y disponibilidad (Lucero, 2018). Se identifican como principales componentes del balance hídrico a volúmenes de entrada como la precipitación y las fuentes de agua provenientes de acuíferos. También están los volúmenes de salida que son la infiltración, evapotranspiración y la escorrentía (Morejón et al., 2015). El agua almacenada corresponde a depósitos, embalses y lagos dentro de la cuenca (Correa et al., 2006).

Adicionalmente, en la fase de tránsito o enrutamiento se modela el movimiento del agua a través de la red de canales hasta el cierre de la cuenca con datos de carga de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas (Neitsch et al., 2005). La calibración y validación del modelo es la última fase del modelamiento en la cual se realiza una comparación entre la semejanza existente entre las variables simuladas y las observadas (Carmona, 2007). Para su validación se utiliza el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Posteriormente solo si es necesario se hacen modificaciones a los parámetros más significativos del modelo con la finalidad de asegurar la precisión de la simulación (Fernández de Villarán, 2017).

2.1.8. Causas antrópicas y efectos ambientales de la variación de erosión hídrica

La conservación integral de las cuencas hidrográficas y el sustento de varias actividades agrícolas se pone en riesgo por la erosión del suelo ya sea por procesos naturales o antrópicos (Espinosa, 2008). La erosión hídrica es un proceso natural y gradual, en algunas ocasiones es imperceptible (Echavarría et al., 2020), entre las causas naturales están el clima, vegetación, tipo de suelo y la topografía (Díaz y Bustamante, 2007). El cambio de uso de suelo por causas antrópicas conlleva a la sobreexplotación a consecuencia de malas prácticas agrícolas (Andrade et al., 2013). Eventualmente, esto significa la degradación acelerada de los suelos y tasas elevadas de producción de sedimentos (Carmona, 2007). Gran

parte de las concentraciones de sedimentos en los cauces de los ríos se debe exclusivamente de un mal manejo y uso de la tierra (Díaz y Bustamante, 2007).

Se establecen dos tipos de cambios de uso de suelo, el primero se refiere a los cambios que provocan modificaciones biofísicas de la superficie terrestre y el segundo se relaciona con la intensidad que el ser humano labore la tierra para beneficio propio (Córdova y Gómez, 2021). En la búsqueda de una mejor economía basada en las actividades del sector primario, se genera una alta demanda del uso del suelo condicionándolo a su erosión (Nájera et al, 2016). La expansión agrícola y urbana son ejemplos de causas antrópicas recurrentes para la erosión hídrica del suelo (Alvarado et al., 2007) haciéndolo más susceptible a la erosión (Díaz, 2011). En zonas lluviosas, la minería es otro factor que provoca el desgaste del suelo acompañado de elementos tóxicos que con el arrastre llegan a zonas bajas de la cuenca (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2010).

2.2 Marco legal

La presente investigación referente a la variación de erosión hídrica se enmarca en la normativa legal vigente del Ecuador de acuerdo con la jerarquía de los cuerpos legales vigentes (Figura 1). Se resalta previamente que el Estado ecuatoriano posee como normativa legal suprema a la Constitución de la República del Ecuador (2008), dentro del Título II, referente a derechos, se halla el artículo 14, el cual manifiesta la importancia y necesidad de vivir en un entorno saludable con miras a la sostenibilidad junto a la conservación de los ecosistemas y todos sus componentes, de tal forma que se garantice el buen vivir de la población.

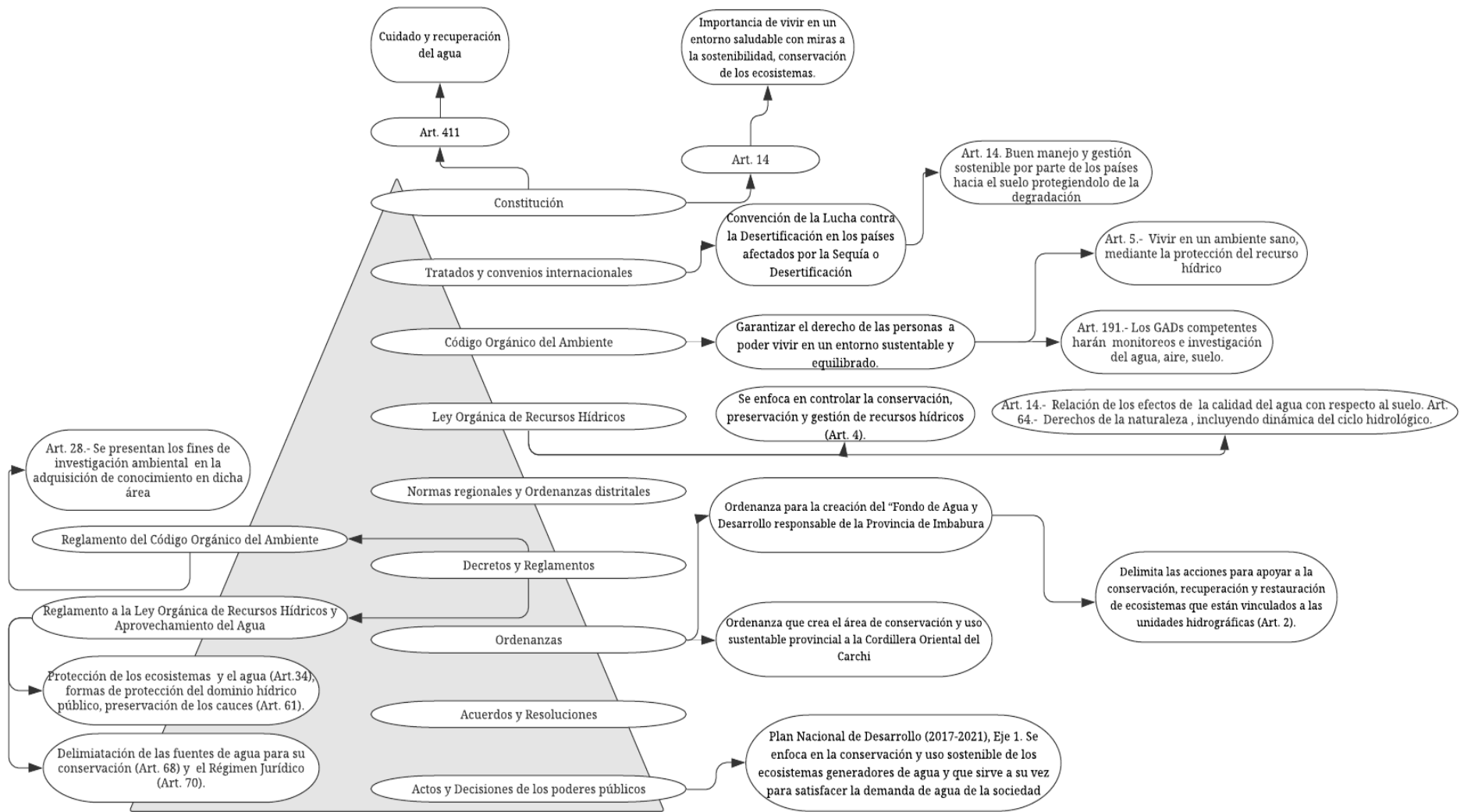


Figura 1. Esquema del marco legal

CAPÍTULO III

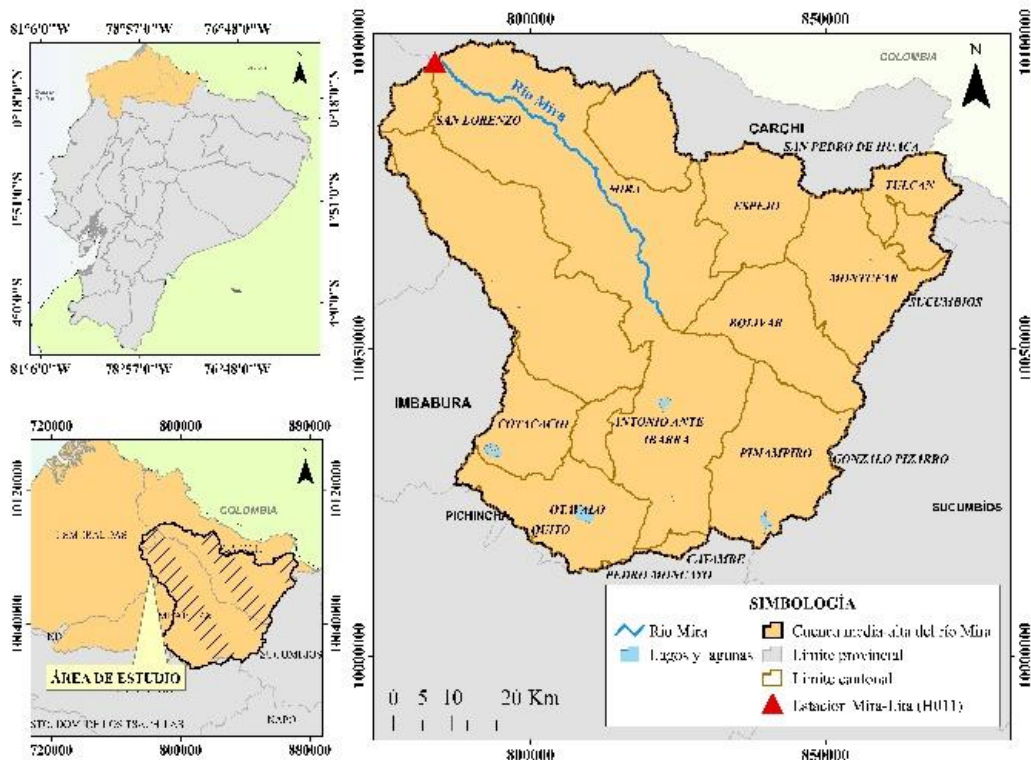
METODOLOGÍA

El presente capítulo expone todo el procedimiento que se empleó para dar desarrollo a la investigación en manifiesto dirigidos por una presentación del contexto y sus características.

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Ubicación

La cuenca media-alta del río Mira forma parte de la cuenca binacional que engloba superficies de Ecuador y Colombia. En Ecuador está ubicada políticamente al noroccidente, lo que comprende parte de las provincias: Esmeraldas, Pichincha, Sucumbíos, Carchi e Imbabura, las dos últimas cubren mayor territorio en la cuenca (Figura 2).



La cuenca media-alta del río Mira cubre una superficie de 5045.51 km² con un perímetro de 538.34 km, desde el límite superior hasta la estación hidrológica Mira en Lita (H0011). Las limitaciones correspondientes a la cuenca son al Norte por los ríos Carchi y San Juan, al Sur por la provincia Pichincha, al extremo Oeste por la Cordillera Occidental y al Este por la Cordillera Oriental, las coordenadas de los puntos externos de acuerdo con el sistema WGS 1984 UTM Zona 17S, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos extremos de la cuenca media-alta del río Mira

Punto	Coordenadas UTM WGS84 Zona 17 Sur		Altitud (m s.n.m.)
	X	Y	
Norte	836211	10083738	3651
Sur	835818	10019743	3423
Este	853054	10031033	2944
Oeste	787173	10062783	594

Un total de 18 cantones forman parte de la cuenca. Los cantones San Miguel de Urcuquí, Ibarra y Mira son los cantones que ocupan mayor área con 1105.61 km², 537.45 km² y 510.62 km² respectivamente (Tabla 2). Cada cantón posee sus respectivas parroquias de las que se contabilizan un total de 79 de las cuales La Carolina, San Miguel de Ibarra, Jijón y Caamaño, son las parroquias con mayor ocupación de superficie dentro de la cuenca media-alta del río Mira con 312.75 km², 241.66 km² y 236.85 km² respectivamente (Altamirano, 2013).

Tabla 2. Cantones por cada provincia que conforma la cuenca media-alta del río

Mira		
Provincia	Cantón	Superficie (km ²)
	Tulcán	138.45
	Bolívar	356.02
Carchi	Espejo	510.62
	Mira	537.54
	Montúfar	373.40
	San Pedro de Huaca	62.76
	Ibarra	1105.61
Imbabura	Antonio Ante	82.06
	Cotacachi	222.01
	Otavalo	343.15
	Pimampiro	441.05
	San Miguel de Urcuquí	765.24
Pichincha	Quito	1.39
	Cayambe	27.16
	Pedro Moncayo	2.03
Sucumbíos	Gonzalo Pizarro	0.96
	Sucumbíos	0.62
Esmeraldas	San Lorenzo	75.44
Total		5045.51

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2010).

3.1.2 Parámetros morfológicos y geomorfología

En línea recta desde el lugar de confluencia de las aguas hasta el punto más alejado hay una longitud axial de 98.72 km y el ancho de la cuenca es de 51.11 km. La forma de la cuenca determinada por el Coeficiente de Compacidad detallado por Radwan et al. (2017) es oblonga con un valor de 2.12. Por su parte, el Factor de Forma de Horton para la presente cuenca recibe el valor de 0.52 lo que indica que es moderadamente achatada (Lux, 2016; Rosales, 2020).

La cuenca media-alta del río Mira posee un rango altitudinal de 425 m s.n.m. en el límite inferior hasta los 4917 m s.n.m. en los picos andinos presentes. La elevación media corresponde a 2593.87 m s.n.m, con un desnivel de 4392 m y una pendiente media de 37.32%, es decir, fuertemente inclinado lo que se relaciona a

que gran parte de la cuenca se extiende en la cordillera occidental de los Andes (Cruz et al., 2015), lo que permite la presencia de estribaciones, relieves y planicies que dan lugar a diversidad de relieves con mayor concentración en la de tipo montañosa (Tabla 3).

Tabla 3. Pendientes presentes en la cuenca media-alta del río Mira

Inclinación de la pendiente	Pendiente	Área (%)
0-5%	Plano	5.33
5-12%	Ligeramente ondulado	11.37
12-25%	Ondulado	21.54
25-50%	Montañoso	33.85
50-70%	Muy montañoso	16.55
Mayor a 70%	Escarpado	11.36
Total		100%

Fuente: Strahler (1957).

La curva hipsométrica que corresponde a la cuenca en estudio (Figura 3) es de tipo A, lo que se interpreta con base en Harlin (1984) como una cuenca en su fase joven con un potencial erosivo alto relacionado al Valle del Chota (Rosales, 2020) que está formado a base de techos de conglomerados volcánicos y metamórficos, sedimentos tobáceos y cubierta de depósitos cuaternarios (Galarraga, 2018), atravesado en el límite oeste por la falla del Río Ambi que es interpretada como una falla de tipo “strike-slip” (Eguez et al., 2003).

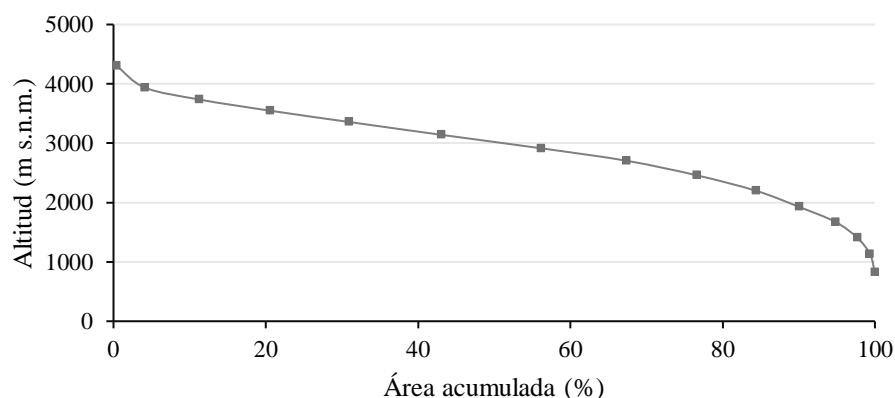


Figura 3. Curva hipsométrica de la cuenca media-alta del río Mira

El área de estudio presenta tres dominios morfoestructurales que son el Dominio Angochahua, Dominio Ibarra y Dominio Imbaya, cuya morfología se basa en la litología de las rocas y por las estructuras regionales que las afectan. El Dominio Imbaya tiene representatividad en la zona de la cuenca del río Chota al presentar relieves bajos de planicie disectados localmente donde predominan series sedimentarias subhorizontales mismas que forman superficies regulares heredadas del relleno vulcanosedimentario incisado por los drenajes del río Ambi (Eguez et al., 2003). Se observa que hacia el sur del área la topografía media de la depresión interandina se incrementa entre los 2900 y 3100 m s.n.m. hacia los poblados de El Ángel, San Gabriel, Tulcán, y el sur de Colombia, con excepción del río Chota donde la erosión fluvial produce una disección muy local entre los 1500 - 1800 m s.n.m (Galarraga, 2018; Jácome et al., 2020).

El basamento de cuenca del río Mira está formado principalmente por rocas volcánicas de la edad Oligocénica las cuales afloran parcialmente en los lechos más disectados de los ríos de la parte norte. En adición, se encuentran las brechas volcánicas de la Unidad Angochagua a manera de paquetes de espesor desconocido al borde de la ciudad de Ibarra. Seguido en la columna estratigráfica se hayan depósitos de origen fluvial de la edad Miocénica, seguidos de las rocas vulcanosedimentarias cuaternarias provenientes del volcán Imbabura y finalmente se encuentran algunos depósitos aluviales y coluviales (Galarraga, 2018).

3.1.3 Suelos

La cuenca del río Mira tiene una taxonomía variada de suelo desde Entisoles, Molisoles, Oxisoles, Histosoles e Inseptisoles, estos últimos se forman sobre rocas metamórficas y sedimentarias con un alto contenido de arcillas de composición 2:1 y predomina el pH ácido (Espinosa et al., 2011). Los Oxisoles son típicos de los trópicos, producto de los procesos de meteorización y lavado constantes con un color marrón rojizo. Los Molisoles poseen color negro rico en materia orgánica que favorece el crecimiento radicular por la textura que posee. Los Histosoles son suelos conocidos como turbas formadas con grandes cantidades de materia orgánica saturadas de agua, es decir, poseen alta humedad permanente y finalmente, los Entisoles son suelos poco desarrollados muy sujetos a erosión y

debido a su espesor diminuto se limitan a las actividades agrícolas (Calvache, 2014; Cañadas, 1983).

3.1.4 Hidrología

El caudal medio registrado para la estación hidrológica H0011 (Mira en Lita) es de 238 m³/s, de forma general, la cantidad tiende a variar según los meses de mayor precipitación con una marcada diferencia dependiendo de la altitud (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2019). Se conoce que el drenaje principal que forma la cuenca está conformado por el río Chota, río El Ángel, río Itambi, río Ambi, río Capulí y río Blanco, con una división conocida de 36 microcuencas (Guachamín et al., 2015). En adición, la red hídrica se asocia a 19 lagos y lagunas: Patococha, Pucacocha, Burrococha, Yahuarcocha, La Cocha, Turococha, Cuicocha, Moraspungu, Cunrru, Cubilche, San Pablo, La Plaza, El Salado, Blanca o Chiquita, Santa Luisa, Yanacocha, Ñagñaro, Puruhanta y Las Garzas (Altamirano, 2013; Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2011).

3.1.5 Clima y relieve

El área de estudio posee una orografía variante que determina diferentes climas, motivo por el cual en las altitudes más altas están los páramos y en las más bajas se hallan los bosques tropicales (Pijal, 2015). De acuerdo con el INAMHI (2011) se registra que la cuenca media-alta del río Mira presenta temperaturas que van desde los -2°C a los 24°C, correspondiéndose a precipitaciones medias anuales de entre 250 a 7500 mm que son valores oscilatorios dependiendo de la esorrentía aguas arriba o aguas abajo (Fierro, 2019). Las variaciones orográficas que presenta la cuenca esta integra 9 zonas de vida correspondientes a Páramo, Bosque Húmedo Montano, Bosque muy Húmedo Montano, Bosque Húmedo Montano Bajo, Bosque muy Húmedo Montano Bajo y Bosque Húmedo Pre-montano, importantes formaciones para la protección de la erosión del suelo y del recurso hídrico (Endara, 2018).

Cañadas (1983) menciona que el páramo es un ecosistema de alta montaña que posee gran capacidad para captar e infiltrar agua, actividad fomentada por la presencia de pajonales, frailejones y almohadillas, ubicado a altitudes que van entre 3500 a 4500 m s.n.m (Muñoz et al., 2014). El Bosque Húmedo Montano presenta temperaturas que oscilan entre 3-12 °C y precipitaciones de 500 a 1000 mm, cuya vegetación es dominada por líquenes. En cambio, el Bosque muy Húmedo Montano presenta temperatura similar, pero precipitaciones de 1000 a 2000 mm (Cruz et al., 2010). El Bosque Húmedo Montano Bajo se caracteriza por presentar temperaturas de entre 12-18 °C y precipitaciones de 1000-2000 mm, el Bosque Muy Húmedo Montano Bajo tiene precipitaciones de 2000-3500 mm. Finalmente, el Bosque Húmedo Pre montano, está ubicado en zonas con menor pendiente a altitudes de entre los 200 a 2000 m s.n.m en el que predominan abundantes epífitas, herbazales y plantas trepadoras (Guachamín et al., 2015).

3.1.6 Diagnóstico social

La cuenca media-alta del río Mira de acuerdo con el INEC (2010), poseía una cantidad de 584 004 habitantes en el año 1996 y 595 554 habitantes para el año 2018 distribuidos entre Imbabura y Carchi con una proyección total para ambas provincias en el 2020 de 663 126 habitantes. Las actividades económico-productivas que se realizan en los cantones de la cuenca media-alta del río Mira se basan en el uso y aprovechamiento del terreno y sus potencialidades naturales, las mismas que giran en torno a actividades agropecuarias (43%), forestales (14%), construcción (11%) y comercio (32%). Las actividades de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca de entre todas las demás representan la mayor ocupación de la población económicamente activa (PEA) comprendida entre los 8 y 65 años (INEC, 2010) lo que representa el 36.1% para la provincia Carchi y 28.7% para Imbabura.

