



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA
MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ, CANTÓN IBARRA”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingenieras en
Recursos Naturales Renovables

Línea de Investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales
renovables

AUTORAS

Chiriboga Pozo Nicole Estefanía
Vélez Moreira Camila Dayana

DIRECTOR:

PhD. Darío Paúl Arias Muñoz

Ibarra – Ecuador 2026



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, hacemos la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	100524996-4	
APELLIDOS Y NOMBRES	Chiriboga Pozo Nicole Estefanía	
DIRECCIÓN:	Ibarra – Imbabura	
EMAIL:	nicolechiriboga19@gmail.com nechiribogap@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0988012839

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	085027229-5	
APELLIDOS Y NOMBRES	Vélez Moreira Camila Dayana	
DIRECCIÓN:	Esmeraldas – Esmeraldas	
EMAIL:	velezcamila72@gmail.com cdvelezm@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0982933984

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ, CANTÓN IBARRA
AUTORAS:	Chiriboga Pozo Nicole Estefanía Vélez Moreira Camila Dayana
FECHA:	2026/02/24
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingenieras en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	PhD. Darío Paúl Arias Muñoz
ASESOR:	MSc. Oscar Armando Rosales Enríquez

2. CONSTANCIAS

Las autoras 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 son 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 24 días del mes de febrero de 2026

LAS AUTORAS

Chiriboga Pozo Nicole Estefanía

Vélez Moreira Camila Dayana

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por las señoritas **NICOLE ESTEFANÍA CHIRIBOGA POZO**, con cédula de identidad Nro. 100524996-4 y **CAMILA DAYANA VÉLEZ MOREIRA**, con cédula de identidad Nro. 085027229-5, bajo mi supervisión en calidad de director.

PhD. Darío Paúl Arias Muñoz
DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

*A la **Universidad Técnica del Norte** por ser el escenario de nuestros mayores retos y de nuestras mejores victorias, a los pasillos que escucharon nuestras risas y en las aulas donde se crearon recuerdos. Donde aprendimos que el pensamiento es la herramienta más poderosa para cambiar el mundo.*

*Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director **PhD. Darío Paul Arias Muñoz** y nuestro asesor **MSc Oscar Armando Rosales Enríquez**, por abrirnos las puertas de su experiencia y por compartir con nosotras un conocimiento que no se encuentra en los libros. Por ser pilares fundamentales en este proceso, por el tiempo cedido y, sobre todo, por la paciencia infinita. Su guía ha sido la mejor herramienta que hemos podido recibir.*

A nuestros amigos, gracias por estar, por escuchar y por creer en nosotras. Gracias por convertir el estrés en motivación y por ser la mejor compañía en este viaje. Sin sus bromas, su apoyo y esos momentos de distracción necesarios el camino habría sido mucho más gris.

Por último, a esos rincones de la carrera que no aparecen en la malla curricular, pero que son donde realmente se forjó la amistad. Son esos recuerdos que se quedaron grabados en fotografías y en el trayecto de un bus. La universidad fue mucho más que laboratorios y exámenes; fue el frío de las madrugadas antes de partir, las risas espontáneas con amigos tras un día agotador y la complicidad de quienes aprenden a ver el mundo con los mismos ojos. Son los que transformaron a un grupo de desconocidos en una familia y a la teoría en una experiencia de un “baile inolvidable”.

Nicole Estefanía Chiriboga Pozo

Camila Dayana Vélez Moreira

DEDICATORIA

Hay personas que nunca van a saber cuánto las amé...