3.2 Métodos

La presente investigación tiene un carácter descriptivo de tipo no experimental y longitudinal (Gillet, 2008) y fue necesario realizar análisis multitemporales para

conocer la producción de sedimentos de la cuenca media-alta del río Mira. Para cumplir los objetivos propuestos se siguieron tres etapas, una para cada objetivo.

La primera parte consistió de una modelación de generación de sedimentos por cada microcuenca con la extensión SWAT de ArcGIS 10.4 para los períodos 1996-2007 y 2007-2018. La segunda consistió en un proceso para validar los valores de sedimentos simulados con los observados y finalmente, con la información adquirida se realizó un proceso de regresión geográficamente ponderada que permitió analizar las principales áreas de producción de sedimentos con las respectivas causas de erosión hídrica derivadas en las subcuencas de la cuenca media-alta del río Mira (Figura 4).

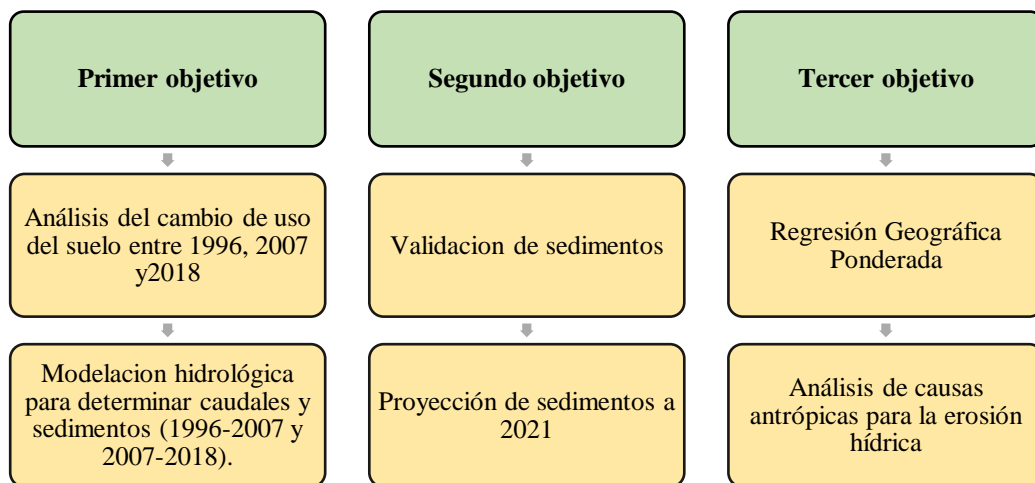


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada en el estudio

3.2.1 Modelamiento de la generación de sedimentos bajo escenarios de cambio de uso del suelo

Se detalla todo el procedimiento seguido para la obtención de las modelaciones con su respectiva calibración y validación.

3.2.1.1 Obtención de la cartografía del cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018

La información de cambio de uso del suelo de la cuenca media-alta del río Mira en los periodos 1996-2007 y 2007-2018 empleada para analizar datos en el

presente estudio se descargó y pasó por un proceso de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de manera que los datos de coberturas se consideraron validados en su totalidad.

Pre-procesamiento de las imágenes

En primer lugar, para la generación de la cartografía de uso de suelo fue necesario el uso de los *shapefile* (shp) proyectados al sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM), DATUM WGS 1984 17S para los años 1996, 2007 y 2018 a escala 1:50 000, lo cual fue posible al descargar tres imágenes obtenidas en el Geoportal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (www.earthexplorer.usgs.gov). Las imágenes corresponden a Landsat 5 TM C1 Level-1 y el sensor Landsat 7 ETM Level-1 para el año 1996 y 2007 respectivamente, dentro cuadrante PATH 10 y ROW 60 y el sensor Sentinel-2 MSI para el año 2018 el cual pasó por un proceso de resamplado tener la misma resolución espacial y aumentar el tamaño del pixel a 30 m en formato Geotif por medio de ArcGIS 10.4 (Jácome et al., 2019).

Las imágenes obtenidas para cada año pasaron por un tratamiento que consistió en tres etapas (Ambrosio et al., 2002) de tipo geométrico, radiométrico, y atmosférico, con empleo del Software ArcGIS 10.4 (Aguilar et al., 2015).

- Corte de las imágenes digitales: Se realizó un corte de las imágenes satelitales con la delimitación del área de estudio, mediante el uso de la herramienta *Extract by mask* con ArcGIS 10.4.
- Corrección geométrica: Basada en proyectar las imágenes satelitales a un sistema de coordenadas en específico, para eliminar distorsiones geométricas. En el presente estudio se proyectaron las imágenes al sistema de coordenadas UTM, WGS 1984 Zona 17 S (Ambrosio et al., 2002).
- Corrección radiométrica y atmosférica: Se empleó un realce radiométrico para reducir efectos atmosféricos como la nubosidad presente en las imágenes satelitales y aumentar la calidad (Nouban y Abazid, 2018).
- Combinación de bandas: Se aplicó un realce multiespectral mediante la combinación de bandas (764) de las imágenes satelitales, para obtener una

imagen en falso color, necesaria para la interpretación de los tipos de cobertura presentes en la cuenca alta del río Mira (Peces et al., 2009).

Procesamiento de las imágenes

Se recopilaron áreas de entrenamiento para cada categoría vegetal y uso del suelo identificadas en la cuenca media-alta del río Mira. En total fueron ocho categorías presentes: bosque, vegetación arbustiva, cultivos, pastos, páramo, zona urbana, área sin vegetación y cuerpos de agua. Después se calcularon las áreas de entrenamiento de las cuales resultaron un total de 194 puntos como tamaño muestral al considerar con un nivel de confianza del 90% de acuerdo con el área de la cuenca en km². Del total de puntos, 97 de ellos fueron utilizados aleatoriamente en el algoritmo de la clasificación y los otros 97 cuadrantes de 30 x 30 m fueron empleados para la validación de la clasificación.

Kipf y Welling (2016), describen a la clasificación supervisada como la tarea de dar valor a un objeto dentro de una clase correspondiente a un uso del suelo. Para el presente estudio se realizó una clasificación supervisada de las imágenes satelitales con apoyo de la herramienta *Maximum Likelihood Classification*, debido a que es un algoritmo paramétrico que asume la distribución estadística gaussiana para las categorías en estudio (Vargas y Campos, 2018).

El enmascaramiento de las nubes (Peces et al., 2009) se realizó a la imagen Landsat 5 TM C1 Level-1 para 1997 pues contenía un porcentaje de nubosidad de 6%, el proceso consistió en aplicar la herramienta *Copy raster*, seguida de un relleno de los datos de nubosidad mediante la herramienta *Focal Statistics*, proceso que se repitió hasta no tener vacíos. A partir de ello, se hizo una reclasificación de las imágenes con uso de *Reclassify* (Nouban y Abazid, 2018; Peces et al., 2009). Esto permitió analizar los datos en el software ArcGIS y determinar multitemporalmente los cambios ocurridos por tipo de cobertura y uso del suelo al restar las variaciones en cada período (2007-1996 y 2018 -2007).

Post-procesamiento de las imágenes

En este punto se realizó la validación de la clasificación mediante el análisis de 97 puntos mediante la aplicación de *Create Random Points*, los cuales fueron exportados al visualizador Google Earth con polígonos de uso y cobertura vegetal de interpretación sencilla. A partir de ello, se empleó un diagrama de contingencia (tabla de doble entrada), el cual según García y Llellish (2012), posibilita comparar los datos de la clasificación supervisada (filas) y los tomados mediante Google Earth (columnas). En esta parte, se consideró la exactitud de las clasificaciones con la comparación del número de píxeles y hectáreas entre la realidad y la clasificación inicial, donde los espacios sobrantes significaron errores en la asignación de datos. Aquí se evaluaron los errores tanto de omisión como de comisión (Boca y Rodríguez, 2012).

Coeficiente Kappa: De acuerdo con lo descrito por Fleiss y Cohen (1973), el estadístico Kappa de Cohen (1) permite conocer la exactitud que tiene la clasificación, identificando si se aleja o acerca al valor esperado de la concordancia que se obtiene de una asignación aleatoria (López y Fernández, 2001). Si el valor del índice Kappa (k) es cercano a cero demuestra un acuerdo al azar, pero si es uno, demuestra una alta fuerza de concordancia, es decir, hay veracidad entre el mapa y la realidad (Tabla 4).

$$k = \frac{N \sum X_{ii} - N \sum X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}} \quad (1)$$

k : Estadístico Kappa de Cohen

X_{ii} : Número de datos observados en el elemento de la fila i y de la columna i

X_{+i} : Total de datos observados en columna i

X_{i+} : Total de datos observados en fila i

N : Total de datos observados incluidos en la tabla de contingencia.

Se detalla en la Tabla 4, el significado de los valores de k en relación con la fuerza de concordancia entre los datos reales y los datos clasificados (López y Fernández, 2001).

Tabla 4. Significado de los valores del índice de Kappa

Valor de k	Fuerza de concordancia
0.20	Pobre
0.21-0.40	Débil
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Buena
0.81-1.00	Muy buena

Fuente: López y Fernández (2001).

Post-clasificación: Luego de identificar las áreas que el algoritmo clasificó de manera incorrecta se realizó la fotointerpretación manual y finalmente se crea la cartografía de cambio y uso del suelo para cada año de estudio (1996, 2007 y 2018).

3.2.1.2 Análisis del cambio de uso de suelo mediante la matriz de transición

La matriz de transición permitió realizar un análisis del cambio de uso del suelo y cobertura vegetal, lo que permitió denotar los cambios existentes en el período de estudio luego de la intersección entre los mapas de 1996 y 2018 de la cuenca media-alta del río Mira con uso del software ArcMap 10.4. Se interpreta que los datos hallados en forma diagonal son las áreas que no han tenido cambio en el uso del suelo y cobertura vegetal, por el contrario, los que se hallan afuera de dicha transición son las que presentaron cambios en el ámbito de perder o ganar terreno de dicha cobertura (Farfán et al., 2016).

Para una mejor comprensión se realizó un diagrama de flujo del proceso para la elaboración de la cartografía del cambio de uso de suelo y su análisis (Figura 5).

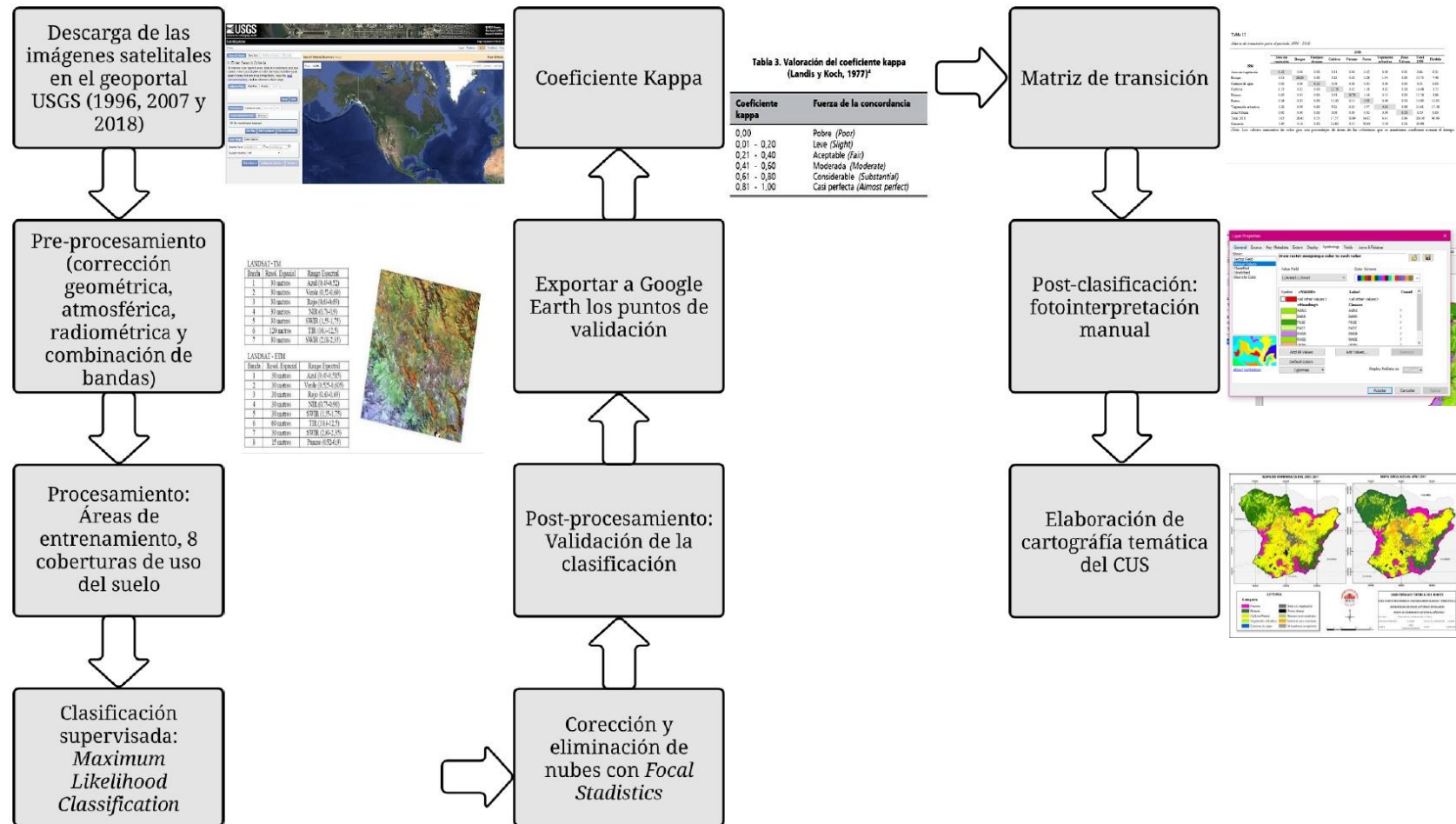


Figura 5. Flujoograma del proceso para la realización de cartografía del cambio de uso del suelo de la cuenca media-alta del río Mira

3.2.1.3 Modelación con la extensión SWAT

Al emplear el modelo hidrológico SWAT para la simulación de los procesos hidrológicos que se presentan dentro de la cuenca media-alta del río Mira. Se conoció la producción de sedimentos bajo escenarios de cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018, para ello se utilizaron parámetros de uso de suelo, climáticos, edáficos y geomorfológicos vinculados a la cuenca.

La versión empleada fue 2012.10.5.24 de ArcSWAT, compatible con el software ArcGIS 10.4. Para efectos de la investigación se crearon 2 proyectos, en el primero se trabajó con datos del año 1996-2007 y en el segundo con datos de 2007-2018, cada uno con sus respectivos parámetros requeridos dentro de la extensión SWAT.

Obtención del Modelo de Elevación Digital (MED)

El Modelo de Elevación Digital (MED) se obtuvo a partir de la página *Open Topography del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* (<https://portal.opentopography.org>) en formato TIFF, con una resolución espacial de 30 x 30 metros. Fue tratada y delimitada con base en un punto de salida del caudal del río Mira (Ambrosio et al., 2002) ubicado cerca de la Estación Hidrológica H0011 (Mira en Lita).

Obtención de datos meteorológicos e hidrológicos

Los parámetros de temperatura máxima y mínima, precipitación, velocidad del viento, heliofanía, punto de rocío y humedad relativa, se obtuvieron a nivel diario de las estaciones meteorológicas observadas en la Tabla 5. Estos fueron gestionados mediante un oficio directo al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología para las estaciones de Ecuador y al IDEAM para las estaciones de Colombia, de igual forma parte de los datos se obtuvieron de la página *Global Weather Data for Swat* (<https://globalweather.tamu.edu/>) debido a la inexistencia del 8.5% y 6% de datos diarios de precipitación y temperatura respectivamente en las estaciones M0305, M0326 y M0105.

Tabla 5. Estaciones meteorológicas de la cuenca media-alta del río Mira

Código	Nombre de la estación
M0003	Izobamba
M0001	Inguincho
M0103	San Gabriel
M0314	Ambuqui
M0025	Concordia
M0105	Otavalo
M0317	Cotacachi
M0305	Julio Andrade
M0326	Selva Alegre
52055220	El Paraíso
52050130	Chiles
52050110	Cumbal
51025090	Granja El Mira

Fuente: INAMHI (2019) e IDEAM (2018).

De igual manera, los datos mensuales de caudales para los años de 1996 hasta 2018, se obtuvieron de las estaciones hidrológicas asentadas dentro de la cuenca media-alta del río Mira facilitados de los anuarios hidrológicos del INAMHI, las estaciones se registran en la Tabla 6.

Tabla 6. Estaciones hidrológicas de la cuenca media-alta del río Mira

Código	Nombre de la estación
H0011	Mira en Lita
H0013	Blanco AJ. Mira
H0015	Chota en Pte. Carretera
H0016	Apaquí AJ. Chota
H0017	Apaquí en Gruta de la Paz
H0024	Blanco en Pte. Carretera
H0026	Itambi en Lago San Pablo

Fuente: INAMHI (2015).

3.2.1.2 Datos de entrada al modelo

En esta sección se detallan los datos que se requirieron como entradas en el modelo SWAT, entre ellos están los parámetros climáticos, parámetros de uso de

suelo, parámetros edáficos y parámetros geomorfológicos, con ello se corrió la extensión SWAT para la generación de las modelaciones hidrológicas.

Parámetros climáticos

En la herramienta SWAT se ingresaron variables climáticas de entrada directa y otras variables que requirieron ser calculadas, en datos mensuales y diarios de las estaciones anteriormente mencionadas con especial énfasis en los valores de precipitación junto a la temperatura mínima y máxima (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros climáticos requeridos en el modelo SWAT

Variable	Parámetro	Descripción	Unidades
Estaciones	WLATITUDE	Latitud de la estación meteorológica.	Grados decimales
	WELEV	Elevación de la estación climática.	m s.n.m
Temperatura	TMPMX (mon)	Promedio mensual de la temperatura máxima.	°C
	TMPMN (mon)	Promedio mensual de la temperatura mínima.	°C
	TMPSTDMX (mon)	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima.	°C
	TMPSTDMN (mon)	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima.	°C
	PCPMM (mon)	Promedio mensual de la precipitación diaria.	mm
Precipitación	RAIN_YRS	Se refiere al número de días máximo para la media hora de lluvia mensual.	días
	PCPD (mon)	Promedio mensual del número de días de lluvia.	días
Humedad	PR_W (1. mon)	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco,	días
	PR_W (2. mon)	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo.	días
Radiación	SOLRAV (mon)	Promedio mensual de la radiación solar diaria.	MJ/m ² /día
Viento	WNDV (mon)	Promedio mensual de la velocidad del viento.	m/s

Fuente: Ruales y Dávila (2019).

Parámetros de uso del suelo

Los parámetros que se utilizaron en este paso fueron las clases de cobertura vegetal y uso de suelo obtenidos del análisis multitemporal de las imágenes satelitales para los años 1996, 2007 y 2018, que se codificaron para entrada a la herramienta SWAT, posteriormente se ingresó la información raster del cambio de uso de suelo.

Parámetros edáficos

Los parámetros edáficos fueron recopilados con base en la información de textura y profundidad que se obtuvo del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2008) para cada área. En la Tabla 8 se detallan los datos de ingreso al modelo SWAT en este contexto.

Tabla 8. Parámetros edáficos requeridos en el modelo SWAT

Parámetro	Descripción
SNAM	Nombre del suelo en relación con la clasificación por Gran Grupo.
SOL_ZMX	Profundidad máxima del enraizamiento en el perfil del suelo.
ANION_EXCL	Se refiere a la porosidad del suelo, puede asumir un valor de 0.5.
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa.
SOL_BD	Densidad aparente del suelo.
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible.
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada, es una medida que indica la facilidad en la que se produce el movimiento de agua en el suelo.
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico, puede asumir el valor de 1.72%.
CLAY	Contenido de arcilla en %.
SILT	Contenido de limo en %.
SAND	Contenido de arena en %.
ROCK	Contenido de fragmento de roca %.
SOL_ALB	Albedo del suelo A= 0.6 (0.4 OM); en dónde A: albedo del suelo, MO%: Porcentaje de materia orgánica.
USLE_K	Ecuación Universal de pérdida del suelo con el factor de erodabilidad del suelo.

Fuente: Ruales y Dávila (2019).

Parámetros geomorfológicos

Como parte de los datos de entrada se utilizó el MED de la cuenca media-alta del río Mira y los datos de pendientes de la misma área clasificados en 5 categorías como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Rangos y relieves de pendientes

Rango en %	Relieve
0-5	Plano
5-12	Ligeramente ondulado
12-25	Ondulado
25-50	Montañoso
>50	Escarpado

Fuente: Hurtado y Yáñez (2015).

3.2.1.3 Análisis de sensibilidad y evaluación de los modelos

Con las modelaciones realizadas para los períodos 1996-2007 y 2007-2018, se seleccionaron 24 parámetros basados en el previo conocimiento del área de estudio. Se aplicó un análisis de sensibilidad mediante el empleo del software SWAT-CUP para conocer los parámetros más influyentes en el flujo de agua dentro de la cuenca. Para ello, se determinó la sensibilidad de estos por medio de un sistema de regresión múltiple donde un parámetro se estableció como sensible si $p < 0.05$ de acuerdo con la significancia del 95% con base en la prueba de t-student (Abbaspour, 2015).

Se procedió a realizar la calibración los datos de caudales simulados mediante el algoritmo SUFI-2 de SWAT-CUP el cual es una técnica de análisis de certidumbre. De acuerdo con Wang et al. (2020) SUFI-2 es capaz de proporcionar datos predictivos más razonables, de tal modo que los valores de caudales reales a nivel mensual proporcionados por el INAMHI sean similares a los caudales obtenidos por las modelaciones, para ello se realizaron 2000 simulaciones en cuatro iteraciones de 500 cada una para ambos períodos. Para efectos de estudio, se emplearon los valores de caudales de la Estación Hidrológica H0011 (Mira en Lita) debido a que está ubicado en el punto de aforo de toda la cuenca, lo que se

interpretaría como un ajuste general de la misma al calibrarlo y al comprobarlo estadísticamente mediante el Coeficiente de determinación (R^2). De acuerdo con Abbaspour (2015) el Coeficiente de determinación (R^2) presenta valores que oscilan entre el 0 y 1, dentro del cual el 0 indica un pésimo ajuste del modelo y el 1 demuestra una calibración perfecta. Para que los valores de la calibración sean aceptables con R^2 deben de ser valores superiores a 0.7.

Validación de datos obtenidos del modelo

Con los nuevos los nuevos valores de caudales obtenidos con los modelos ya calibrados se procedió a realizar la validación de estos con los caudales mensuales observados en ambos periodos, para ello se aplicó el coeficiente Nash-Sutcliffe y PBIAS.

El coeficiente Nash-Sutcliffe se utilizó para cuantificar la eficiencia del modelo hidrológico al comparar los caudales simulados con los caudales reales. El coeficiente puede tomar valores desde -infinito hasta la unidad considerada como la combinación óptima del modelamiento. Por otra parte, si toma el valor cercano a 1 indica mayor habilidad predictiva de los datos observados, mientras que un coeficiente menor a 0 indica una baja precisión (Magaña et al., 2013). Para determinar el coeficiente se aplicó la siguiente ecuación (2):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2} \quad (2)$$

Donde:

NS : Coeficiente Nash-Sutcliffe,

Q_{simi} : Caudal simulado

Q_i : Caudal observado

Q : Caudal medio observado

El coeficiente PBIAS permitió entender que se sobreestiman los valores de caudales si el valor es negativo o que se los está subestimando, si los valores son positivos, en general el valor de 0 es el óptimo dentro de este coeficiente (Andrade et al., 2013).

Se tuvo presente que la concentración de sedimentos en suspensión está relacionada con la precipitación, agua de escorrentía y velocidad de la misma en una cuenca (Gallart et al., 1997; Muller y Forstner, 1968). Es decir, mientras más producción de caudal haya en similar forma tenderá a aumentar la producción de sedimentos en una cuenca, por ende, para el estudio presente se consideraron como aceptables los valores de sedimentos obtenidos de la modelación ya calibrada y validada.

En la Figura 6 se muestra el proceso que se realizó para la ejecución de las modelaciones hidrológicas con sus respectivas validaciones.

3.2.2 Validación de la generación de sedimentos por erosión hídrica anual en las subcuencas

Se realizó una validación de la producción de sedimentos con la pre-calibración y validación de los caudales en ambos períodos, la premisa es que se puede inferir que los valores de sedimentos emitidos por los modelos están consecuentemente calibrados. Basados en el principio que indica una existencia de producción proporcional de sedimentos en función de los caudales (Arias, 2019).

3.2.3.1 Producción de sedimentos por microcuenca en los períodos 1996-2007 y 2007-2018

Para una mejor comprensión de la producción de sedimentos en la cuenca media-alta del río Mira, se expresó gráficamente la producción promedio de sedimentos por microcuencas para cada período de estudio. Luego, se promediaron los valores de sedimentos por periodo permitiendo evidenciar las diferencias producción entre ellos.

3.2.3.2 Simulación de la producción de sedimentos desde 2007 a 2021

Con el fin de analizar como varía la carga de sedimentos producidas anualmente por la cuenca media-alta del Mira, se hizo una proyección de los valores obtenidos por SWAT desde 2007 hasta el 2021 mediante modelación. Luego, se realizó un ajuste de los parámetros con el empleo nuevamente los valores que permitieron calibrar el modelo en un inicio. Mediante la obtención de los valores de sedimentos en toneladas, se realizó una comparación gráfica con respecto a los valores de caudales (m^3/s) que se producen en la cuenca (Moriassi et al., 2008).

3.2.3.2 Análisis de muestras de agua

Se realizó la recolección *in situ* de muestras de agua durante cuatro meses (octubre 2020 - enero 2021), tomadas del caudal de la estación hidrológica H0015 Chota Pte. Carretera. Luego fueron llevadas al Laboratorio EMAPA-I (Anexo 1) para analizar parámetros como color aparente, sólidos totales disueltos, sólidos totales y sólidos suspendidos totales. Con la finalidad de conocer valores reales de

producción de sedimentos los cuales se usaron como indicadores para entender si existe una tendencia de relación o no entre los sedimentos simulados para esas fechas con los observados de la estación. Para analizar esa tendencia se consideró el Coeficiente de Nash-Sutcliffe y la regresión lineal.

Las restricciones de movilidad frente a la pandemia del COVID – 19 dispuestas por el COE Nacional para inicios del 2021 limitaron el tiempo de la toma de muestras en campo por lo cual se lo considera como una limitación metodológica dentro del desarrollo de la investigación.

3.2.3 Análisis de las causas antrópicas de la variación de erosión hídrica

Se consideró que para la aplicación del modelo SWAT fue necesaria la división de la cuenca media-alta del río Mira en microcuencas, por lo que se obtuvieron datos de simulación de sedimentos de cada una para evaluar los efectos que tienen el cambio de uso de suelo con respecto a la generación de sedimentos y a su vez las actividades antrópicas más influyentes.

3.2.3.1 Regresión Geográfica Ponderada

El modelo de Regresión Geográfica Ponderada o *Geographically Weighted Regression* (GWR), de acuerdo con Fotheringham et al. (2014) es un modelo de regresión local que se basa en el uso de una ecuación para cada elemento del grupo de datos de la variable dependiente, con el objetivo de reconocer las variaciones geográficas (Martínez y Carolina Rojas, 2015). De este modo es conocido como una extensión del modelo de regresión estándar que permite estimar los parámetros locales en lugar de los globales, en resumen, se lo considera como un tipo de estadística que produce un conjunto de estimaciones de parámetros locales que demuestran como varían las relaciones en el espacio para entender claramente las causas ocultas de este patrón (Fotheringham et al., 2014). El modelo se expresa en la siguiente ecuación (3):

$$y_i = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^P \beta_i(u_j, v_j)X_{ij} + \epsilon_j \quad (3)$$

Donde:

u_j y v_j = son las coordenadas para cada ubicación j

$\beta_0(u_j, v_j)$ = es la intersección para la ubicación j

$\beta_i(u_j, v_j)$ = es la estimación del parámetro local para la variable independiente

X_i = en la ubicación j

Mediante el software ArcGIS 10.4, se realizó una intersección entre la variable independiente correspondiente a la variación del cambio de uso del suelo entre los años 1996 y 2018 de cada una de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo, con excepción de los cuerpos de agua, y la variable dependiente que corresponde a la variación de los datos medios de sedimentos en t/ha/año entre 1996 y 2018 obtenidos de los modelos hidrológicos por cada una de las 16 microcuencas del área de estudio. Con ello, se obtuvo un valor de R^2 local que permitió medir el grado de correlación espacial entre las variables dependiente e independiente, el valor de R^2 para Regresión Geográfica Ponderada se evaluó de acuerdo con los rangos de la Tabla 10.

Tabla 10. Criterios de aceptabilidad del R^2 para la Regresión Geográfica Ponderada

Rango R^2	Aceptabilidad
0-0.25	Muy bajo
0.25-0.50	Bajo
0.50-0.75	Alto
0.75-0.96	Muy alto

Fuente: Nash y Sutcliffe (1970).

3.2.3.2 Análisis cualitativo

Con los valores de regresión local se elaboró cartografía para cada tipo de uso y cobertura vegetal del suelo, con ello se reconocieron visualmente las áreas con mayor incidencia entre la erosión hídrica y el cambio de uso del suelo en la cuenca media-alta del río Mira, lo que permitió identificar la relevancia de las mismas mediante revisión bibliográfica.

3.3 Materiales y equipos

Los materiales y equipos empleados fueron publicaciones hidrológicas y meteorológicas del período 1996-2018 disponibles en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), para la elaboración de mapas se utilizó cartografía de libre acceso del Sistema Nacional de Información (2015) a escala 1:50 000 en conjunto al software ArcGIS 10.4, Soil Water Characteristics y la extensión SWAT (Tabla 11).

Tabla 11. Materiales y equipos utilizados en la investigación

Materiales	Equipos
Libreta de campo	Navegador GPS Garmin
Base de datos hidrológicos y meteorológicos (INAMHI)	Cámara digital fotográfica
Software ArcGIS (Versión 10.4)	Computador
Extension Soil Water Assessment Tool (SWAT)	Impresora
Herramienta SWAT-CUP	
Imágenes satelitales LANDSAT y SENTINEL	

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se describen los resultados por cada objetivo planteado al demostrar la erosión hídrica producida en cada microcuenca de la cuenca media-alta del río Mira en el período 1996-2007 y 2007-2018 a causa del cambio de uso del suelo.

4.1 Modelamiento de la generación de sedimentos bajo escenarios de cambio de uso del suelo

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos sobre el cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018, el análisis de las modelaciones en SWAT.

4.1.1 Evaluación del cambio de uso de suelo en el periodo 1996-2018

En la Figura 7 se identifica una alta variación de varios tipos de coberturas al comparar los años 1996 y 2018.

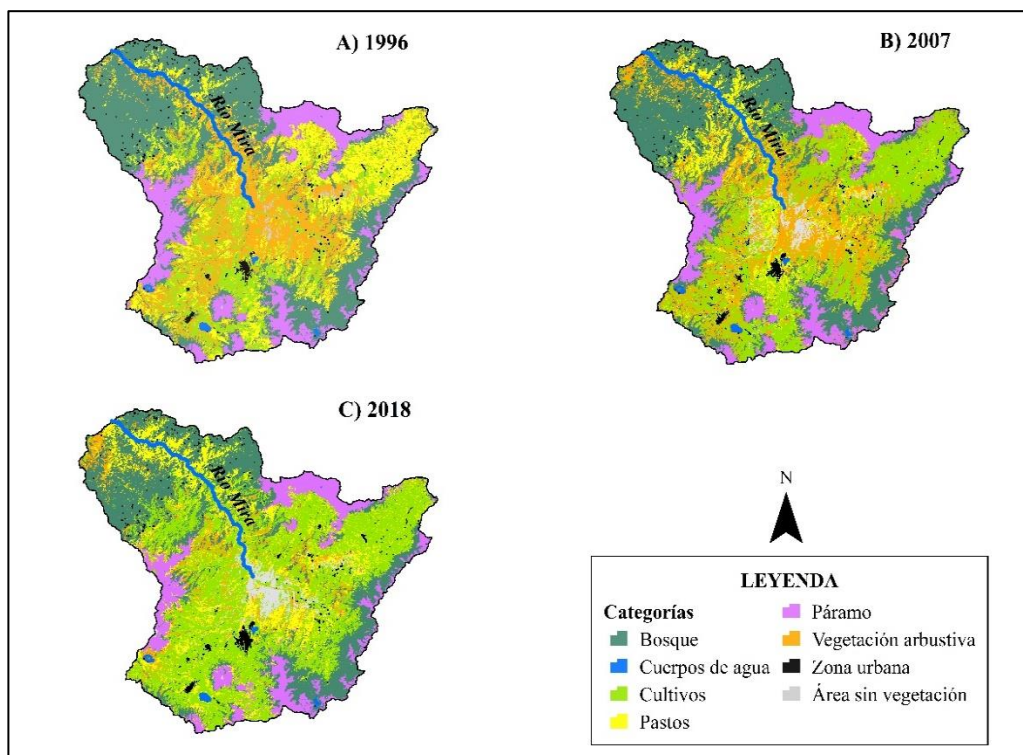


Figura 7. Representación de cobertura y uso de suelo de la cuenca media-alta del río Mira: A) Año 1996; B) Año 2007 y C) Año 2018

A partir de los resultados de las variaciones en los cambios de cobertura vegetal de la clasificación supervisada se evidenciaron aumentos y disminuciones en cada categoría de cobertura y uso de suelo en los 22 años analizados. Gráficamente fue notorio el aumento de vegetación arbustiva hacia la parte media- alta de la cuenca y el predominio de pastos y cultivos en esta zona. La cobertura bosque disminuye hacia la parte noroeste de la cuenca (Figura 7).

López et al. (2015) menciona que la transición de las coberturas naturales a pastizales representa una desventaja en cuanto a procesos ecológicos, pero es en general muy común en las cuencas evidenciar este cambio debido a que las personas aprovechan los predios para el pastoreo y por otra parte para la siembra de cultivos que se adaptan a los suelos y proporcionan una serie de productos como maíz, papas, habas, hortalizas, fréjol, trigo, cebada y frutales (Terán, 2014).

4.1.2 Análisis de cambio de uso de suelo mediante matriz de transición

Para la matriz de transición se analizaron ocho categorías de cobertura y uso de suelo: bosques, pastos, cultivos, zonas urbanas, vegetación arbustiva, páramo, área sin vegetación y cuerpos de agua. En las cuales se registró en el periodo 1996-2018 que las categorías de zona urbana, pastos, cultivos y área sin vegetación aumentaron en área respecto a la cuenca, mientras que las coberturas de bosque, páramo, vegetación arbustiva disminuyeron en superficie (Figura 8).

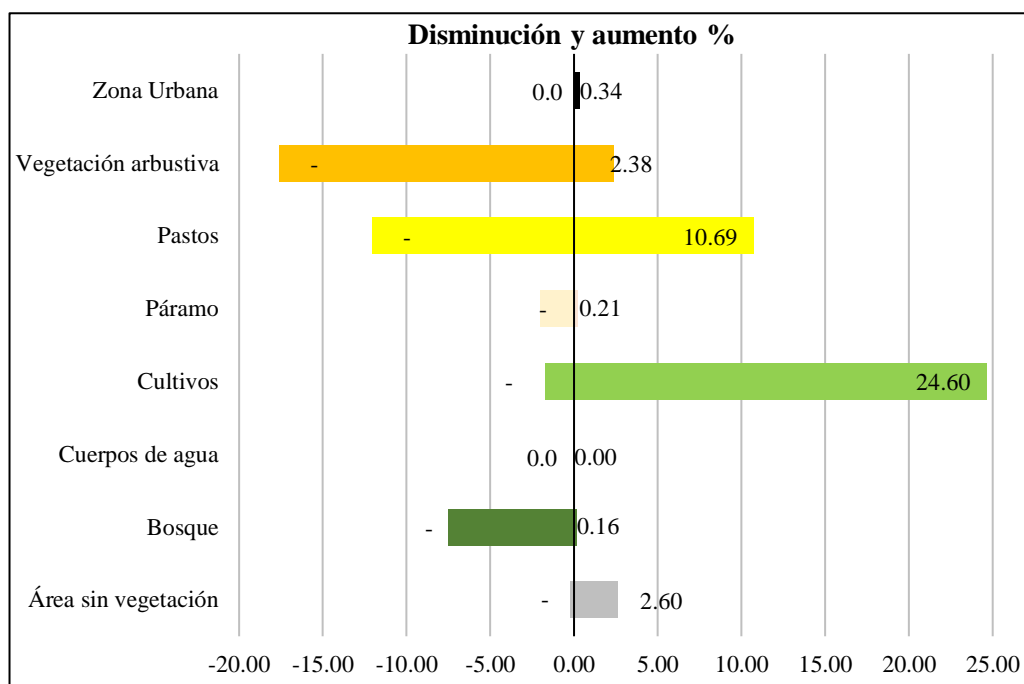


Figura 8. Disminución y aumento porcentual de coberturas y usos de suelo entre 1996-2018 (datos presentados con respecto al valor total de la cuenca en estudio).

De esta manera para el año 2018 se registró una pérdida de vegetación arbustiva del 17.58%, principalmente en su transición hacia pastos 5.97% y a cultivos con un valor de 9.21%. Esto se debe a que las principales actividades económicas resultaron del sector primario, situación que engloba a la agricultura y ganadería (Yépez, 2016). Sin embargo, la categoría pastos tiene una pérdida del 12.01%, enfatizado el 11.40% en el cambio hacia cultivos, por lo que se resaltó para el 2018 que la principal actividad económica de la cuenca es la agricultura ya sea de cultivos permanentes o transitorios. La zona urbana se incrementa de manera lenta en 0.34% (Tabla 12).

Los bosques evidenciaron una transición especialmente hacia cultivos, pastos y vegetación arbustiva, lo que trae consigo una pérdida del 7.48% para el año 2018. Dato que se ratifica con lo mencionado por Harden (1988) quien señala en su estudio de la cuenca del río Ambato que la deforestación durante los años sesenta y setenta incrementó en la cobertura boscosa en un 16.21% debido al aumento de la actividad agrícola lo que resultó en el desgaste del suelo con pérdidas de hasta 20 t/ha.

Un estudio similar realizado por Pinos (2016) en el cantón Cuenca arroja valores en pérdida de bosque del 8.3% que fueron reemplazados por categorías de pastos y cultivos lo que incrementó su superficie a 19.3%. Todos los cambios de transición del bosque a otras coberturas antrópicas desencadenan varias consecuencias como lo menciona López et al. (2015) al argumentar que la pérdida de bosque desde el punto de vista ambiental es el cambio menos conveniente por la gran variedad de servicios ecosistémicos que brindan los bosques, además de la pérdida de biodiversidad y de hábitat de varias especies de animales.

Tabla 12. Matriz de transición para el periodo 1996 – 2018 (valores en unidades porcentuales)

	2018									
	Área sin vegetación	Bosque	Cuerpos de agua	Cultivos	Páramo	Pastos	Vegetación arbustiva	Zona Urbana	Total 1996	Pérdida
1996										
Área sin vegetación	0.42	0.00	0.00	0.18	0.00	0.02	0.00	0.01	0.64	0.21
Bosque	0.01	26.26	0.00	3.23	0.02	2.28	1.94	0.00	33.75	7.48
Cuerpos de agua	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
Cultivos	0.13	0.02	0.00	12.76	0.02	1.38	0.02	0.16	14.48	1.72
Páramo	0.00	0.03	0.00	0.58	10.78	1.04	0.33	0.00	12.76	1.98
Pastos	0.26	0.02	0.00	11.40	0.15	3.93	0.09	0.10	15.93	12.01
Vegetación arbustiva	2.20	0.09	0.00	9.21	0.03	5.97	4.03	0.08	21.61	17.58
Zona Urbana	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00
Total 2018	3.03	26.42	0.33	37.37	10.99	14.62	6.41	0.84	100.00	40.99
Ganancia	2.60	0.16	0.00	24.60	0.21	10.69	2.38	0.34	40.99	

En la tabla de transición, también se ratifica el aumento de coberturas de área sin vegetación, cultivos y pastos, que incrementan un 2.60%, 24.60% y 10.69% respectivamente. Por su parte los cultivos denotaron un aumento significativo casi triplicando la superficie registrada para el año inicial. Carrión (2017) en su estudio asegura que el cambio es a consecuencia de las actividades antrópicas del lugar. Además del crecimiento poblacional ya que alteran la dinámica de las coberturas naturales porque surge la necesidad de hacer un cambio de uso de suelo hacia tierras para cultivos o pastizales que sirven de alimento para el ganado.

4.1.3 Caudales simulados de la cuenca media-alta del río Mira

Se presentan los caudales de la cuenca a nivel mensual, determinados mediante el modelo hidrológico SWAT en los períodos de 1996-2007 (Figura 9) y 2007-2015 (Figura 10) sin calibrar y sin validar respectivamente. La comparación muestra los caudales de la estación hidrológica H0011 con respecto a los caudales simulados por la extensión SWAT.

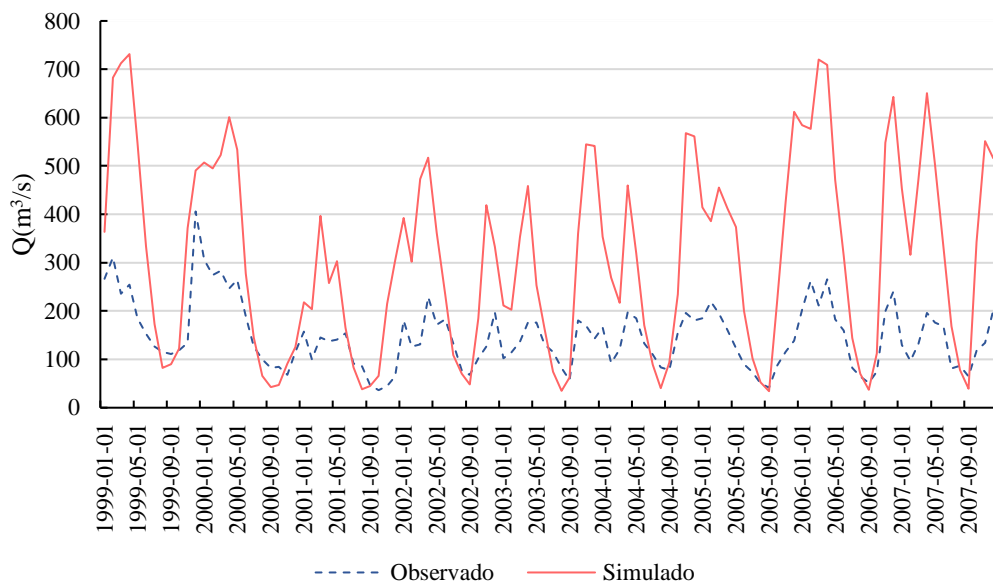


Figura 9. Comparación caudal observado con el simulado periodo 1996-2007

En la Figura 9 se observa la representación para el período 1996-2007, el cual dio como resultados un valor de R^2 de 0.67, valor que de acuerdo con Abbaspour (2015) es considerado como bueno. Agregado a ello posee un NSE de -9.95, que

se categoriza como insuficiente, además, se observa que los picos sobrestiman la producción de caudales hasta en un 152%, esta simulación elevada puede deberse al desbalance de ajuste por defecto existente dentro de los parámetros principales propios del modelo antes de calibrar (Uzeika et al., 2012) lo que indica el requerimiento de un ajuste para que la simulación sea válida.