*Dedico este trabajo a la mujer que me enseñó a vivir, mi abuelita, **Blanca Beatriz Mena** quien siempre será un pilar fundamental, porque si no te debo la vida al menos te debo el haber aprendido a sostener la mía. Gracias por consentirme, te amo...*

*A mi mami, **Ana Lucía Pozo Mena**, quien me enseñó a jamás darme por vencida, por haber sido madre y padre a la vez. Todo lo que soy es gracias a ti y todo lo que aún quiero llegar a ser. Gracias por sostenerme incluso cuando tú también necesitabas que te sostuvieran.*

*A mis compañeros de **4 patas**, mis apoyos emocionales, gracias por nunca hacerme sentir sola, fueron quienes sin decir nada me salvaron más de una vez. Gracias por llenar de pelitos mi ropa.*

*A mi mejor amiga **Camila Dayana Vélez Moreira**, gracias por entender mis silencios gracias por estar para mí, por apoyarme en mis aventuras. Agradezco a tu mami por la mujer que eres y por hacernos amigas ¡lo logramos! Estoy orgullosa de ti.*

*A **mí**, que, aunque la vida no me dio un manual para entender todo lo que he vivido, por no darme por vencido, porque a pesar todo sigo aquí.*

Y a cada persona que me ayudo a salir un poco de mi caos y hacer mi vida más bonita.

Por último, cito a Benito Antonio Martínez Ocasio con la frase “Hay que empezar a preocuparse menos y a disfrutar más, porque la vida va demasiado rápido”.

Nicole Estefanía Chiriboga Pozo

DEDICATORIA

Dedicado a aquellos valientes que caminaron a oscuras hasta encontrar la luz.

*En un mundo lleno de complejidades, forjar el propio destino y sacarlo a flote es un acto de valentía que revela la lucha constante de quien recorre ese camino. En mi historia, esa lucha tiene nombre de mujer: mi madre, **Letty Maribel Moreira Cevallos**. Ella, guerrera incansable que desde el primer instante no dudó en apoyarme en cada paso. Aunque físicamente nos separen miles de kilómetros, nuestros corazones permanecen unidos por un hilo invisible que siempre encuentra el camino de regreso.*

*Dicen que la distancia es la separación entre dos puntos capaz de debilitar vínculos; sin embargo, nada puede contra el amor de un padre. Al mío, **Francisco Camilo Vélez Pin**, un hombre ejemplar capaz de entregarlo todo con tal de ver a su "hijita de su corazón" triunfar. A ellos, por ser mi fuerza y mi soporte.*

*Dedicado también a quienes reciben al foráneo y lo hacen parte de su historia. Hay amistades que se vuelven familia y desconocidos que se vuelven hogar; así fue con mi mejor amiga, **Nicole Estefanía Chiriboga Pozo**, quien me enseñó que nunca estaré sola y me regaló la hermandad que me faltaba. Por haberme acogido y sostenido en cada batalla, dedico este esfuerzo a ella, a su madre y a su abuelita: mi familia por elección.*

Y finalmente a mí, por no rendirme. Porque dejar atrás una vida para forjar un camino propio es un acto de audacia que pocos comprenden. Hoy celebro la fuerza que tuve para convertir la distancia en mi mayor victoria y este lugar en mi verdadero punto de llegada.

Camila Dayana Vélez Moreira

Contenido

RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes del Estudio	1
1.2. Problema de Investigación y Justificación	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	5
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.4. Preguntas Directrices de la Investigación	6
1.5. Hipótesis	6
CAPÍTULO II.	7
REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. Evaluación de los Riesgos de la Erosión Hídrica	7
2.1.1. <i>Erosión Hídrica del Suelo</i>	7
2.2. Factores de la Erosión del Suelo	9
2.3. Efectos de la Erosión Hídrica	10
2.4. Influencia Socioeconómica y Ambiental de la Erosión Hídrica	10
2.5. Aplicación del Modelo RUSLE.....	11
2.5.1. <i>Factores del modelo RUSLE</i>	11
2.6. Propuestas de Mitigación del Suelo Erosionado	13
2.7. Marco Legal	13
CAPÍTULO III.	23
METODOLOGÍA	23
3.1. Descripción del Área de Estudio.....	23