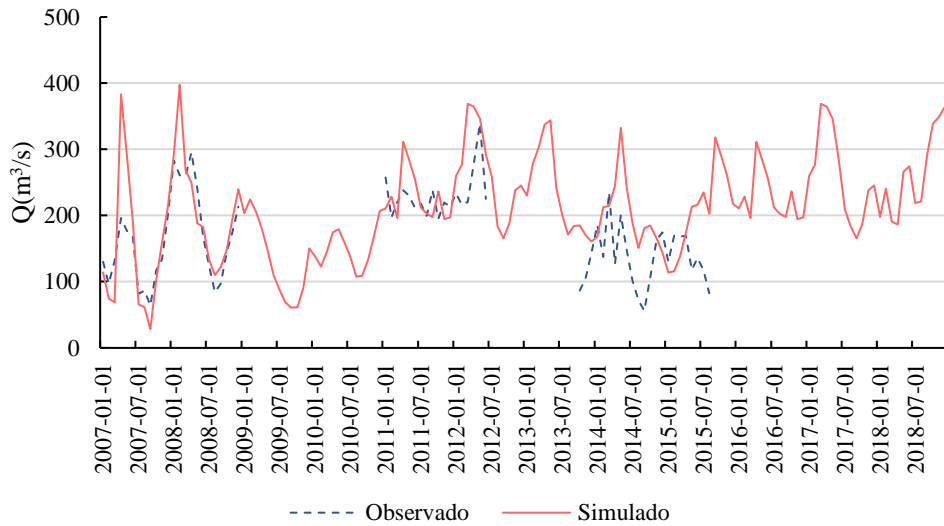


Figura 10. Comparación caudal observado con el simulado periodo 2007-2018

La Figura 10, presenta una comparación generalizada de caudales reales con los observados a pesar de no contar con extensa información para la estación hidrográfica H0011. Para efectos de estudio se realizó un análisis con los años 2007 y 2008 que cuentan con datos completos de caudales, lo que dio como resultado una correlación de 0.64 y para el estadístico NSE un valor de 0.21. Se toma en cuenta las sobrestimaciones de hasta un 42% para los picos analizados.

4.1.4 Calibración y validación de datos

El ajuste de la modelación se realizó prestando énfasis en los parámetros con mayor sensibilidad dentro de la cuenca. Algunos parámetros se asemejaron a los que tomó como referencia Endara (2018) en su análisis dentro de un área con las condiciones similares a la presente. En este contexto, Torres et al. (2005) señalaron que luego de evaluar la sensibilidad de varios parámetros dentro de su modelo hidrológico correspondiente a una cuenca mediana con pendientes

pronunciadas, la curva número (CN2.mgt) es la que presentó mayor influencia dentro de los procesos de estimación de la escorrentía superficial en la cuenca.

Oñate-Valdivieso et al. (2016) en su estudio enfocado en cuencas con áreas montañosas de Ecuador, toma en cuenta con mayor prioridad al parámetro CN2, evidenciando su mayor sensibilidad con respecto a todos los empleados, esto es debido a que CN2 permite hacer una separación de la precipitación efectiva de la total, de forma que permite conocer directamente la cantidad escorrentía total en la cuenca. Con este enfoque, el siguiente parámetro altamente sensible para los dos períodos dentro de la cuenca media-alta del río Mira corresponde a SOL_AWC, el cual representa la capacidad de agua disponible, seguido de ALPHA_BF encargado del flujo base para el almacenamiento bancario y ESCO, referente al factor de compensación de la evaporación del suelo, todos cuatro relacionados a las características del suelo y el flujo del agua en la cuenca (Aparecida y Calijur, 2010). En la Tabla 13 se presentan los valores de los parámetros antes y después de la calibración para los períodos de estudio.

Tabla 13. Parámetros sensibles para la calibración

Parámetro	Período 1996-2007		Período 2007-2018	
	Simulación	Calibrado	Simulación	Calibrado
CN2.mgt	70	35	70	35
SOL_AWC.sol	0.142	0.32	0.33	0.38
ALPHA_BF.gw	0.048	0.0014	0.0015	0.0016
ESCO.hru	0.45	0.725	0.95	0.852
CH_N2.rte	0.004	0.0025	0.020	0.0025

Al realizar los ajustes con los nuevos parámetros se obtuvieron valores mensuales de los caudales ya calibrados con respecto a los datos otorgados por el INAMHI en la estación H0011 para cada período como se presentan en la Tabla 14. Los datos de caudales calibrados se consideraron finalmente apropiados al obtener resultados satisfactorios en los estadísticos R^2 , NSE y PBIAS con valores de 0.75, 0.71 y 4.48 respectivamente para el período 1996-2007 y con valores de 0.78, 0.72 y 5.52 para el periodo 2007-2018. Con estos resultados, ambos períodos representan mejores tendencias y ajustes con lo que se consideran validados para poder predecir caudales de la estación en años posteriores.

Tabla 14. Valores de caudales promedio reales y los calibrados

Meses	Periodo 1996-2007		Periodo 2007-2018	
	Datos INAMHI (m ³ /s)	Calibrado (m ³ /s)	Datos INAMHI (m ³ /s)	Calibrado (m ³ /s)
Enero	188.49	149.61	203.43	193.42
Febrero	177.26	168.42	179.61	198.69
Marzo	176.92	153.16	205.80	214.99
Abril	207.04	162.19	217.21	208.93
Mayo	178.48	154.86	217.51	222.10
Junio	151.27	119.03	176.13	211.45
Julio	104.45	117.61	128.53	193.73
Agosto	82.86	103.14	105.14	142.08
Septiembre	69.24	74.43	99.86	98.09
Octubre	106.16	127.44	129.95	188.17
Noviembre	131.85	151.23	145.92	190.82
Diciembre	187.56	159.10	189.24	197.08

La Figura 11 evidencia el ajuste entre el caudal real (INAMHI) y los datos calibrados en SWAT para el período 1996-2007, en la cual se puede denotar un buen comportamiento en la simulación de los valores. No obstante, aún con el modelo calibrado sigue la tendencia de apenas sobreestimar la producción de caudales en algunos picos con mayor énfasis entre los años 2000 y 2004 con un promedio de 14%.

Hasan y Wyseure (2018) argumentaron que este tipo de sobreestimación se puede atribuir a que la técnica de la curva número (CN2) no es del todo suficiente para una predicción precisa para un día con tormentas numerosas, además el nivel de humedad del suelo difiere de una tormenta a otra. Por ello, en el presente estudio se deduce que la cuenca se mantuvo más húmeda que lo que deduce el modelo en algunos meses y una vez que llega la época lluviosa (diciembre-mayo) el modelo tiende a sobreestimar la producción de agua en una medida aceptable, lo que demuestra una subestimación de la infiltración y retención en el perfil de suelos y acuíferos.

Al analizar la generación de caudales para la estación H0011 en el período de 1996-2018 (Figura 11), se pudo interpretar que los valores mensuales no

sobrepasan los 400 m³/s, el cual se mantiene tanto para los valores reales como para los simulados. A nivel general, el desempeño del modelo precisamente en la estación H0011 en el período de calibración es muy bueno, por cuanto los valores estadísticos de las funciones objetivos se ubicaron dentro de los rangos más aceptables.

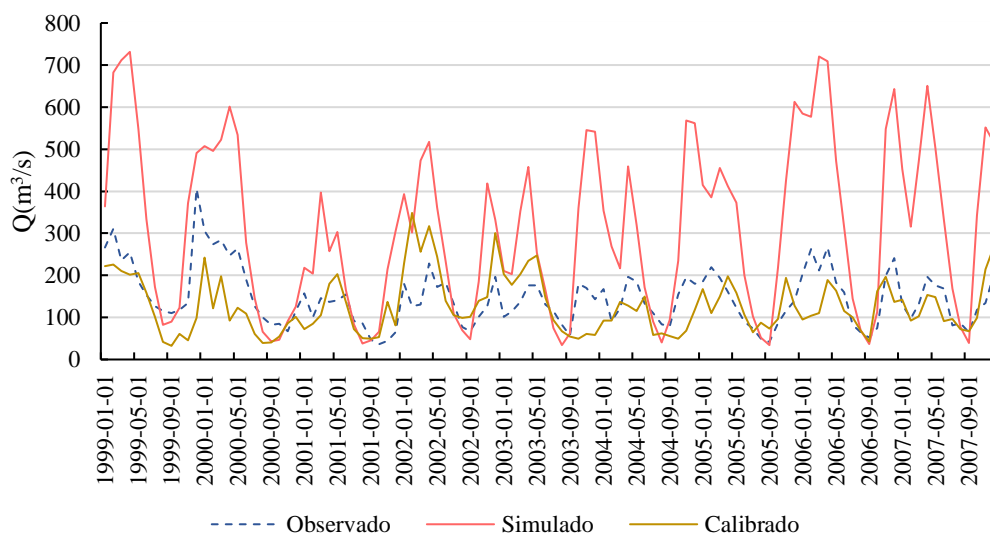


Figura 11. Comparación caudal observado con el calibrado periodo 1996-2007

En la Figura 12, se representan los valores calibrados desde 2007 a 2018, los cuales demuestran un mejor ajuste con respecto al período de simulación. Se pudo notar que los valores para los años 2016, 2017, 2018, fueron estimados una vez hecha la calibración, con lo que se obtuvo una respuesta satisfactoria en los resultados de acuerdo con los estadísticos R², NSE y PBIAS presentados, lo que permitió demostrar la validación del modelo en la simulación de caudales.

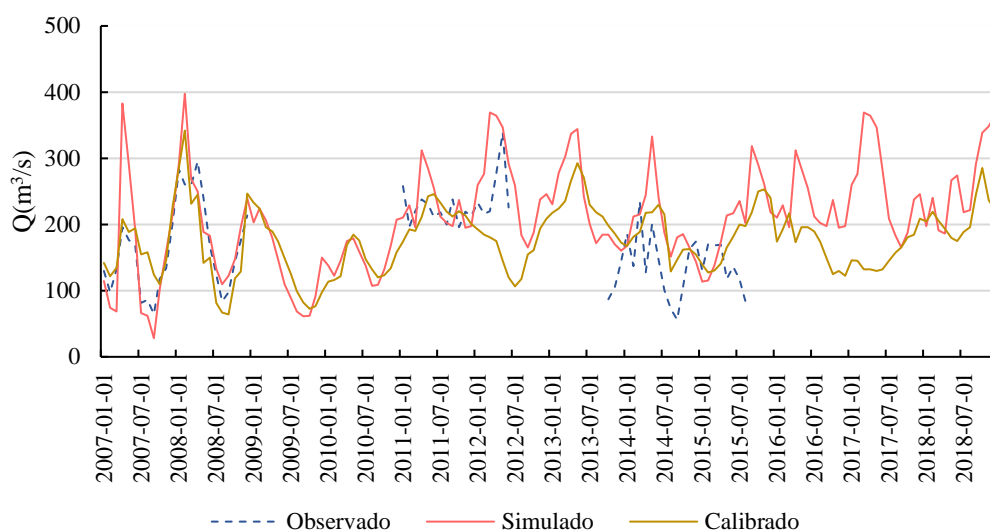


Figura 12. Comparación caudal observado con el calibrado en el periodo 2007-2018

Los resultados luego de ajustar los parámetros variaron al punto de permitir mejor ajuste, por ende, se concuerda con Maroneze et al. (2014) quien asegura que el modelo SWAT es extremadamente sensible a la calidad de los datos de entrada con respecto a las variables referidas al suelo. La precisión del modelo depende en gran parte de los parámetros que describen las características relevantes de la cuenca hidrográfica (Hasan y Wyseure, 2018).

4.1.5 Producción de sedimentos

Se presentan los valores de sedimentos en toneladas que se generaron cada mes en toda la cuenca media-alta del río Mira cómo se observa en la Tabla 15. Se consideraron confiables los valores de sedimentos al evidenciar que los modelos hidrológicos generaron excelentes resultados en la calibración y validación de sus respectivos caudales. Esto último basados en lo demostrado por Muller y Forstner (1968) y Graf (2006) referente a la existencia de una relación positiva entre la precipitación, caudales y la generación sedimentos de una cuenca por el principio de que a mayor precipitación en el suelo mayor capacidad de erodabilidad presentará al considerar los parámetros climatológicos y topográficos.

Tabla 15. Valores de sedimentos promedio reales y calibrados

Meses	Periodo 1996-2007		Periodo 2007-2018	
	Simulado (t)	Calibrado (t)	Simulado (t)	Calibrado (t)
Enero	25 365.82	333.21	11 578.12	4959.42
Febrero	23 293.70	286.23	9447.37	3912.10
Marzo	40 949.60	404.39	11 032.65	4042.10
Abril	48 434.80	485.80	12 858.35	4519.51
Mayo	18 678.14	215.91	11 777.33	3379.33
Junio	7979.41	141.34	7807.49	1617.82
Julio	1766.39	23.63	5310.91	970.66
Agosto	572.20	18.39	5452.92	1702.82
Septiembre	1204.21	46.92	5684.06	1860.79
Octubre	14 584.86	298.57	7212.48	1751.42
Noviembre	38 804.13	444.36	8729.12	2613.68
Diciembre	35 949.39	324.09	10 420.38	3129.03

Los resultados de la Tabla 15 que muestra la producción de sedimentos totales simulados por SWAT (MUSLE + degradación) demuestran que hubo una variación total por período entre lo simulado y los valores calibrados de al menos 16000 t, lo cual demuestra la importancia de ajuste del modelo con respecto a los caudales para no sobreestimar la generación de sedimentos por subcuencas. De acuerdo con Horna (2016) los valores de sedimentos disminuyeron con el ajuste del modelo para ambos períodos al tomar en cuenta que se realizó una calibración en el parámetro de la velocidad del flujo de la escorrentía superficial. Un punto de especial importancia a tomar en cuenta dentro del análisis de la producción de sedimentos con SWAT, es que éste no toma en cuenta las diferentes pendientes de la cuenca al momento de modificar la escorrentía superficial, por ello, se puede caer en errores al estimar los valores de sedimentos (Valverde, 2018).

Se observa una tendencia de menor producción de sedimentos entre los meses de junio y agosto, meses en los que de acuerdo con la Tabla 14 se presenta un menor caudal y de igual manera para los meses de junio a septiembre demuestran una disminución tanto en caudal como en sedimentos, lo que evidencia el principio de proporcionalidad mencionada anteriormente. La cuenca presenta una erosión hídrica de 34.18 t/ha/año, por lo que se considera que tiene un nivel de erosividad

moderada al estar en un rango de entre 10 – 50 t/ha/año de acuerdo con la categorización propuesta por la FAO (1984).

Se determinó una generación de sedimentos total de 17 248 933.67 t, con una variación considerable en la producción de sedimentos del primer periodo con respecto al segundo, dado que se estimó una diferencia de 15 566 962.73 t, valor que responde a los cambios de cobertura existentes en el área de estudio con el transcurso de los años. Estos datos de erosión hídrica son comparables a los presentados por Ballesteros y Ñacato (2020) dentro de su estudio en la microcuenca del río Blanco durante el mismo período de tiempo, además de tener características climatológicas y topográficas similares a la del presente estudio, en ella se identificó una producción de sedimentos con variabilidad de entre 10 a 200 t/ha/año dependiendo de la cobertura del suelo.

Los resultados comparativos evidencian el buen desempeño del modelo SWAT, en el mismo marco, algunos autores como Hurtado y Yáñez (2015) y Veintimilla et al. (2019) manifiestan en sus investigaciones dentro de áreas con pendientes, tipos de suelo y tamaño de la cuenca similares al área en estudio que efectivamente el modelo SWAT es eficiente en la modelación de caudales, al ser integrado con características hidrogeológicas, en el cual mientras más exacta es la información climatológica proporcionada, mayor tiende a ser el poder predictivo, con énfasis las restricciones que presenta dentro de la calibración de los parámetros (Rajat, 2021).

Zárate (2010) destacó la alta eficiencia que presenta el modelo hidrológico SWAT para simular el comportamiento del flujo hídrico sin dejar de lado la variabilidad de las precipitaciones de acuerdo con cada época del año. Su estudio fue realizado en dos cuencas montañosas de Bolivia, similares en geomorfología y extensión al presente, con las que el autor verificó estadísticamente que el modelo fue capaz de simular los diferentes componentes hidrológicos, con un adecuado procesamiento de datos de entrada con respecto a las redes hidrometeorológicas.

4.2 Validación de la generación de sedimentos por erosión hídrica anual en las subcuencas

La estimación de la producción de sedimentos generada por el modelo hidrológico para la cuenca media-alta del río Mira permite estimar el arrastre de sólidos totales por medio de mecanismos hídricos. Por ello, se presentan los datos de producción de sedimentos por microcuencas para los periodos 1996-2007 y 2007-2018 (Tabla 16).

Tabla 16. Valores de generación de sedimentos por períodos en las microcuencas

ID	Nombre de microcuenca	Sedimentos	Sedimentos	Variación (%)
		(t) 1996-2007	(t) 2007-2018	
M1	M. Media-Baja Río Mira	108 108.79	2 443 137.58	15.00
M2	M. Baja Río Lita	83 908.01	87 227.83	0.02
M3	M. Río Blanco	56 413.95	582 042.90	3.38
M4	M. Media Río Mira	86 454.60	1 649 678.35	10.04
M5	M. Río San Francisco	24 550.12	92 429.13	0.44
M6	M. Río Lita	48 956.86	882 807.20	5.36
M7	M. Río Piguchuela-Mira	78 915.68	1 644 580.07	10.06
M8	M. Río Palacara	9 793.35	126 902.53	0.75
M9	M Baja Río Chota	83 349.32	986 834.12	5.80
M10	M. Río Angel	86 454.60	1 148 196.18	6.82
M11	M. Media Río Chota-Ambuqui	30 338.79	994 201.23	6.19
M12	M. Río Rumichaca o Apaqui	88 976.90	1 948 690.05	11.95
M13	M. Baja Río Ambi	10 850.59	345 450.19	2.15
M14	M. Alta Río Chota/Mataqui	6 235.69	712 700.29	4.54
M15	M. Tahuando y End. Yahuarcoha	27 182.69	897 312.30	5.59
M16	M. Alta Río Ambi	10 495.53	1 865 758.25	11.92
TOTAL		840 985.47	16 407 948.20	100

Se aprecia una distribución de los sedimentos variable entre las 16 microcuencas que presenta la cuenca media-alta del río Mira en los dos periodos analizados con mayor variación en las microcuencas media-baja del río Mira (M1), media del río mira (M4), río Piguchuela-Mira (M7), río Rumichaca o Apaquí (M12) y alta del río Ambi (M16).

Adicionalmente, se identifican que para el primer período hubo una producción promedio en las 16 microcuencas de 76 453.22 t/año y en el segundo período fue de 1 491 631.71 t/año. Este último dato se contrasta con lo dispuesto por Valverde (2018) quien estimó para áreas montañosas un promedio de 630 500 t/año, lo que indica la existencia de un problema de erosión latente. La diferencia de producción de sedimentos registrada en los dos periodos es de 1 415 178.49 t/año.

Hurtado et al. (2015) destacaron en sus resultados sobre la aplicabilidad del modelo SWAT en cuencas de áreas montañosas, que el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos se presentan generalmente con mayor fuerza en las partes media y baja de las cuencas, puesto que en estas zonas la cobertura y uso de suelo son mayormente degradadas por las actividades antrópicas como cultivos, pastos o ganadería. De la misma manera otros estudios realizados por Pokhrel (2018) y Choque (2015) afirmaron que existe mayor producción de sedimentos en áreas agrícolas, con cultivo y potrero que en áreas donde el suelo esté protegido de procesos erosivos principalmente cubiertos de vegetación arbórea o arbustiva (Valverde, 2018).

En la Figura 13 para el primer periodo (A) se puede notar gráficamente que las microcuencas del río Rumichaca o Apaquí (M12), media del río Mira (M4) y media baja del río Mira (M1) son las que presentan mayores aportaciones de sedimentos hacia el flujo de salida. Para el segundo periodo (B) las microcuencas del río Piguchuela-Mira (M7), media del río Mira (M4) y media baja del río Mira (M1) se registran con mayor cantidad de sedimentos. Esto está relacionado al grado de inclinación que presentan las microcuencas en esas zonas, a la altitud que por consecuencia representan mayor capacidad erosiva del suelo, pero también al uso de suelo y al arrastre de los sedimentos de las subcuencas altas hacia las bajas.