3.2. Morfometría de la microcuenca del río Chorlaví	25
3.2.1. Edafología	27
3.3. Métodos	29
3.3.1. Cálculo de la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica	29
3.3.2. Determinación del Factor R	31
3.3.3. Determinación del Factor K	31
3.3.4. Determinación del Factor LS.....	33
3.3.5. Determinación del Factor C	34
3.3.6. Evaluación del Riesgo de Erosión	35
3.4. Validación del Modelo <i>RUSLE</i>	36
3.4.1. Muestreo del Agua y Análisis en Laboratorio.....	39
3.5. Estrategias de Manejo de Conservación	43
3.6. Materiales y Equipos.....	43
CAPÍTULO IV.....	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. Zonificación del riesgo de erosión hídrica y determinación de la Pérdida de Suelo.....	45
4.2. Validación del Modelo <i>RUSLE</i>	49
4.3. Discusión.....	50
4.4. Prácticas de Conservación del Suelo para Mitigar Áreas Vulnerables a la Erosión Hídrica	53
4.4.1. Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas..	56
4.4.2. Diseño de Estrategias.....	58
CAPÍTULO V.	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1. Conclusiones.....	67

5.2. Recomendaciones	69
REFERENCIAS	70
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de erosión	8
Tabla 2. Factores de erosión hídrica.....	9
Tabla 3. Factores del modelo RUSLE	12
Tabla 4. Características físicas de la microcuenca del río Chorlaví.....	26
Tabla 5. Valores del factor C	34
Tabla 6. Categorías de erosión y sus principales características	36
Tabla 7. Materiales, equipos e insumos de investigación.....	44
Tabla 8. Sedimentos en suspensión (ton/ha/año)	50
Tabla 9. Matriz FODA de la microcuenca del río Chorlaví.....	57
Tabla 10. Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del río Chorlaví.....	58
Tabla 11. Matriz Operativa Estrategia 1	59
Tabla 12. Matriz operativa estrategia 2.....	61
Tabla 13. Matriz operativa estrategia 3.....	63
Tabla 14. Matriz operativa estrategia 4.....	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Marco legal - pirámide de Kelsen.....	22
Gráfico 2. Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví	25
Gráfico 3. Edafología de la microcuenca del río Chorlaví	28
Gráfico 4. Insumos	30
Gráfico 5. Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE	39
Gráfico 6. Punto de muestreo de agua.....	40
Gráfico 7. Toma de muestra de agua	42
Gráfico 8. Factores del modelo RUSLE	46
Gráfico 9. Erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví	48
Gráfico 10. Uso potencial del suelo de la microcuenca del río Chorlaví.....	54
Gráfico 11. Clases Agrológicas de la Microcuenca del río Chorlaví	55
Gráfico 12. Conflictos de uso de suelo de la microcuenca del río Chorlaví..	56
Gráfico 13. Ubicación de la estrategia 1.....	60
Gráfico 14. Ubicación de la estrategia 2.....	62
Gráfico 15. Ubicación de la estrategia 3.....	64
Gráfico 16. Ubicación de la estrategia 4.....	66

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

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

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN LA
MICROCUEENCA DEL RÍO CHORLAVI, CANTÓN IBARRA**

Trabajo de Titulación

Nicole Estefanía Chiriboga Pozo
Camila Dayana Vélez Moreira

RESUMEN

El fenómeno de la erosión hídrica es una de las principales problemáticas en la degradación del suelo dentro de la región interandina del Ecuador, comprometiendo severamente la invulnerabilidad de los sistemas de producción agrícolas locales. Este problema se ve agravado por una ordenación territorial deficiente, donde las actividades antrópicas agrícolas intensivas han alterado la estabilidad de las cuencas hidrográficas del país. La presente investigación se basó en la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví, provincia de Imbabura, mediante la implementación del modelo empírico RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) integrado en entornos de Sistemas de Información Geográfica. La fiabilidad del análisis radica en la integración de variables de erosividad, erodabilidad, pendiente y cobertura vegetal. Dentro de la microcuenca del río Chorlaví se obtuvo una tasa de erosión media de 1.69 ton/ha/año, cifra que, si bien se categoriza como muy baja, la fiabilidad del modelo fue contrastada mediante métricas de desempeño estadístico, obteniendo un sesgo porcentual de 26.05 % (PBias) y un error cuadrático de 0.40 (RMSE). Esto evidenció la correlación significativa entre la producción de sedimentos simulada y los sedimentos observados, validando la capacidad predictiva de la metodología empleada. El estudio ratifica que la integración de la herramienta RUSLE en la planificación de cuencas andinas es indispensable para diagnosticar y mitigar los efectos de la presión antropogénica, garantizando la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos.

Palabras clave: erosión hídrica, sedimentos, microcuenca, RUSLE, cobertura de suelo

ABSTRACT

The phenomenon of water erosion is one of the main problems in soil degradation within the inter-Andean region of Ecuador, severely compromising the resilience of local agricultural production systems. This difficulty is aggravated by deficient land-use planning, where intensive agricultural human activities have altered the stability of the country's watersheds. The present research focused on soil loss caused by water erosion in the Chorlaví River micro-watershed, in the province of Imbabura, through the implementation of the empirical RUSLE model (Revised Universal Soil Loss Equation) integrated into Geographic Information Systems (GIS) environments. The reliability of the analysis was based on the integration of variables such as erosivity, erodibility, slope, and vegetation cover. Within the Chorlaví River micro-watershed, an average erosion rate of 1.69 ton/ha/year was calculated. Although this value is categorized as very low, the reliability of the model was validated through statistical performance metrics, obtaining a percent bias (PBias) of 26.05% and a root mean square error (RMSE) of 0.40. This demonstrated a significant correlation between simulated sediment production and observed sediments, validating the predictive capacity of the methodology used. The study confirms that the integration of the RUSLE tool in Andean watershed planning is essential to diagnose and mitigate the effects of anthropogenic pressure, ensuring the sustainability of ecosystem services.

Keywords: water erosion, sediments yield, watershed, RUSLE model, soil cover

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes del Estudio

Los riesgos naturales tienden a interactuar, crean sinergias y aumenta la peligrosidad original que pueden generar nuevos riesgos y desafíos adicionales, que no solo aumentan el peligro inicial, sino que también pueden ocasionar otros problemas derivados de la situación original (Gallegos-Reina, 2021). Evaluar el impacto de la erosión hídrica no es opcional: sin un cálculo riguroso del riesgo que corre el suelo, cualquier plan de conservación carece de base real (Casas et al., 2022). Por medio de este análisis, es posible mapear cómo se reparte el desgaste del terreno y prever qué el impacto real tendrá la fuga de sedimentos en su conservación.

Pizarro et al. (2023) realizaron un experimento para la evaluación hídrica en la Región del Maule, Chile, donde instalaron parcelas con trampas de erosión para medir la sedimentación en cinco condiciones diferentes de cobertura forestal. Los resultados sugirieron que un suelo removido con mayor porosidad y materia orgánica puede reducir la erosión. En el mismo año otra investigación llevada a cabo en la cuenca del río Sacanche evaluó la erosión hídrica mediante metodología RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), se determinaron los factores de erosión, cobertura, pendiente y prácticas de conservación (Del Castillo-Gonzales, 2023).

En Argentina, la agricultura intensiva ha avanzado hacia zonas antes ocupadas por montes nativos, aumentando la erosión hídrica y degradación del suelo. Por tal motivo,

se consideró la evaluación de la erosión hídrica en todo el país, evaluando la superficie erosionada en cada provincia mediante cartografía digital a gran escala, para la planificación y conservación de los suelos (Casas et al., 2022). En Venezuela, por ejemplo, la vulnerabilidad a la erosión hídrica en el Sector río Orituco, Venezuela, reveló altos riesgos de erosión en los usos agropecuarios predominantes, como maíz y sorgo.