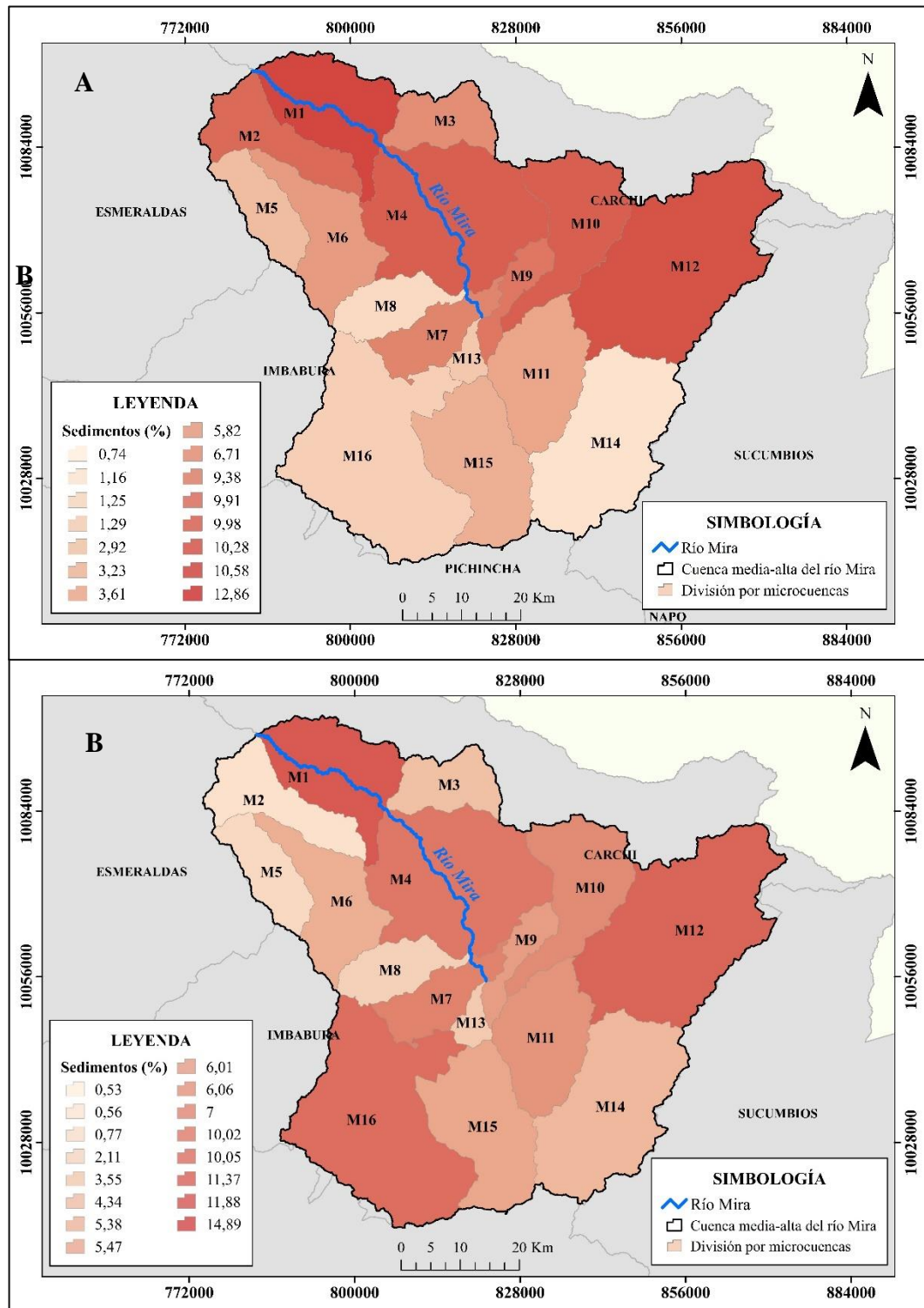


Figura 13. Representación de la generación de sedimentos en las subcuencas: A) Periodo 1996-2007 y B) Periodo 2007-2018

La disminución de cobertura hace que la erosión sea más eminente, principalmente en regiones donde la temporada de lluvias está restringida a

alrededor de 3 a 4 meses al año. La erosionabilidad y los factores topográficos aún proporcionan la disposición a la generación de sedimentos en ambos.

4.2.1 Simulación de la producción de sedimentos desde 2007 a 2021

La proyección de los valores a 2021 (Figura 14) la variabilidad de la producción de sedimentos y caudales a lo largo del tiempo incluyendo las fechas a las cuales no se cuenta con datos previos climatológicos, es decir, de 2018 a 2021.

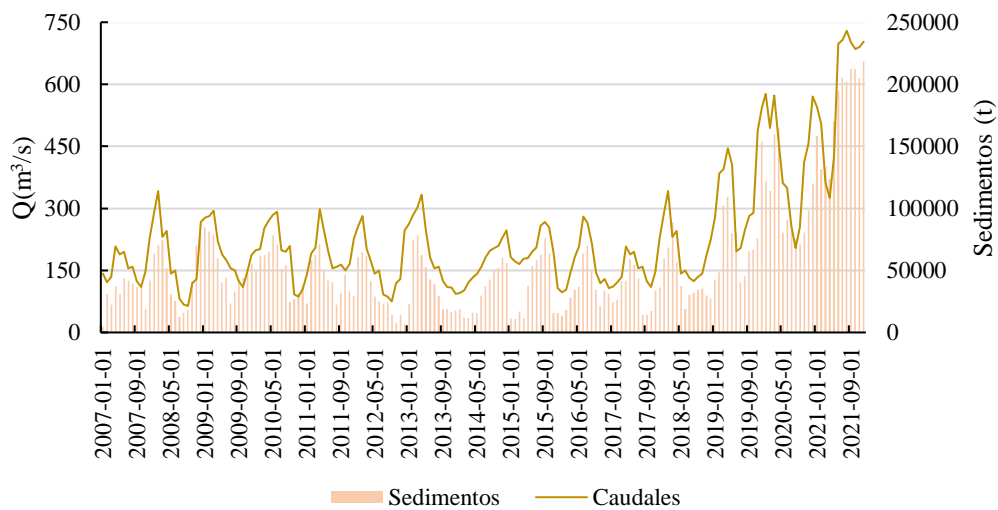


Figura 14. Proyección a 2021 de la producción de sedimentos

Se observa en ambas variables que siguen una tendencia de proporcionalidad, tal y como se había mencionado con anterioridad, esto debido a que el caudal es el medio por donde los sedimentos son transportados, concordando con lo demostrado por Choque (2015) en donde indicó una proporcionalidad entre en la producción de caudal y sedimento con respecto a las precipitaciones, tomando en cuenta que los meses con mayor precipitación son los que poseen mayor producción de las variables mencionadas.

Es importante notar la tendencia de aumento tanto de la producción de caudales como de sedimentos a medida que pasa el tiempo, lo cual lleva concordancia al demostrar la pérdida de cobertura vegetal para el segundo período. Por ende, la variación de la escorrentía superficial y los cambios en el uso de la tierra entre el primer periodo y el segundo junto la disminución cobertura del suelo actual modificaron la característica relacionada con el rendimiento de sedimentos.

En otras palabras, al disminuir la acción protectora ejercida por la vegetación en un inicio provocó que exista un aumento significativo del impacto de las gotas de lluvia en el suelo, haciéndolo más propenso al suministro de sedimentos a la red de drenaje, dado el consecuente aumento de escorrentía superficial (Kavian et al., 2018). En este ámbito, Veintimilla et al. (2019) argumentaron que los procesos hidrológicos asociados con el uso y manejo de la tierra claramente juegan un papel dominante en la producción y transporte de sedimentos.

Como señala Carvajal y Giráldez (2000), la erosión hídrica representa una gran amenaza ambiental de carácter discontinuo que tiene relación directa a la ocurrencia de lluvias y de la magnitud de los caudales en una cuenca, por lo que plantea la importancia de uso de modelos hidrológicos que abarquen la superficie en estudio para explorar las consecuencias de la erosión. En esta misma línea de investigación Perazzoli et al. (2013) analizaron los efectos de diferentes escenarios de uso del suelo sobre el rendimiento de sedimentos en la cuenca del río Ribeirão Concordia en el estado de Santa Catarina (Brasil) y observó que el escenario agrícola mostró la mayor tasa de producción de sedimentos, lo cual es aproximadamente tres veces mayor que el escenario actual. Lo que permite entender que en el mismo ámbito en el presente estudio la mayor tasa de producción de sedimentos se observa a medida que pasa el tiempo con lo que se asume la existencia de una pérdida progresiva de vegetación.

4.2.2 Análisis de muestras de agua

Los resultados de los análisis de las muestras de agua tomados en la estación hidrológica H0015 Chota Pte. Carretera, se encuentran en la Tabla 17 a partir de la cual se visualizan cuatro parámetros relacionados a los sedimentos en el agua.

Tabla 17. Resultados de los análisis de agua en la estación hidrológica H0015

Meses	Color aparente	Sólidos Totales disueltos	Sólidos Suspendidos Totales	Sólidos Totales	TSS Simulados
	Pt-Co	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Octubre 2020	5	189.00	13.10	237.50	32.34
Noviembre 2020	>50	115.00	307.68	405.00	49.45
Diciembre 2020	>50	95.00	50.30	217.50	54.35
Enero 2021	>50	107.00	21.87	177.50	16.57

Al comparar los datos de sedimentos suspendidos totales medidos para los meses de octubre de 2020 a enero de 2021 con los valores simulados para la subcuenca del río Chota correspondiente a la estación donde se tomaron las muestras (Anexo 2), se obtuvo un valor para el estadístico R^2 de 0.26 y un valor de NSE de -0.13, valores considerados de acuerdo con Moriasi (2008) como insatisfactorios para sedimentos, sin embargo, se recuerda que estos resultados al ser considerados únicamente como indicadores, muestran una marcada tendencia de relación entre los valores medidos en campo con los simulados.

La razón principal por la cual no hubo una relación más intrínseca entre ellos, es que los valores de sólidos totales suspendidos obtenidos del modelo fueron simulados y proyectados con base en los datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación diarios para varios años. Mientras que los valores de sólidos totales suspendidos en campo fueron tomados de forma mensual en solo 4 meses dadas las limitaciones metodológicas observándose un desfase temporal significativo para los resultados.

Ramos et al. (2014), mediante el uso del modelo SWAT simularon la generación de sedimentos a nivel diario en la cuenca del río Negro, para el período 1994-2004, presentando en el proceso de calibración un R^2 de 0.58 para datos simulados diarios y un 0.86 para datos promedios de sedimentos simulados mensualmente, esto demuestra que el modelo tiene ciertas limitaciones al simular entre datos mensuales y diarios pues se indica una reproducción más adecuada a nivel mensual. Por su part, Uzeika et al. (2012) indicó que SWAT presenta restricciones para representar adecuadamente los valores diarios de sedimentos, a diferencia de los mensuales y anuales, que suman los errores diarios y se

compensan entre sí y generan un mejor ajuste con los valores observados, esto nos lleva a deducir que el inconveniente de correlación de los datos en cuestión no se centra en la simulación de datos diarios y mensuales, puesto a que se ha escogido el método que de acuerdo con Ramos et al. (2014) y Uzeika et al. (2012) es más factible, si no, únicamente en las limitaciones metodológicas para el presente estudio.

La comparación de ambos escenarios (ajustado vs real) en cuanto al grado de pérdida de suelo de origen hídrico dejan en evidencia la utilidad de SWAT para cuencas con condiciones de clima variables. Citando a Chagas y Behrends (2018), este análisis de producción de sedimentos es de alta importancia principalmente porque da a conocer la necesidad de la planificación del uso racional e integral en las diferentes escalas de las cuencas hidrográficas sin dejar de lado el grado de vulnerabilidad de estas ya que se ven afectadas en diferente grado por el uso que las poblaciones tienen sobre las tierras.

4.3 Análisis de causas antrópicas de la variación de erosión hídrica de la cuenca media-alta del río Mira

El análisis de la variación de las coberturas y usos de suelo sobre la generación de sedimentos permitió identificar cuáles fueron las causas antrópicas que tuvieron mayor incidencia en la variación de la erosión hídrica de la cuenca media-alta del río Mira, se presentan los resultados de asociación espacial obtenidos para cada categoría mediante el modelo de Regresión Geográfica Ponderada para el periodo 1996-2018.

4.3.1 Regresión Geográfica Ponderada

En la Tabla 18 se observan los valores que se registraron de la asociación espacial de las siete categorías de cobertura y uso de suelo y la variación de erosión hídrica, con énfasis en las subcuencas que registraron los valores más altos de dicha asociación dentro de la cuenca. Las categorías cultivos y pastos representaron mayor correlación con respecto a la generación de sedimentos. Se hace énfasis en que dentro de todas las asociaciones espaciales hubo un nivel de variación de la asociación espacial demasiado bajo entre las subcuencas motivo

por el cual se omitió el uso de cartografía para la representación diferenciada por categorías y solo se hace énfasis en las subcuencas con mayores correlaciones (R^2 local).

Tabla 18. Resultados de datos de correlación espacial para cada categoría

Categoría de cobertura y uso de suelo	Aceptabilidad	R^2	Microcuencas con mayor correlación
Área sin vegetación	Bajo	0.26	M. río Piguchuela (M7)
Bosque	Muy bajo	0.11	M. Baja río Lita (M2), M. río San Francisco (M5)
Cultivos	Alto	0.70	M. Alta río Chota (M14) y M. río Rumichaca (M12)
Pastos	Alto	0.64	M. río Rumichaca (M12)
Páramo	Bajo	0.27	M. Media-baja del río Mira (M1), M. Baja del río Lita (M2), M. río San Francisco (M5) y M. río Lita (M6)
Vegetación arbustiva	Bajo	0.49	M. Media-baja del río Mira (M1), M. Baja del río Lita (M2), M. río San Francisco (M5) y M. río Lita (M6)
Zona Urbana	Bajo	0.39	M. Media del río Chota (M11), M. Baja del río Ambi (M13), M. río Tahuando (M15) y M. Alta del río Ambi (M16)

La categoría área sin vegetación tras el análisis de Regresión Geográfica Ponderada indicó una correlación baja con un R^2 de 0.26. Si bien esta categoría ha aumentado en un 2.60%, ha disminuido en un 0.21% y tiene una persistencia del 0.42% de la superficie, dicha variación no es significativa en relación con la variación de la erosión hídrica.

La Regresión Geográfica Ponderada entre la categoría bosque y la erosión hídrica registró un R^2 de 0.11 que indicó una relación muy baja. Sin embargo, la relación que se presenta es mayor en la microcuenca baja del río Lita (M2) y la microcuenca del río San Francisco (M5), lo cual pudo deberse a que a deforestación representa un problema progresivo que contribuye a la mayor incidencia de erosión en una microcuenca que presente dicha actividad, por lo que la categoría bosque está sujeta a este riesgo por las actividades antrópicas que son productivas para la población (Alvarado, et al., 2007).

Tras el análisis entre la variación de la categoría cultivos y la variación de erosión hídrica se obtuvo un valor R^2 de 0.70 correspondiente a una relación alta, indicando que es la actividad antrópica con mayor incidencia en la generación de sedimentos dentro de la cuenca media-alta del río Mira. en particular dentro de las microcuencas alta del río Chota (M14) y la microcuenca del río Rumichaca (M12). La relación es directa ya que incrementa a medida que aumenta la superficie destinada al desarrollo de la agricultura (Sequeira et al., 2019), dato que se concatena con la transición de otras categorías como bosques, vegetación arbustiva, pastos hacia las zonas agrícolas para estas zonas.

Además, se presentan consecuencias sobre la degradación de los suelos facilitando la erosión hídrica. En este contexto y con base en un estudio realizado por Huerta y Loli (2014) en la cuenca alta del río Moche, Perú señalaron que se debe considerar las características socioeconómicas que se desarrollan en el territorio como los cultivos para poder relacionarlos con procesos de degradación por erosión hídrica, para lo que se debe considerar el inadecuado uso del suelo por las prácticas y la maquinaria que se utilizan en esta actividad (Flores et al., 2013).

De la misma manera, la segunda categoría con mayor relación espacial con la variación de erosión hídrica fue la clase pastos con un valor R^2 de 0.64. Es decir, la superficie de pastos aumentó al igual que la erosión hídrica especialmente en la microcuenca del río Rumichaca o Apaquí (M12), esta actividad corresponde al sector ganadero como consecuencia del aumento de espacios para pastoreo (Echavarría et al. 2020).

En el estudio realizado por Moreira, et al. (2020) en el ámbito del manejo integrado de cuencas hidrográficas, afirman que existe una situación de riesgo para áreas en donde predominan los pastos con un inadecuado manejo. Las consecuencias subyacentes surgen porque se presentan extensiones de pasto degradado y manchas de suelo expuesto que propician el riesgo potencial de erosión y contribuyen de manera elevada en el transporte de sedimentos a zonas bajas de una cuenca.

Por otra parte, la asociación espacial entre la variación de páramo y la variación de erosión hídrica obtuvo un valor R^2 de 0.27, esto se explica porque la cobertura páramo ha ido perdiendo progresivamente superficie en el periodo de estudio con mayor área en las subcuencas de mayor correlación espacial fue al noroeste, correspondientes a las microcuencas: media-baja del río Mira (M1), baja del río Lita (M2), río San Francisco (M5) y río Lita (M6).

En cuanto a la categoría vegetación arbustiva el R^2 obtuvo un valor de 0.49 que correspondió a una relación leve, debido a que en los años de estudio se produjo una pérdida de esta cobertura por la transición hacia cultivos y pastos como se había analizado anteriormente.

En este sentido cuando hay una ausencia de cobertura vegetal que deja sin protección al suelo, se genera un aumento de la escorrentía superficial que desprende partículas de este, entonces, la generación de sedimentos y por consecuencia la erosión hídrica tiende a aumentar en gran proporción. El dato de correlación con las dos variables analizadas concuerda con lo dispuesto por Cueva (2021), quien obtuvo un R^2 para esta categoría de 0.53, de igual manera registra que las microcuencas situadas hacia la zona noroeste de la cuenca media-alta de río Mira, tienen mayor asociación espacial en la variación de erosión hídrica.

Con respecto a la relación entre la variación de la categoría zona urbana y la variación de erosión hídrica se encontró un valor R^2 de 0.39 equivalente a una asociación espacial baja. No obstante, esta categoría registró aumento en superficie en el periodo analizado, dicho aumento es progresivo, pero no significativo dentro de la cuenca media-alta del río Mira. Las mayores asociaciones fueron en las microcuencas: media del río Chota (M11), baja del río Ambi (M13), río Tahuando (M15) y alta del río Ambi (M16).

Como lo afirmaron Vidal y Romero (2010) la expansión de la zona urbana favorece el escurrimiento al no permitir la infiltración del agua en el suelo, provocando un aumento de la escorrentía superficial hacia los cauces y a los niveles más bajos de las cuencas. Dicha situación en conjunción con el aumento

de la capacidad erosiva del suelo por otras actividades antrópicas, representan y generan riesgo ambiental dentro de una cuenca.

En consecuencia, a partir del análisis de correlación espacial, se evidenció que las categorías cultivos y pastos tienen asociación espacial con la variación de erosión hídrica, es decir que el aumento de dichas categorías son las actividades antrópicas que condicionan mayormente la generación de sedimentos y aumentan la erosión hídrica de la zona.

Según Córdova y Gómez (2021) en su estudio propusieron que las causas sociales tiene incidencia en el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Mira, el factor más significativo del aumento de cultivos es el crecimiento económico y la actividad que impulsa dicho factor es la demanda de productos agrícolas, de igual manera plantean para la expansión de pastizales relacionados con la ganadería que este incremento tiene un eje en el crecimiento económico dentro de la cuenca, impulsada por la demanda de lácteos, carne y aumento de espacios para pastoreo.

Por lo tanto, las actividades socioeconómicas para satisfacer las demandas de la población influyen directamente en el cambio de uso de suelo y en consecuencia en el aumento de la erosión hídrica, es por ello necesario la implementación de estrategias de planificación y manejo de las cuencas hidrográficas relacionando el factor social, económico y ambiental del territorio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las categorías de uso del suelo presentan una variación dentro del período 1996-2018 al demostrar un aumento de las coberturas de área sin vegetación, cultivos, zona urbana y pastos, mientras que las coberturas naturales como bosque, vegetación arbustiva y páramo, disminuyen. El modelo SWAT calibra y valida satisfactoriamente los caudales de la estación hidrológica H0011 respaldado de los estadísticos R^2 , NSE y PBIAS lo que simboliza una alta eficacia para poder simular caudales y sedimentos de la estación en años posteriores. La erosión hídrica dentro de la cuenca se categoriza como una erosión moderada con un valor de 34.18 t/ha/año.

La mayor producción de sedimentos se da en las microcuencas Media-Baja del río Mira y Media del río Mira para ambos períodos de estudio. La proyección de la generación de dichos sedimentos a 2021 comprueba la existencia de una relación directamente proporcional entre la producción de caudales y la generación de sedimentos en la cuenca, esto se corresponde con la pérdida de cobertura vegetal natural para el segundo período.

Se demuestra que las actividades antrópicas relacionadas con la expansión de la frontera agrícola y ganadera (cultivos y pastos) se han establecido como las principales causas que influyen directamente en el aumento de la erosión hídrica y en la generación de sedimentos en la cuenca media-alta del río Mira. Además, estas actividades tienen como eje el crecimiento económico de la población, sin embargo, producen la pérdida de cobertura vegetal y degradación de la calidad ambiental. De esta manera, se constata que la generación de sedimentos en la cuenca media-alta del río Mira tiene relación con el cambio de uso de suelo principalmente debido a la expansión de la frontera agrícola.

5.2 Recomendaciones

Realizar nuevas investigaciones en la cuenca media-alta del río Mira que amplíen el rango de tiempo en la toma de datos dentro del área para analizar los cambios perpetuados y corroborar la eficacia del modelo SWAT en el análisis de la generación de sedimentos como una herramienta para la toma de decisiones y contribuir a la generación de estrategias de planificación sustentable para la protección de la cuenca hidrográfica.

Implementar estrategias de prevención como zanjas de infiltración, barreras verdes y evitar los monocultivos, todas ellas con sus respectivos planes de acción ambiental, seguimiento y evaluación de manejo, uso de suelo y recurso hídrico que rijan en la cuenca con trabajo cooperativo entre los GAD's provinciales, parroquiales y cantonales con enfoque en el aprovechamiento de las tierras cultivables y no cultivables de la cuenca media-alta del río Mira a fin de incrementar la producción y mantener el equilibrio ecológico.

Para propiciar la conservación de coberturas naturales como bosque, vegetación arbustiva y páramo y para disminuir la erosión hídrica por la generación de sedimentos, se propone condicionar el cambio de uso de suelo en la cuenca media-alta del río Mira mediante la emisión de una ordenanza que restrinja la expansión de territorio para cultivos y pastos desde los 2900 m s.n.m y que prohíba dichas actividades a partir de los 3400 m s.n.m.

REFERENCIAS

- Abad, K. (2020). El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 68–91. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.4>
- Abbaspour, K. (2015). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. In *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery* (Vol. 130, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s00402-009-1032-4>
- Aguilar, H., Mora, R., y Vargas, C. (2015). Atmospheric Correction Methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53). <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Almaguer, Y., y Guarado, R. (2006). Tipología de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa. *Minería y Geología*, 22(1). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223517653001>
- Altamirano, M. (2013). *Estudio hidroquímico y de calidad del agua superficial en la cuenca del río Mira* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/1711/1/T-UCE-0017-45.pdf>
- Alvarado, M., Colmenero, J., & Valderrábano, M. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14 (3): 317-326. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10414309.pdf>
- Ambrosio, G., González, J., y Arévalo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. *X Congreso de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, September*, (9). <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>
- Andrade, M., Mello, C., y Beskow, S. (2013). Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Ríó Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,

17(1), 69–76. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662013000100010>

- Audigier, R., y Alencar, R. (2010). Relationships between some watershed definitions and their tie-zone transforms. *Image and Vision Computing*, 28(10), 1472–1482. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2009.11.002>
- Balbontin, C., Odi-Lara, M., Poblete, R., Garrido-Rubio, J., Campos, I., y Calera, A. (2016). Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. *Boletín INIA N°335.*, 50. <http://agronomia.uc.cl/proyectos/290-herramientas-de-teledeteccion-para-el-manejo-del-riego/file>
- Ballesteros, T., y Ñacato, V. (2020). Análisis de la deforestación en la erosión hídrica del suelo y sedimentación de la microcuenca del Río Blanco, Carchi. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10583>
- Barrios, A., y Urribarri, L. (2010). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 11–29. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730384002>
- Boca, T., y Rodríguez, G. (2012). Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 11. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_mtodos_est__sensores.pdf
- Briones, A., Uche, J., y Martínez, A. (2019). Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 233(1), 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.068>
- Calvache, M. (2014). *El suelo y su productividad en la sierra agrícola del Ecuador*. May, 1–21. https://www.researchgate.net/profile/Angel_Calvache_Ulloa/publication/303298014_EL_SUELO_Y_LA_PRODUCTIVIDAD_AGRICOLA_EN_LA_SIERRA_DEL_ECUADOR/links/573b6c8108ae298602e456a1/EL-

SUELO-Y-LA-PRODUCTIVIDAD-AGRICOLA-EN-LA-SIERRA-DEL-
ECUADOR.pdf

- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (Tercera).
<https://cutt.ly/tfIzc9Z>
- Cañadas, L. (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador* (MAG-
PRONAREG (ed).
https://books.google.com.ec/books/about/El_mapa_bioclimático_y_ecológico_del_E.html?id=8aRcAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Carmona, A. (2007). *Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo SWAT y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente* [Tesis de maestría].
Universidad Central. <https://cutt.ly/XTxpWEj>
- Carofilis, N. (2018). Urbanization and nature in the delta. 3 critical episodes of the transformation of the Guayas river delta (Ecuador). *Estudios Del Habitat*, 16(2).
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/71950/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Castaño, S. (1999). Aplicaciones de la teledetección y SIG al control y cuantificación de las extracciones de agua subterránea. *Medida y Evaluación de Las Extracciones de Agua Subterránea*, 29, 125–141.
<http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart2/aplicacion.pdf>
- Castella, C., Pheng Kam, S., Dinh Quang, D., Verburg, P. H., y Thai Hoanh, C. (2007). Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 24(3), 531–545.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.09.009>
- Castillo, C., y Ortega, N. (2009). *Modelación hidrológica de microcuencas de montaña usando el modelo hidrológico Swat*. [Tesis de pregrado].
Universidad de Cuenca.

- Carvajal, R. y Giráldez, C. (2000). Producción de sedimentos en una cuenca con un sistema de información geográfica. El sistema Cubillas-Colomera. *Ingeniería del Agua*, 7(3): 225-235.
- Chagas, C. y Behrends, F. (2018). *Escurrimiento, erosión del suelo y contaminación de los recursos hídricos superficiales por sedimentos asociados a la actividad agropecuaria extensiva: algunos elementos para su análisis Ciudad Autónoma de Buenos Aires*: Editorial Facultad de Agronomía
- Choque, B. (2015). *Identificación de los factores determinantes en la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís, cuenca del río Reventazón, Costa Rica* [Tesis de maestría]. Centro Agronómico Tropical De Investigación Y Enseñanza, Turrialba.
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). Quito, Ecuador: Registro Oficial-Suplemento 983, de 12 de abril de 2017. <https://cutt.ly/sTxpISZ>
- Constitución Política de la República del Ecuador. (2008). Registro Oficial 449 de 20 de octubre de 2008. Reformas en Registro Oficial-Suplemento de 13 de julio de 2011. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Convención Internacional de la Lucha contra la desertificación en los países afectados por la sequía grave o desertificación, en particular África. (1994). Asamblea General, Organización de las Naciones Unidas. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-08/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf
- Córdova, D. y Gómez, J. (2021). Evaluación de las causas sociales y efectos ambientales del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Mira. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10845/2/03%20RNR%20375%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Correa, P., Vélez, J., Smith, R., Vélez, A., Barrientos, A., y Gómez, J. (2006). Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del Bajo Sinú. *Avances*

En Recursos Hidráulicos, 14(3), 71–86.

- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83(1), 5-71. http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero_articulo?codigo=2875596&orden=0
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, A., Carrillo, F., y Téllez, J. (2015). Morphometric analysis of the Cuale river watershed, Jalisco, Mexico. *Investigación y Ciencia, Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 64, 26–34. <https://cutt.ly/qTxpCp6>
- Cruz, E., Chela, E., Monar, C., Valverde, F., y Cartagena, Y. (2010). Evaluación de la pérdida productiva y económica por la erosión hídrica en tres sistemas de producción en la microcuenca del río alumbre, provincia Bolívar, Ecuador. *XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo*, 1(1), 17–19. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/13.-Elena-Cruz.-Erosion.-INIAP-EESC-Ecuador.-CAMBIAR-ARTICULO.pdf>
- Cueva, N. (2021). *Efectos del cambio de uso de suelo en la erosión de la cuenca alta del río Mira para el periodo 1996-2017*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10837/2/03%20RNR%20373%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31 (3): 80-90.
- Díaz, R., y Bustamante, D. (2007). Caso 5: La teledetección como herramienta en la cartografía de especies invasoras: Azolla filiculoides en Doñana. *Teledetección*, 159–163.
- Echavarría, F., Medina, G. y Ruiz, J. (2020). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de

- lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, *México*, 11 (2).
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4694>
- Edmunds, W. (2009). Geochemistry's vital contribution to solving water resource problems. *Applied Geochemistry*, 24(6), 1058–1073.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.02.021>
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, A., Machette, M., Costa, C., y Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. *A project of the international Lithosphere Program Task Group II-2*, 77.
- Ekbladh, D. (2002). Mr. TVA': Grass-Roots Development, David Lilienthal, and the Rise and Fall of the Tennessee Valley Authority as a Symbol for U.S. Overseas Development, 1933–1973. *Diplomatic History*, 26(3), 335–374.
<https://doi.org/10.1111/1467-7709.00315>
- Endara, R. (2018). *Efectos de la deforestación en la producción de caudales en la Cuenca Media Alta del Río Mira para el período 2000-2014* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8459>
- Escalante, T., Balaguer, E., Soberón, J., y Espinoza, D. (1997). Bases de Datos y Sistemas de Información: Aplicaciones en Biogeografía. *Biogeografía*, 24(92), 325–341. http://www.google.com/webhp?source=search_app
- Espinosa, M., Andrade, E., Rivera, P. & Romero, A. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, (53-54): 77-88.
- Espinosa, J. (2008). Distribucion, uso y manejo de los suelos de la Region Andina. *La Ciencia Del Suelo y La Conservación Ambiental*, 1–10.
<http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-Dr.-Jose-Espinosa.pdf>
- FAO. (2006). Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management. In *FAO Forestry Paper 147*.
<https://doi.org/ISBN 92-5-105481-9>

- FAO. (2015). Effects of land-use changes on soil properties: volcano watershed in Quito, Ecuador. *Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils*, 95–97. https://www.researchgate.net/publication/280594233_Effects_of_land-use_changes_on_soil_properties_volcano_watershed_in_Quito_Ecuador
- Farfán, M., Rodríguez, G., y Mas, F. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas*, 90, 89–104. <https://doi.org/10.14350/rig.48600>
- Fernández de Villarán, R. (2017). Utilización del programa SWAT para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. *Trim*, 12(1), 21-32. http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Fernández, P. y Loli, O. (2014). Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche. *Ecología Aplicada*, 13 (1): 15-22. <https://www.redalyc.org/pdf/341/34131158002.pdf>
- Fierro, K. (2019). *Zonificación hidrológica de la cuenca del río Mira utilizando herramientas SIG: provincias de Carchi, Imbabura y Esmeraldas, Ecuador* [Tesis de maestría]. Universidad de Salzburg. https://issuu.com/unigis_latina/docs/tesis_fierro_diaz
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Valarezo, C., Zech, W., y Knoblich, K. (2006). Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: Experimental and modelling approach. *Hydrological Processes*, 20(12), 2491–2507. <https://doi.org/10.1002/hyp.6212>
- Fleiss, J., y Cohen, J. (1973). The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability. *Educational and Psychological Measurement*, 33(3), 613–619. <https://doi.org/10.1177/001316447303300309>
- Flores, H., de la Mora, C., Ruiz, J. y Chávez, A. (2013). Efecto de la cobertura de

suelo de tres cultivos sobre la erosión hídrica. *Revista Chapingo Sere Zonas Áridas*, 12 (1): 19-25.
<https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545056004.pdf>

Fotheringham, A., Charlton, C. y Brunson, C. (2014). Geographically weighted regression with a non-Euclidean distance metric: A case study using hedonic house price data. *International Journal of Geographical Information Science*, 28, 660–681.

Galarraga, J. (2018). *Estudio geológico y tectono-estratigráfico del relleno volcánico-sedimentario de la ciudad de Ibarra y sus alrededores* [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19391/1/CD-8777.pdf>

Gallart, F., Latron, J., Llorens, P., y Rabada, D. (1997). Hydrological functioning of mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 11(9), 1263–1272.
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199707\)11:9<1263::aid-hyp556>3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199707)11:9<1263::aid-hyp556>3.0.co;2-w)

García, E., y Llellish, M. (2012). Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. *Revista de Teledetección*, 38, 92–108. <https://n9.cl/4inj7>

Gavilánez, M., González, M., González, V., Fierro, S., Llerena, S., y Hidalgo, I. (2017). Evaluación de la erosión física y química del suelo en la zona noroccidental de la provincia Bolívar-Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuaria*, 2(2), 13–20.
<http://dx.doi.org/10.31164/reiagro.v2n2.2>

Gillet, F. (2008). Modelling vegetation dynamics in heterogeneous pasture-woodland landscapes. *Ecological Modelling*, 217(1), 1–18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.013>

Gleick, P. (1999). The World's Water 1998–1999; The Biennial Report on Freshwater Resources. *Journal of Hydrology*, 222(1–4), 192–193.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00094-3)

- Glenn, E., Neale, C. M., Hunsaker, D., y Nagler, P. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, 25(26), 4050–4062. <https://doi.org/10.1002/hyp.8392>
- González, M. (2017). *Impacto Del Cambio De Uso Del Suelo En Las Áreas Productoras De Agua De La Cuenca Del Río Magdalena, Cantón Cotacachi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <https://doi.org/1541-8561>
- González, M., Retamoza, J., Albores, R., y Guerrero de León, A. (2016). Gestión integral de cuencas hidrográficas: una alternativa a la sustentabilidad de los recursos hídricos en México. *Lacandonia*, 10(1), 91–98. <https://bit.ly/2FpunPj>
- Graf, W. H. (2006). Erosion and sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 25(5), 554–555. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0739429\(1999\)125:5\(554\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0739429(1999)125:5(554))
- Green, C. H., Tomer, M. D., Di Luzio, M., y Arnold, J. G. (2002). Hydrologic Evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a Large Tile-Drained Watershed in Iowa. *Transactions of the ASABE*, 49(02), 413–422. <https://doi.org/10.13031/2013.20415>
- Guachamín, W., Cadena, J., Carvajal, J., y García, F. (2015). *Mapa de escurrimiento*. http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DEL_MIRA.pdf
- Guevara, M., y Montalvo, R. (2014). Cambio de uso de suelo y vegetación derivados de la dotación de infraestructura: Sierra norte del Estado de Puebla. *Nova Scientia*, 7(13), 314. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000100017&lng=es&tlng=es
- Guillén, C., Vel, M., y Dávila, M. (2015). Aplicación de teledetección y SIG para el levantamiento cartográfico de los suelos de la cuenca Solani, India.

Revista Geografica Venezolana, 56(2), 185–204.
<https://www.redalyc.org/pdf/3477/347743079003.pdf>

Gutiérrez, J., Ruiz, E., Jaraiz, F., y Pérez, J. (2013). Diseño de un modelo de asignación de viajes con aplicaciones SIG para la gestión de planes de movilidad urbana sostenibles en ciudades medias. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 0(13), 12–21.
http://www.miramón.uab.cat/geofocus_ojs/index.php/geofocus/article/view/259/0

Guzmán, I. (2007). Recursos hídricos en América Latina: planificación es la estrategia. *Tecnología En Marcha*, 21(1), 161–173.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835682.pdf>

Halliday, B., Matthews, T., Iervasi, D., Dodemaide, D., Pickett, P., Linn, M., Burns, A., Bail, I., y Lester, R. E. (2015). Potential for water-resource infrastructure to act as refuge habitat. *Ecological Engineering*, 84, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.020>

Harden, C. (1992). A new look at soil erosion processes hillslopes in highland Ecuador. *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, 209(12), 77–85. http://hydrologie.org/redbooks/a209/iahs_209_0077.pdf

Harden, C., y Scruggs, P. (2003). Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, 55(1-4), 5-24.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00129-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00129-6)

Harlin, J. (1984). Watershed morphometry and time to hydrograph peak. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), 141–154. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90238-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90238-5)

Hasan, M. M., y Wyseure, G. (2018). Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador. *Water Science and Engineering*, 11(2), 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.07.002>

Heijkers, J., y Van, J. (2011). *Hydrological models*. Apuntes de hidrología: Curso de grado de Ingeniería Civil. <https://doi.org/10.4324/9781936331413>

- Henry, A., Mabit, L., y Jaramillo, R. (2013). Land use effects on erosion and carbon storage of the Río Chimbo watershed, Ecuador. *Plant Soil*, 367, 477–491. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1478-y>
- Horna, L. (2016). *Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la Zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair* [Tesis de pregrado]. Coca Codo Sinclair. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15064>
- Huerta, P., y Loli, O. (2014). Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche. *Ecología Aplicada*, 13(1), 15-22. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162014000100002&lng=es&nrm=iso
- Hurtado, J., y Yáñez, D. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del Río Las Juntas. *Revista Geoespacial*, 12, 106–122. <https://bit.ly/3kmttIs>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2011). *Estudio Hidrológico Mira -05*. https://issuu.com/inamhi/docs/estudio_hidrologico_mira-05/6
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). Red de Estaciones Automáticas Hidrometeorológicas. <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). *Boletín hidrológico de registro histórico* (Issue February). <https://doi.org/10.37700/0033-2909.I26.1.78>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *Censo de Población y Vivienda-Base de datos*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Libros/Memorias/memorias_censo_2010.pdf
- Jácome, G. (2016). *Aplicación del modelo SWAT en la microcuenca del río Bobo en tres escenarios para la estimación de caudales y sedimentos, provincia del Carchi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio en línea Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5849/2/ARTICULO.pdf>

- Jácome, G. (2017). *Propuesta de gestión de los conflictos socioambientales generados por el agua de consumo humano dentro de la microcuenca de la Laguna de Yahuarcocha* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio en línea Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6924>
- Jácome, G., Vilela, P., y Yoo, C. (2019). Social-ecological modelling of the spatial distribution of dengue fever and its temporal dynamics in Guayaquil, Ecuador for climate change adaption. *Ecological Informatics*, 49, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.11.001>
- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí, I., y Pupiales, N. (2020). *Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico*. Imbabura-Ecuador. FICAYA Emprende.
- Jadán, O., Cedillo, H., Pedro, Z., Quichombo, P., Peralta, A., y Vaca., C. (2016). Relación entre deforestación y variables topográficas en un contexto agrícola ganadero, cantón Cuenca. *Bosques Latitud Cero*, 6(1), 235-246. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/179>
- Kavian, A., Mohammadi, M., Gholami, L., Comino, R. (2018). Assessment of the Spatiotemporal Effects of Land Use Changes on Runoff and Nitrate Loads in the Talar River. *Water*, 10, 45. <http://doi:10.3390/w10040445>
- Kipf, T., y Welling, M. (2016). Semi-supervised classification with graph convolutional networks. *Conference Track Proceedings*, 1–14. <https://arxiv.org/pdf/1609.02907.pdf>
- Laino, R., Bello, R., González, M., Ramírez, N., Jiménez, F., y Musálem, K. (2015). Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 61-74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400004&lng=es&nrm=iso
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos y Aprovechamiento del Agua. (2014). Quito, Ecuador: Registro Oficial-Segundo Suplemento 305, de 06 de agosto de 2014. <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf

- Llorente, M., Díez, A., y Laín, L. (2013). *Actas de Las I Jornadas Técnicas SIGTEFOR*, 29, 29–37.
http://transit.gencat.cat/web/.content/documents/seguretatiaria/pesv_2014_2020.pdf
http://interior.gencat.cat/web/.content/home/010_el_departament/plans_i_actuacions/pla_general_de_seguretatiaria_de_catalunya/docs/pla_seguretatiaria_de_catalunya.pdf
- Loaiza, J. C., y Valentin, R. N. (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales. Caso de estudio para vertientes de alta montaña. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 23–31.
- López, V., Balderas, M., Chávez, M., Juan, J., y Gutiérrez, J. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *CIENCIA ergo-sum*, 22(2), 136-144.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000300008
- López, I., y Fernández, P. (2001). Medidas de concordancia: el índice de Kappa. *Cad Aten Primaria*, 6, 169–171.
<https://www.fisterra.com/mbe/investiga/kappa/kappa.asp>
- Lucero, L. L. (2018). *Estudio hidrológico y balance para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchpia, Casanare* (Vol. 10, Issue 2). Universidad Católica de Colombia.
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Manual de Manejo de Cuencas, Módulo I*.
http://www.colsan.edu.mx/investigacion/aguaysociedad/proyctogro2/Biblioteca/Bibliografia/M%F3dulo4/manual_manejo_de_cuencas_modulo_1%5B1%5D.pdf
- Magaña, F., Bâ, K., y Guerra, V. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739–752.

- Maroneze, M. M., Zepka, L. Q., Vieira, J. G., Queiroz, M. I., y Jacob-Lopes, E. (2014). A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Martínez, Y., y Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha05118.pdf>
- Meneses, G. A. (2017). *Modelamiento del servivio ecositémico de suministro hídrico ante un escenario prospectivo de minería en la microcuenca del río Chalguayacu, Cotacachi-Imbabura*. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.51.6.1173>
- Molle, F., Wester, P., y Hirsch, P. (2010). River basin closure: Processes, implications and responses. *Agricultural Water Management*, 97(4), 569–577. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.01.004>
- Moreira, A., Mirandola, P., Luiz, A., Salinas, E. y De Oliviera, I. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de usoy cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29 (1): 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>.
- Morejón, Y., Vega, M., Escarré, A., Peralta, J., Quintero, A., y Gonzáles, J. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 94–108.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., y Veith, T. (2008). Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 500(3), 885-900.
- Muller, G., y Forstner, U. (1968). General Relationship between Suspended Sediment Concentration and Water Discharge in the Alpenrhein and some other Rivers. *Nature*, 220(5156), 862–863. <https://doi.org/10.1038/217244a0>
- Muñoz, J., Morante, J., y Miranda, P. (2014). Erosión potencial por reconversión

- productiva en subcuenca Llay-Llay. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 321–335.
https://uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2_en_construccion2.pdf
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Neitsch, S., Arnold, J., y Kiniry, J. (2005). Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica. *Agricultural Research Service*, 415.
- Noni, G., y Trujillo, G. (1999). La erosión actual y potencial en Ecuador: Localización, Manifestaciones y causas. *Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica*, 6(14), 5–14.
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-01/23658.pdf
- Nouban, F., y Abazid, M. (2018). Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated. 68–74. <https://doi.org/10.1088/1755-1315>
- Ochoa, P. A., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J. I., Ruíz, J., y Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140, 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>
- Oñate-Valdivieso, F., & Aguilar-Naranjo, G. (2009). *Aplicación del Modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca Alta Del Río Catamayo* [Tesis de grado]. Universidad Técnica Particular de Loja.
<https://bit.ly/3kmBzdL>
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque-Sendra, J., Sastre-Merlin, A., y Ponce, V. M. (2016). Calibration, validation and evaluation of a lumped hydrologic model in a mountain area in Southern Ecuador. *Agrociencia*, 50(8), 945–963. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30249305001.pdf>
- Ordenanza para la creación del “Fondo de Agua y Desarrollo responsable de la Provincia de Imbabura”. (2019). Ibarra, Ecuador. Registro Oficial de 18 de enero de 2019.
<https://www.imbabura.gob.ec/index.php/biblioteca/file/208-ordenanza-ref-nro-01-2019?tmpl=component>

- Ordenanza que crea el Área de Conservación y uso Sustentable provincial a la Cordillera Oriental del Carchi. (2015). Tulcán, Ecuador. <https://condesan.org/recursos/ordenanza-la-creacion-del-area-conservacion-uso-sustentable-la-cordillera-oriental-del-carchi/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2007). *Servicios de las cuencas hidrográficas*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2010). *Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América latina y el Caribe*. Documento Técnico N° 22.
- Ortega, F., Parra, G., y Guerrero, F. (2006). Usos del suelo en las cuencas hidrográficas de los humedales del Alto Guadalquivir: Importancia de una adecuada gestión. *Limnetica*, 25(3), 723–732. <https://core.ac.uk/download/pdf/33158146.pdf>
- Ortiz, A., Ruiz, M., y Rodríguez, J. (2017). Planificación y gestión de los recursos hídricos: una revisión de la importancia de la variabilidad climática. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), 100–105. <https://www.redalyc.org/pdf/5177/517754057010.pdf>
- Orúe, E., Laterra, P., y Cabria, F. (2007). Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el Modelo Usle con apoyo de SIG. *Teledetección*, 185–192. <http://dns2.aet.org.es/congresos/xii/arg24.pdf>
- Pacheco, H. A., Méndez, W., y Moro, A. (2019). Soil erosion risk zoning in the ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal*, 23(4), 293–302. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.71706>
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., y Meusburger, K. (2016). Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *Catena*, 137, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.015>
- Parveen, R., y Kumar, U. (2012). Portrait of Byron. *Journal of Geographic*

Information System, 4(1), 588–596. <https://doi.org/10.1093/nq/s4-IV.102.520-a>

Perazzoli, M., Pinheiro, A., y Kaufmann, V. (2013). Efeitos de Cenários de uso do solo o regime hídrico e produção de sedimentos na Bacia do Riberao Concórdia-SC. *Revista Árvore*, 37(5), 859-869.