En Ecuador, Pinargote-Chóez et al., (2021) realizaron un estudio de la cuenca alta del río Guineal en la provincia de Manabí en Ecuador donde demuestra su fragilidad ante la erosión hídrica. Se analizaron parámetros hidrológicos como caudal medio y coeficiente de esorrentía, además, las lluvias entre 1995-2014 fueron determinantes, para estimar pérdidas de suelo que exceden los límites tolerables, en donde se comprometió la productividad agrícola. Otros autores como Arias-Muñoz et al. (2023) examinaron la relación entre factores climáticos y la variabilidad hídrica en la cuenca media-alta del río Mira en Ecuador, identificando cómo las alteraciones climáticas afectan la disponibilidad y distribución del agua, con el uso del modelo RUSLE y datos históricos para proyectar escenarios futuros y evaluar los impactos en la gestión de recursos hídricos.

La microcuenca del río Chorlaví es un ecosistema vital en la región, compuesto por diversas quebradas como San Antonio, Cacho, Chuchuda, Tanguarín, El Laurel, De los Flores, Santo Domingo, Guanguacha, De la Compañía, Del Molino, Farinango, Licho, De Tiangas y Peña Blanca. Estas fuentes alimentan el río Chorlaví, que suministra de agua a las comunidades locales y contribuye a la biodiversidad regional (Gómez-Arcos,

2019). Durante el siglo XX, el desarrollo urbano y la intensificación de la agricultura trajeron consigo nuevos desafíos para la conservación de la microcuenca.

1.2. Problema de Investigación y Justificación

La microcuenca del río Chorlaví en el cantón Ibarra enfrenta una problemática de erosión hídrica, que se ha incrementado en los últimos años debido a una combinación de factores naturales y antrópicos. La pérdida del suelo fértil es un efecto devastador para el medio, la agricultura y la sociedad. La acción del agua, el viento o las actividades humanas reducen la capacidad de la tierra para sustentar la vegetación y sus cultivos, lo que resulta en una disminución de la productividad agrícola. También ocasionó la desertificación, la escasez de recursos hídricos y aumentó la vulnerabilidad a fenómenos climáticos como las sequías e inundaciones (Valdez-Zertuche et al., 2015).

Al comprometer la inocuidad del suministro, se genera un efecto de cascada que desarticula la seguridad epidemiológica y socava la viabilidad de sectores productivos como el agro y el turismo (Guadarrama-Tejas et al., 2016). Desde una perspectiva ecológica, la ruptura de las sinergias interespecíficas desestabiliza la arquitectura de los ecosistemas, mermando su biodiversidad y anulando funciones basales como el control biótico y la polinización. Esta erosión funcional desencadena una reacción que degrada la provisión de servicios vitales, desde la regulación climática hasta la depuración hídrica, lo cual trasciende lo ambiental para impactar la seguridad

alimentaria y el tejido sociocultural de las poblaciones que dependen intrínsecamente de estos equilibrios (Tellería, 2013).

La erosión de la integridad del paisaje desarticula la conectividad ecológica y el capital natural, socavando sectores como el turismo y la identidad de los territorios. Esta fragmentación no solo degrada el entorno, sino que actúa como un vector de vulnerabilidad social que exige transitar de la conservación teórica hacia modelos de resiliencia socioambiental con impacto real. Este problema se relaciona con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 15, "Vida de ecosistemas terrestres", que busca proteger y restaurar los ecosistemas, gestionar bosques de forma sostenible, combatir la desertificación, detener la degradación de tierras y frenar la pérdida de biodiversidad.