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). Plan Nacional de desarrollo 2017-2021. Quito, Ecuador. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-desarrollo-2017-2021-toda-una-vida-de-ecuador#:~:text=El%20%22Plan%20Nacional%20de%20Desarrollo,Los%20derechos%20constitucionales>

Peces, J., Plaza, N., Tejeiro, J., Villa, G., y Domenech, E. (2009). *Tratamientos y aplicaciones del Plan Nacional de Teledetección*. September, 1–4. <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal130.pdf>

Peña, F., Gutiérrez, Patricia Rebolledo, Gonzalo Escalona, Miguel Hauenstein, Enrique Bertrán, C., Roberto, S., y Tapia, J. (2006). Determinación del nivel de antropización de humedales como criterio para la planificación ecológica de la cuenca del lago Budi. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36, 75–91. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200005>

Pijal, A. (2015). *Efecto de estructuras conservacionistas en la recuperación de suelos degradados de la cuenca media del río Mira* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital de la Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6929>

Pokhrel, B. (2018). Impact of Land Use Change on Flow and Sediment Yields in the Khokana Outlet of the Bagmati River, Kathmandu, Nepal. *Hydrology*, (5). <http://doi:10.3390/hydrology5020022>

Portillo, J. (2005). Determinación de Usos del Suelo mediante análisis multitemporal de imágenes Landsat en los Oasis de la Provincia de Mendoza. *EcoAtlas*, 13. <http://www.ecoatlas.org.ar/unidades/suelo/valle.pdf>

Preti, F., y Petrone, A. (2013). Soil bio-engineering for watershed management

- and disaster mitigation in Ecuador: A short-term species suitability test. *Forest*, 6, 95–99. <https://doi.org/10.3832/ifor0636-006>
- Radwan, F., Alazba, A., y Mossad, A. (2017). Watershed morphometric analysis of Wadi Baish Dam catchment area using integrated GIS-based approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(12). <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3046-5>
- Rajat, P. (2021). Calibration of hydrological models considering process interdependence: A case study of SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105131>.
- Ramakrishna, B. (1997). *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias*. Instituto Iberoamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://cutt.ly/tfIzc9Z>
- Ramos, I., Bauer, G., y Dos Santos, I. (2014). Simulation of hydrosedimentological impacts caused by climate change in the Apucarantina River watershed, southern Brazil. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 367(2013), 366–373. <https://doi.org/10.5194/piahs-367-366-2015>
- Reglamento a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. (2015). Decreto Ejecutivo 650. Quito, Ecuador. Registro Oficial-Suplemento 483, de 20 de abril de 2019. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Reglamento-Ley-Recursos-Hidricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. (2019). Decreto Ejecutivo 752. Quito, Ecuador. Registro Oficial-Suplemento 507, de 12 de junio de 2019. https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2019-09/Documento_RCOA%20RO%20507.pdf
- Rey, J. (1993). Perspectivas de la teledetección en investigaciones ecológicas. *Revista de Teledetección: Revista de La Asociación Española de Teledetección*, 2, 1–5. http://www.aet.org.es/revistas/revista2/AET2_4.pdf

- Rhoades, C., Eckert, G., y Coleman, D. (2000). Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower montane Ecuador. *Ecological Applications*, 10(2), 497–505. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0497:SCDAFA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0497:SCDAFA]2.0.CO;2)
- Ribeiro, K. H. (2009). *Qualidade Da Água Superficial E a Relação Com O Uso Do Solo e Componentes Ambientais Na Microbacia Do Rio Campestre, Colombo*.
https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24091/disserta_karina_final_pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez, J., Bolaños, S., y García, C. (2014). Software engineering as a vehicle for water resources environmental planning. *Tecnura*, 18(SPE), 150–159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.DSE1.a13>
- Rogan, J., y Chen, D. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*, 61(4), 301-325. [http://10.0.3.248/S0305-9006\(03\)00066-7](http://10.0.3.248/S0305-9006(03)00066-7)
- Romero, S., y Romero, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24, 13-41. <https://www.redalyc.org/pdf/494/49402403.pdf>
- Rosales, O. (2020). *Aplicación del modelo RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión hídrica* [Tesis de maestría]. Universidad de Salzburg. https://issuu.com/unigis_latina/docs/tesis_rosales2
- Rorke, B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(2), 385-415. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00105-1)
- Ruales, M. D. N. (2019). *Efectos del cambio del uso del suelo sobre el servicio ecosistémico hídrico de provisión en la microcuenca del río Itambi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital de la Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9253>
- Sabins, F. (1987). *Remote sensing: Principles and interpretation*. WH Freeman

- and company.* (WH Freeman and company (ed.)).
<http://hdl.handle.net/1969.3/24553>
- Sadeghi, S. H. R., Jalili, K., y Nikkami, D. (2009). Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26(2), 186–193.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.02.007>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. Quito, Ecuador.
- Sequeira, N., Vázquez, P. y Sacido, M. (2019). Erosión Hídrica y su relación con el avance de la agricultura en el sudeste Bonaerense, Argentina. El caso del partido de Benito Juárez durante las campañas 1989/90, 2002/03 y 2014/15. *Papeles de Geografía*: 106-120. DOI:
<http://dx.doi.org/10.6018/geografia.395691>
- Shen, Y., Cao, H., Tang, M., y Deng, H. (2017). The human threat to river ecosystems at the watershed scale: An ecological security assessment of the songhua river basin, Northeast China. *Water (Switzerland)*, 9(3), 219–231. <https://doi.org/10.3390/w9030219>
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Torres, E., Mejía, E., Cortés, J., Palacios, E., y García, E. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*, 39(5), 481–490.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239501>
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. *International Center for Tropical Agriculture (CIAT)*, 1–47.
<https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- United States Geological Survey. (2005). *The water cycle*. Water Science School.
[https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects=0)

science_center_objects

- Uzeika, T., Merten, G., Minella, J., y Moro, M. (2012). Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(2), 557-565. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200025>
- Valenzuela, P. (2005). *Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro*. Escuela Politécnica del Ejército.
- Valverde, E. (2018). *Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prisia, Parque Nacional Volcán Irazú* [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio Digital Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10335>
- Veintimilla, J., De Meyer, A., Cattrysse, D., Tacuri, E., Vanegas, P., Cisneros, F., y Van, J. (2019). MILP for Optimizing Water Allocation and Reservoir Location: A Case Study for the Machángara River Basin, Ecuador. *Water*, 11(5), 10-15. <https://doi.org/10.3390/w11051011>
- Vidal, C. y Romero, H. (2020). *Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalén sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118084/EfectosAmbientalesde.pdf?sequence=1>
- Villacrés, C. (2015). *Modelamiento de la microcuenca del río del Alumbre con la utilización del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool-Swat, Bolívar* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7815/1/T-UCE-0004-65.pdf>
- Villegas, J. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-

vegetación para el Departamento de Antioquia. *Análisis Del Conocimiento En La Relación Agua-Suelo-Vegetación Para El Departamento de Antioquia*, 1(1), 73–79. <https://doi.org/10.24050/reia.v1i1.125>

Wang, Q., Xu, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Xiang, J., Xu, Y., y Wang, J. (2020). Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 236(163). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104805>

Wang, Z., y Hu, C. (2009). Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research*, 24(4), 369–384. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60011-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60011-X)

Zárate, Ó. (2010). Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en cuencas con características extremas—Cuencas de los ríos Taquiña y Tolomosa. *Revista Acta Nova*, 4(4), 568–577. <http://ucbconocimiento.ucbca.edu.bo/index.php/ran/article/download/707/674>

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de las muestras de agua

Anexo 1.1. Análisis de muestra de agua del mes de octubre



LABORATORIO EMAPA-I

INFORME DE ENSAYO		FIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IECE20-334		Pág. 1 de 2
<p>Cliente: Daniela Villarreal</p> <p>Dirección: La Victoria</p>		
<p>Fecha de recepción: 26 de octubre de 2020</p> <p>Identificación muestra cliente: H013</p> <p>Tipo de muestra: Agua Cruda</p>		<p>Toma de muestra realizada por: El cliente</p>
<p>Código de Laboratorio: MEC20-026</p> <p>Fecha de realización de ensayos: 26 - 27/10/2020</p>		<p>Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I</p> <p>Fecha de emisión informe: 29 de octubre de 2020</p>

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	incertidumbre expandida con K=2	(1) CRITERIO DE CALIDAD
			COD. LAB. MUESTRA		
Color aparente (*)	Standard Methods 2120B	Pt-Co	10	N/A	-
Sólidos Totales disueltos (*)	Standard Methods 2510B	mg/l	307	N/A	-
Sólidos Totales (*)	Standard Methods 2540B	mg/l	387,5	N/A	-
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	32,10	N/A	-

Condiciones Ambientales de Análisis				
Área	Temperatura (C°)		Humedad (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Físicos	26,2	27	38	38
Químicos	-	-	-	-
Microbiológicos	-	-	-	-

INCERTIDUMBRE DE LOS RESULTADOS

La incertidumbre expandida de los resultados se ha estimado con un factor de cobertura K=2 que corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%

OBSERVACIONES:

N/A: No aplica

**INFORME DE ENSAYO**FIIR 7.8-01
Revisión 02

Informe de Ensayo Nro: IECE20-334

Pág. 2 de 2

CONSIDERACIONES:

Los ensayos marcados con (*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018


El laboratorio no emite declaraciones de conformidad

Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

¹Valores de referencia

Revisado por 

Bq. Carla Valarezo

JEFE DE LABORATORIO

Anexo 1.2. Análisis de muestra de agua del mes de noviembre



LABORATORIO EMAPA-I

INFORME DE ENSAYO		FIIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IECE20-395		Pág. 1 de 2
Cliente: Daniela Villarreal Dirección: La Victoria		
Fecha de recepción: 04 de Diciembre del 2020 Identificación muestra cliente: H015 Tipo de muestra: Agua Cruda		Toma de muestra realizada por: El cliente
Código de Laboratorio: MEC20-028 Fecha de realización de ensayos: 04-08/12/2020		Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I Fecha de emisión informe: 10 de Diciembre del 2020

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	Incertidumbre expandida con K=2	⁽¹⁾ CRITERIO DE CALIDAD
			MEC20-028		
Color aparente (*)	Standard Methods 2120B	Pt-Co	>50	N/A	-
Sólidos Totales disueltos (*)	Standard Methods 2510B	mg/l	115	N/A	-
Sólidos Totales (*)	Standard Methods 2540B	mg/l	405	N/A	-
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	307,68	N/A	-

Condiciones Ambientales de Análisis				
Área	Temperatura (C°)		Humedad (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Físicos	23,7	24,4	50	49

INCERTIDUMBRE DE LOS RESULTADOS

La incertidumbre expandida de los resultados se ha estimado con un factor de cobertura K=2 que corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%

OBSERVACIONES:

N/A. No aplica



INFORME DE ENSAYO	FIIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IECE20-395	Pág. 2 de 2

CONSIDERACIONES:

Los ensayos marcados con (*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018


El laboratorio no emite declaraciones de conformidad

Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

¹Valores de referencia

Revisado por	
--------------	---



Bq. Carla Valarezo
JEFE DE LABORATORIO

Anexo 1.3. Análisis de muestra de agua del mes de diciembre



LABORATORIO EMAPA-I

INFORME DE ENSAYO		FIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IECE21-007		Pág. 1 de 2
<p style="text-align: center;">Ciente: Daniela Villarreal</p> <p style="text-align: center;">Dirección: La Victoria</p>		
<p style="text-align: center;">Fecha de recepción: 13 de Enero del 2021</p> <p style="text-align: center;">Identificación muestra cliente: H015</p> <p style="text-align: center;">Tipo de muestra: Agua Cruda</p>		<p style="text-align: center;">Toma de muestra realizada por: El cliente</p>
<p style="text-align: center;">Código de Laboratorio: MEC21-001</p> <p style="text-align: center;">Fecha de realización de ensayos: 13-14/01/2021</p>		<p style="text-align: center;">Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I</p> <p style="text-align: center;">Fecha de emisión informe: 15 de Enero del 2021</p>

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	Incertidumbre expandida con K=2	⁽¹⁾ CRITERIO DE CALIDAD
			MEC21-001		
Color aparente (*)	Standard Methods 2120B	Pt-Co	>50	N/A	-
Sólidos Totales disueltos (*)	Standard Methods 2510B	mg/l	95	N/A	-
Sólidos Totales (*)	Standard Methods 2540B	mg/l	217.5	N/A	-
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	50.30	N/A	-

Condiciones Ambientales de Análisis				
Área	Temperatura (C°)		Humedad (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Físicos	22,3	22,3	57	57

INCERTIDUMBRE DE LOS RESULTADOS

La incertidumbre expandida de los resultados se ha estimado con un factor de cobertura K=2 que corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%

OBSERVACIONES:

N/A: No aplica

**INFORME DE ENSAYO**FIIR 7.8-01
Revisión 02

Informe de Ensayo Nro: IECE21-007

Pág. 2 de 2

CONSIDERACIONES:

Los ensayos marcados con (*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018


El laboratorio no emite declaraciones de conformidad

Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

¹ Valores de referencia

Revisado por Bq. Carla Valarezo
JEFE DE LABORATORIO

Anexo 1.4. Análisis de muestra de agua del mes de enero



LABORATORIO EMAPA-I

INFORME DE ENSAYO		FIIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IECE21-025		Pág. 1 de 2
Cliente: Daniela Villarreal Dirección: La Victoria		
Fecha de recepción: 01 de Febrero del 2021 Identificación muestra cliente: H015 Tipo de muestra: Agua Cruda		Toma de muestra realizada por: El cliente
Código de Laboratorio: MEC21-002 Fecha de realización de ensayos: 01-02/02/2021		Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I Fecha de emisión informe: 03 de Febrero del 2021

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	Incertidumbre expandida con K=2	(1) CRITERIO DE CALIDAD
			MEC21-002		
Color aparente (*)	Standard Methods 2120B	Pt-Co	>50	N/A	-
Sólidos Totales disueltos (*)	Standard Methods 2510B	mg/l	107	N/A	-
Sólidos Totales (*)	Standard Methods 2540B	mg/l	177,5	N/A	-
Sólidos Suspendidos Totales (*)	Standard Methods 2540D	mg/l	21,87	N/A	-

Condiciones Ambientales de Análisis				
Área	Temperatura (C°)		Humedad (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Físicos	22,3	25,0	46	44

INCERTIDUMBRE DE LOS RESULTADOS

La incertidumbre expandida de los resultados se ha estimado con un factor de cobertura K=2 que corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%

OBSERVACIONES:

N/A: No aplica

INFORME DE ENSAYOFIIR 7.8-01
Revisión 02

Informe de Ensayo Nro: IECE21-025

Pág. 2 de 2

CONSIDERACIONES:

Los ensayos marcados con (*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018

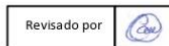
El laboratorio no emite declaraciones de conformidad

Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

¹Valores de referencia



Bq. Carla Valarezo
JEFE DE LABORATORIO



Anexo 2. Salidas de campo

Anexo 2.1. Reconocimiento del área



Anexo 2.2 Recolección de muestras de agua

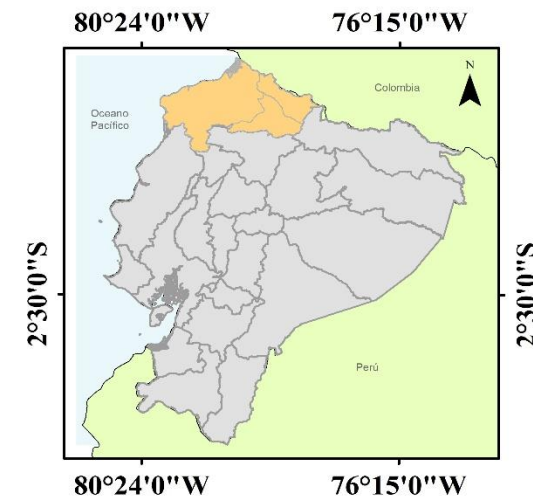


Anexo 3. Mapas temáticos

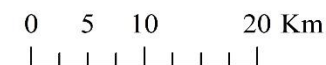
MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA



UBICACIÓN GEOGRÁFICA

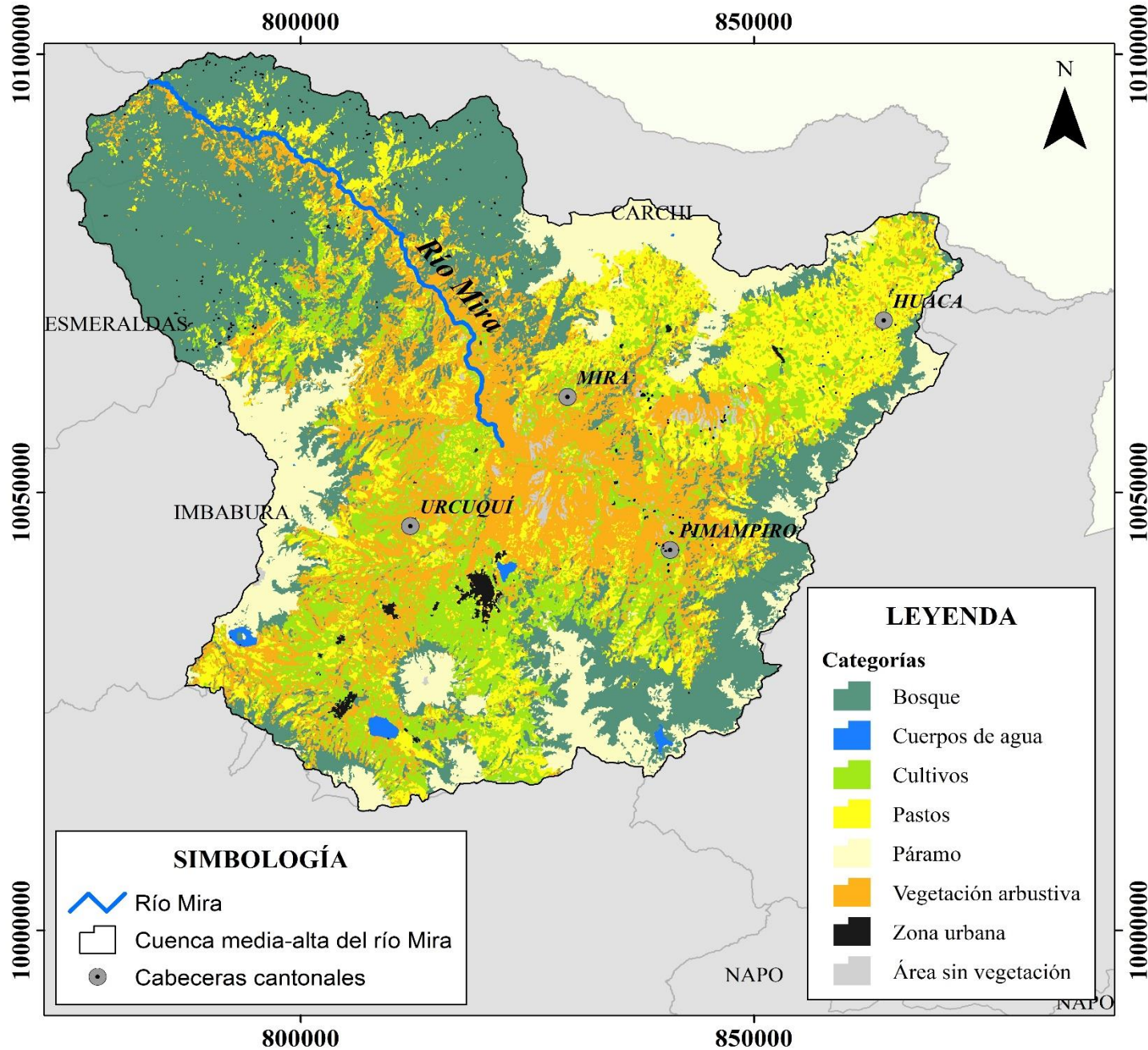


Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur

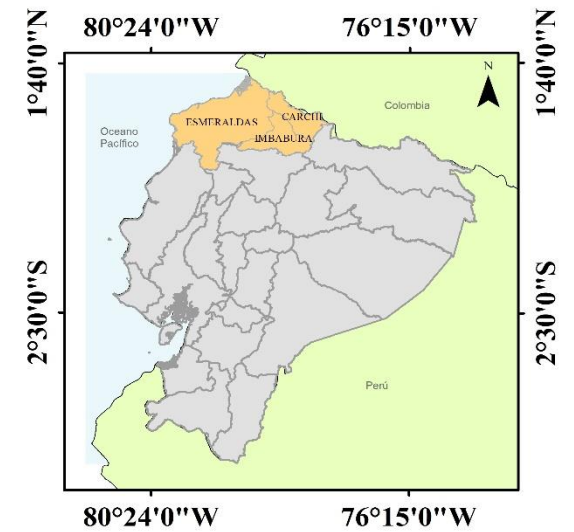


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 1 DE 6

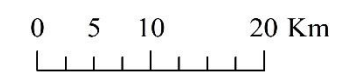
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA, AÑO 1996



UBICACIÓN EN EL ECUADOR



Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO, AÑO 1996	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 2 DE 6

SIMBOLOGÍA

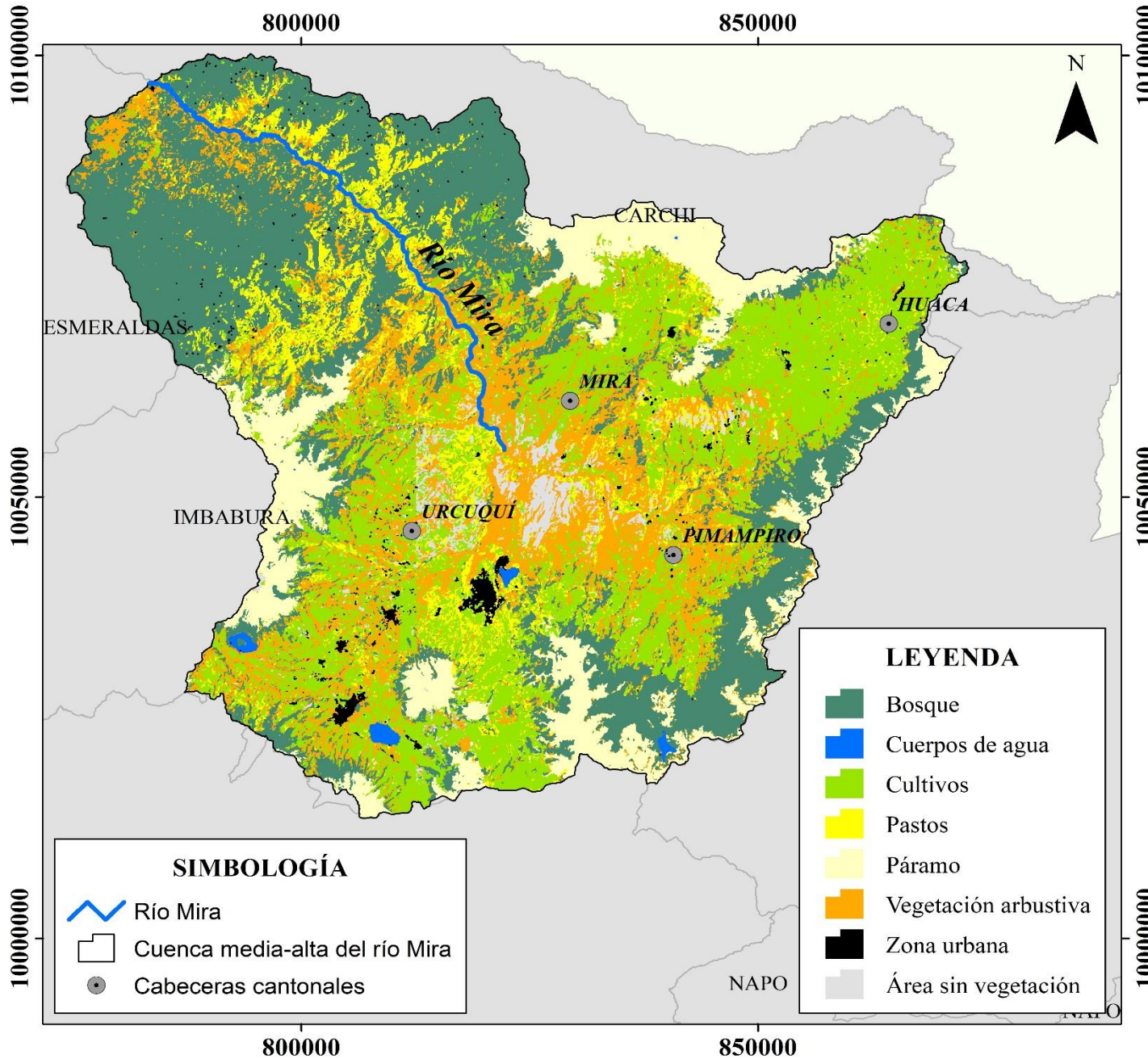
	Río Mira
	Cuenca media-alta del río Mira
	Cabeceras cantonales

LEYENDA

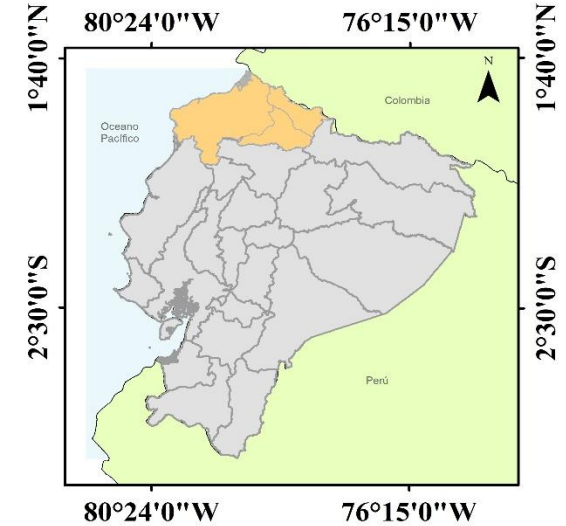
Categorías

	Bosque
	Cuerpos de agua
	Cultivos
	Pastos
	Páramo
	Vegetación arbustiva
	Zona urbana
	Área sin vegetación

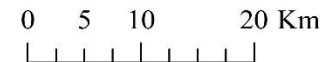
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA, AÑO 2007



UBICACIÓN EN EL ECUADOR



Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur



SIMBOLOGÍA

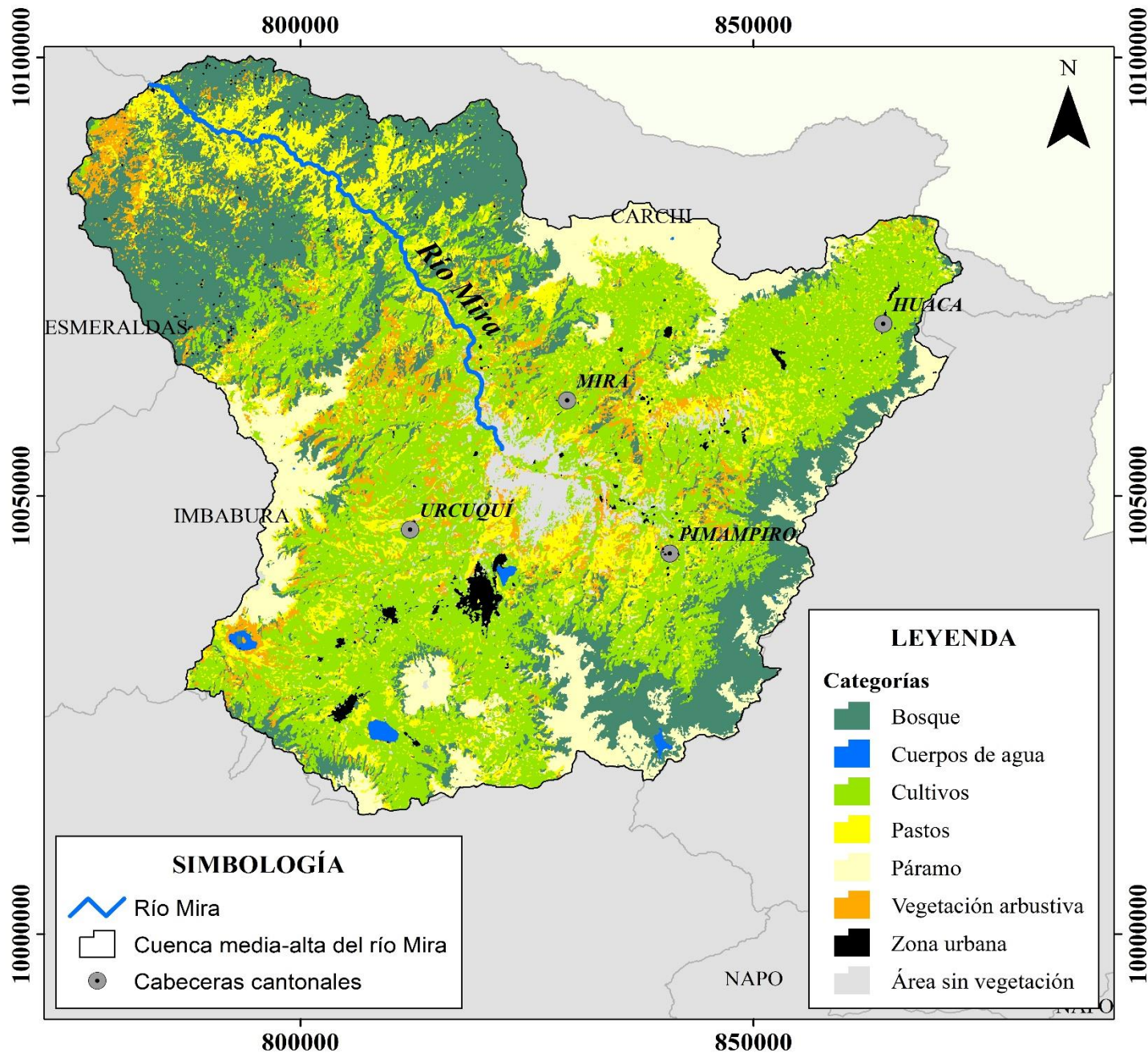
- Río Mira
- Cuenca media-alta del río Mira
- Cabeceras cantonales

LEYENDA

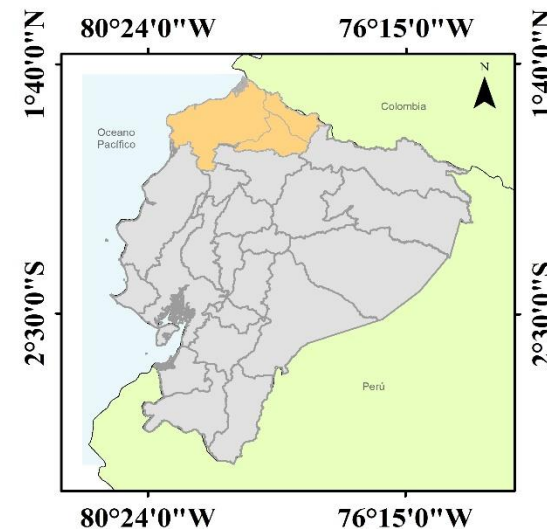
- Bosque
- Cuerpos de agua
- Cultivos
- Pastos
- Páramo
- Vegetación arbustiva
- Zona urbana
- Área sin vegetación

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO, AÑO 2007	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 3 DE 6

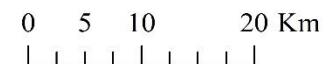
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA, AÑO 2018



UBICACIÓN EN EL ECUADOR



Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO, AÑO 2018	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 4 DE 6

SIMBOLOGÍA

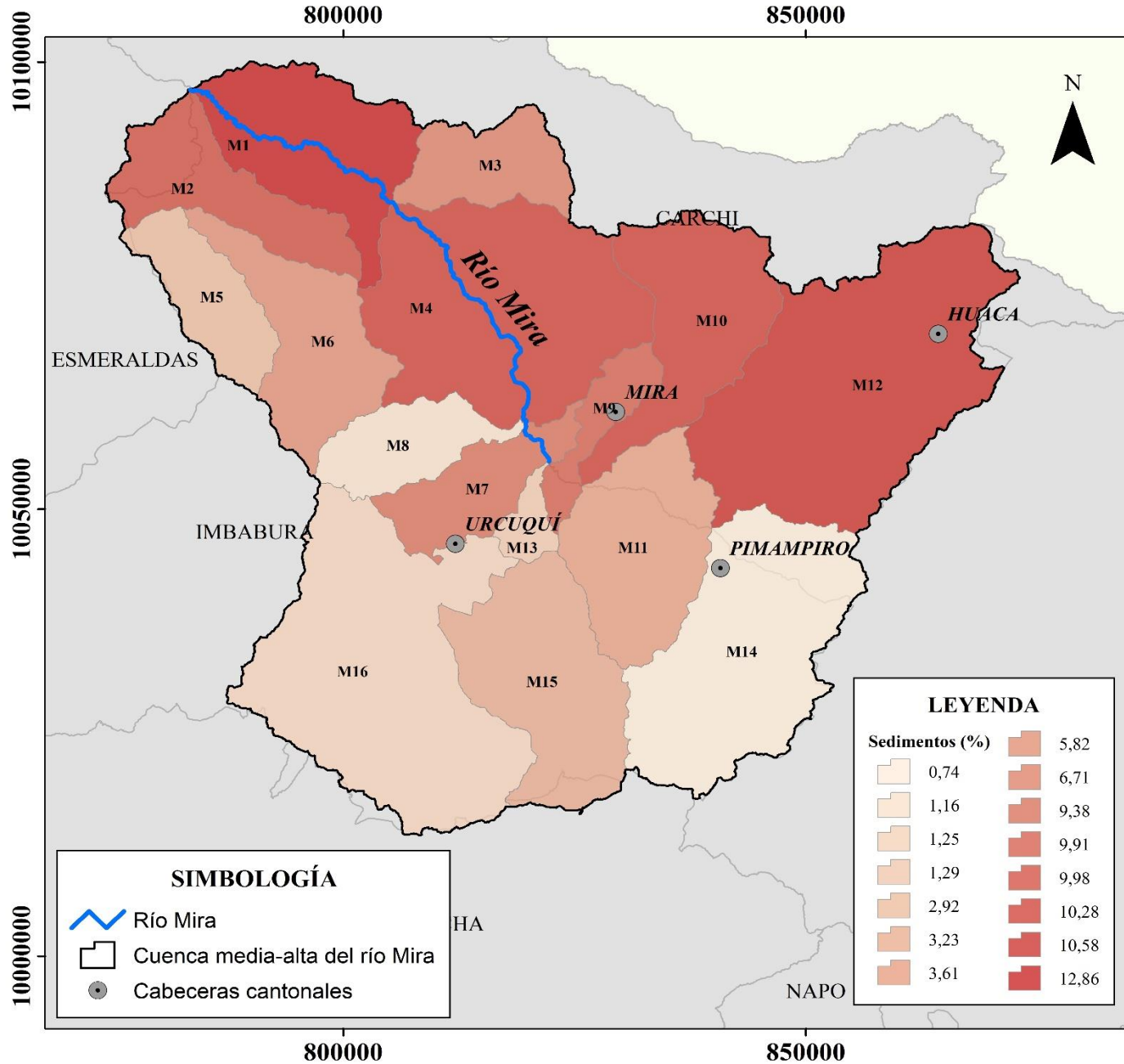
	Río Mira
	Cuenca media-alta del río Mira
	Cabeceras cantonales

LEYENDA

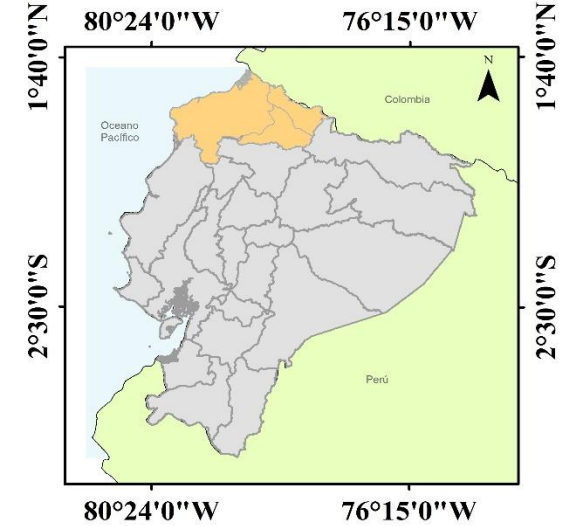
Categorías

	Bosque
	Cuerpos de agua
	Cultivos
	Pastos
	Páramo
	Vegetación arbustiva
	Zona urbana
	Área sin vegetación

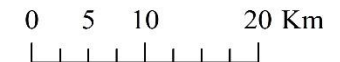
MAPA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS 1996-2007 DE LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA



UBICACIÓN EN EL ECUADOR

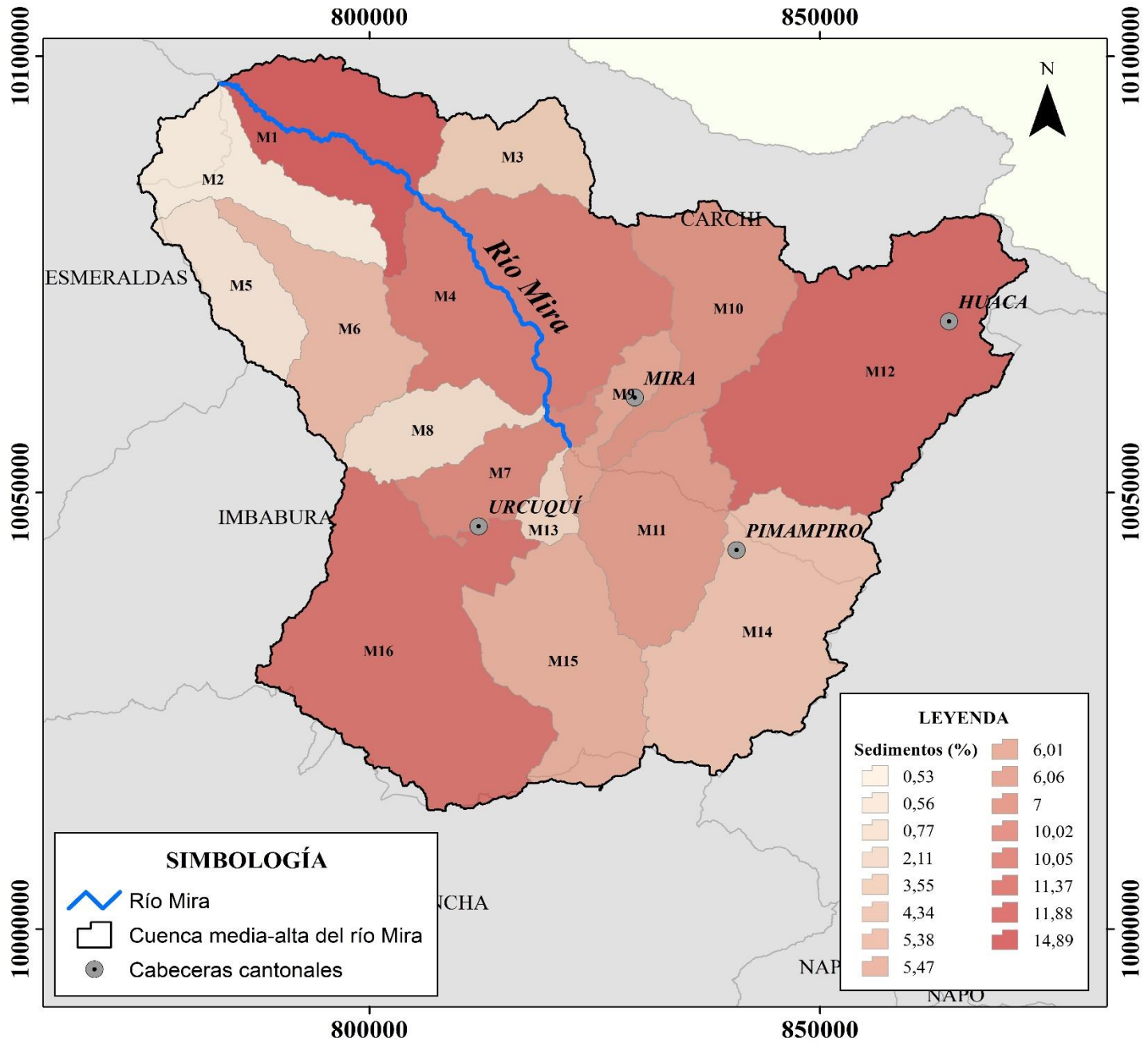


Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur

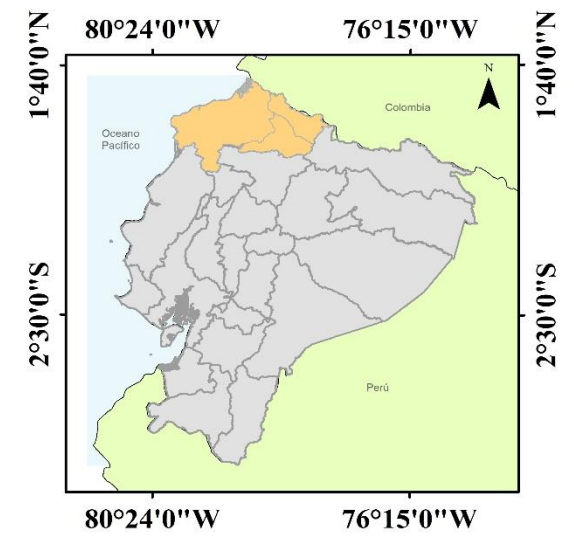


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS 1996-2007	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 5 DE 6

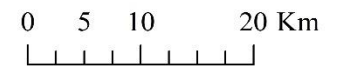
MAPA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS 2007-2018 DE LA CUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO MIRA



UBICACIÓN EN EL ECUADOR



Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 1984, Zona 17 Sur



LEYENDA	
Sedimentos (%)	
0,53	6,01
0,56	6,06
0,77	7
2,11	10,02
3,55	10,05
4,34	11,37
5,38	11,88
5,47	14,89

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS 2007-2018	
ELABORADO POR: Troya, N. y Villarreal D.	FECHA: 04/ dic /2021
ESCALA DE TRABAJO: 1:50 000	ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:450 000
FUENTE: SNI	MAPA 6 DE 6