En el caso de la microcuenca del río Chorlaví, es fundamental evaluar el riesgo de erosión hídrica mediante el uso de SIG (Sistemas de Información Geográfica), herramienta que permite analizar y modelar datos de forma eficiente. Esta evaluación permite cuantificar la tasa de erosión actual y determina las áreas más susceptibles a este fenómeno dentro de la microcuenca (Del Castillo-Gonzales, 2023). Es fundamental la conservación del suelo, porque no solo se basa en la productividad agrícola, si no también, cumple una función determinante en el resguardo total de las cuencas hidrográficas y ante la inminente escasez del recurso hídrico (Quiñonez-Marret, 2022).

En la microcuenca del río Chorlaví existe pérdida de cobertura boscosa e impactos bruscos con respecto a la minería como actividad secundaria, por ello, se deberían

desarrollar normas y planes de conservación y rehabilitación de tierras, para una mejora en el desarrollo agrícola y reducir los efectos perjudiciales en la diversidad biológica y el bienestar de los residentes (Riofrio-Humanante, 2023).

El proyecto de investigación "Efectos del Cambio de Uso de Suelo y Cambio Climático en la Erosión: Caso Cuenca del río Ambi" trata cómo la erosión del suelo amenaza el desarrollo agrícola y la seguridad alimentaria, especialmente en países en desarrollo. Esta problemática está vinculada a la expansión agrícola que genera deforestación, pérdida de biodiversidad, degradación del suelo y contaminación del agua. Por ese motivo es crucial implementar prácticas agrícolas sostenibles y políticas de conservación para mitigar estos efectos y promover un desarrollo equilibrado (Robles-Ortiz, 2003).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví con el fin de proponer estrategias de conservación del suelo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la pérdida de suelo causada por erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví.
- Zonificar el riesgo de erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví.

- Proponer estrategias de conservación del suelo para mitigar los efectos de erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví.

1.4. Preguntas Directrices de la Investigación

¿Cuál es la pérdida de suelo causada por erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví?

¿Cuáles son las áreas más susceptibles a la erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví?

1.5. Hipótesis

H₀= Los sedimentos simulados por erosión hídrica son similares a los sedimentos observados en el río Chorlaví.

H_a= Los sedimentos simulados por erosión hídrica no son similares a los sedimentos observados en el río Chorlaví.

CAPÍTULO II.

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Evaluación de los Riesgos de la Erosión Hídrica

El proceso que se define como erosión se basa en una secuencia física que vincula los desplazamientos, movilización y por partículas esparcidas del suelo, también se lo percibe como erosión geológica al darse de forma natural por el cuidado que se le brinda al relieve. Existen varios riesgos que causa la erosión hídrica, como principal se tiene que, las actividades humanas tienden a incrementar o modificar la superficie en los terrenos agrícolas por el uso de estas zonas. El deterioro de este suelo depende de varios componentes como las características de la lluvia o el viento o el grado de inclinación del terreno que protege la capa del suelo (Durán-Trejo, 2012).

2.1.1. Erosión Hídrica del Suelo

Se conoce que la erosión hídrica es un proceso complicado que se atiene a varias causas que lo producen, esta complejidad se deriva a que puede ser analizadas a diferentes magnitudes de espacio y tiempo: La energía cinética de una gota de lluvia se transforma al impactar contra la superficie del suelo, esto genera la dispersión de la energía que provoca la desintegración de terrones y agregados. La escorrentía conlleva al desprendimiento de suelo fresco y al transporte de la tierra removida, en una medida directamente relacionada con el volumen de agua escurrida y la velocidad alcanzada por el flujo sobre la superficie. Este proceso erosivo es responsable de los fenómenos

más evidentes, como la creación de cárcavas (Pinargote-Chóez et al., 2021).

Generalmente los tipos de erosión son: laminar, por surcos y por cárcavas (Tabla 1).

Tabla 1. *Tipos de erosión*

Tipo	Descripción	Características
Erosión Laminar	Conocida también como erosión por manto, es un proceso que se desarrolla en suelos desnudos con pendientes largas y suaves. Implicando la remoción de una lámina o capa delgada y uniforme de la superficie del terreno debido al impacto de la lluvia.	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta a grandes áreas de manera perceptible • Remueve cantidades significativas de suelo • Cambia el color de suelos elevados al desaparecer la capa superior • Exponen fracciones limosas y arcillosas
Erosión por Surcos	Comienza en la interfase suelo-agua, donde el escurrimiento desagrega el suelo y transporta partículas. A medida que el flujo aumenta, la erosión se intensifica, formando pequeños canales o surcos.	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la micro topografía del terreno • Influenciada por la cohesividad del suelo, altura del salto de agua y su caudal • Más común en zonas con pendientes pronunciadas
Erosión por Cárcavas	La erosión superficial forma cárcavas cuando el escurrimiento se concentra en áreas específicas. Las características irregulares del suelo permiten la unión de múltiples surcos, creando zanjas grandes.	<ul style="list-style-type: none"> • Resultado de un flujo concentrado con suficiente caudal y velocidad • Presenta mayor profundidad y menor amplitud que los canales estables • Las formas varían según el tipo de suelo

Fuente: (Durán-Trejo, 2012) y (Fernández, 2016).

2.2. Factores de la Erosión del Suelo

En las microcuencas hidrográficas permanecen múltiples factores que se combinan para intensificarse en áreas específicas. Estos elementos están directamente relacionados con el uso y manejo del suelo, así como con las circunstancias vinculadas con el agua y otros elementos (Tabla 2). Los mecanismos de desgaste causados por el agua se clasifican en función de su acción, que puede ser activa o pasiva. Entre los factores activas que contribuyen a la erosión se encuentra la precipitación, que es el principal agente de erosión en las cuencas hidrográficas. De igual manera, los factores pasivos que influyen en la erosión incluyen la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la topografía. Estos elementos pueden actuar de manera individual o en combinación para afectar la tasa de erosión del suelo (Quiñonez-Marret, 2022).

Tabla 2. Factores de erosión hídrica

Factor	Descripción
Precipitación	Este factor erosiona el suelo mediante energía cinética; su volumen, distribución e intensidad definen el desprendimiento y transporte de partículas.
Escurrimiento	Transporta sedimentos, acelerando el proceso de erosión según la inclinación
Cobertura Vegetal	La vegetación funciona como un escudo que absorbe el impacto de la lluvia, aumenta la infiltración y frena el escurrimiento, mejorando además la estabilidad y cohesión del suelo.
Pendiente	Este dirige la salpicadura de lluvia hacia abajo e incrementa la velocidad del escurrimiento, intensificando la erosión a medida que el terreno es más inclinado
Actividades Antrópicas	Las prácticas agrícolas inadecuadas como la quema degradan la salud del suelo al eliminar la materia orgánica, obstruir su porosidad y dejarlo sin cobertura, lo que dispara el riesgo de erosión hídrica.

Fuente: (Fernández, 2016) y (Quiñonez-Marret, 2022).

2.3. Efectos de la Erosión Hídrica

La erosión hídrica es un fenómeno global que implica la remoción del suelo por el agua, agravado por prácticas agrícolas inadecuadas, deforestación, pendientes pronunciadas y lluvias intensas. Este fenómeno puede causar estragos en el medio ambiente y en la agricultura. Uno de los principales efectos de la erosión hídrica es la pérdida de suelo fértil, lo que disminuye la productividad agrícola. Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), la erosión hídrica es responsable de la degradación del 75% de los suelos agrícolas en el mundo, que afecta la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los recursos naturales (FAO, 2019). Además, la eliminación de la capa superficial del suelo reduce la capacidad del terreno para retener agua y nutrientes, lo que resulta en una menor eficiencia del uso del agua y mayor vulnerabilidad de los cultivos a condiciones climáticas extremas.

2.4. Influencia Socioeconómica y Ambiental de la Erosión Hídrica

La erosión hídrica tiene profundos impactos socioeconómicos que afectan tanto a las comunidades rurales como urbanas. La pérdida de suelo fértil disminuye la productividad agrícola, lo que resulta en menores rendimientos de cultivos y, en consecuencia, en una reducción de los ingresos para los agricultores. Esto puede llevar a la inseguridad alimentaria y a la migración de las áreas rurales hacia las ciudades, que exacerba a la urbanización descontrolada y la pobreza en las zonas urbanas. (Valdez-Zertuche et al., 2015).

La erosión también contribuye a la desertificación y a la pérdida de ecosistemas, lo que pone en riesgo a las especies locales y disminuye la capacidad del suelo para almacenar carbono, que intensifica el cambio climático. Además, los suelos erosionados liberan nutrientes y contaminantes que pueden afectar la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos. La erosión hídrica no solo deteriora el suelo y la agricultura, sino que también tiene efectos profundos y multifacéticos sobre el medio ambiente y el bienestar socioeconómico (Gómez-Arcos, 2019).

2.5. Aplicación del Modelo RUSLE

El modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) es una herramienta utilizada para estimar la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica. Es una versión mejorada de la USLE (Universal Soil Loss Equation) y se basa en un enfoque estimativo para predecir la tasa de erosión anual promedio. RUSLE toma en cuenta varios factores como se muestra en la Ecuación 1 que influyen en la erosión, lo que permite a los científicos y planificadores diseñar estrategias de manejo del suelo para reducir la erosión.

2.5.1. Factores del modelo RUSLE

La degradación de suelo por erosión hídrica constituye desafíos ambientales para la gestión del territorio. Este fenómeno no es el resultado de un factor aislado, sino la convergencia de variables biofísicas y antropogénicas que determinan la pérdida de la capa fértil. (Tabla 3)

Tabla 3. Factores del modelo RUSLE

Factor	Definición	Variables Determinantes
<i>R (Erosividad)</i>	Cuantifica el potencial del clima para disgregar partículas de suelo. No solo mide cuánto llueve, sino la fuerza cinética y frecuencia de los eventos pluviales.	Se vincula a la intensidad de precipitaciones. En Ecuador, las cuencas con regímenes torrenciales estacionales registran picos de R que disparan el riesgo hídrico
<i>K (Erodabilidad)</i>	Refleja la resistencia intrínseca del sustrato ante el desprendimiento y transporte. Es una propiedad ligada a la estabilidad estructural del suelo	Depende de la granulometría (limos/arenas), materia orgánica y permeabilidad. Es crítico en suelos volcánicos de la Sierra o áreas degradadas por el cambio de uso de suelo
<i>LS (Topografía)</i>	Factor combinado que analiza cómo la longitud de la vertiente (L) y el grado de inclinación (S) aceleran la escorrentía superficial	A mayor pendiente y longitud, aumenta la velocidad del flujo. En la geografía andina ecuatoriana, este factor es el principal motor de pérdida de suelo si no existen barreras físicas
<i>C (Cobertura Vegetal)</i>	Evalúa la protección biótica contra el impacto directo de la gota de lluvia (efecto pantalla) y el frenado de la escorrentía	Los bosques densos reducen este valor a niveles mínimos. Por el contrario, el monocultivo y la deforestación en zonas tropicales elevan el C, exponiendo el horizonte fértil
<i>P (Prácticas)</i>	Coefficiente que mide la eficiencia de las intervenciones humanas para frenar el arrastre de sedimentos mediante control mecánico o biológico	Incluye técnicas como el cultivo en contorno o terrazas. Su aplicación en las laderas andinas es vital para mitigar el impacto erosivo y asegurar la sostenibilidad agrícola

Fuente: (Renald et al., 1994) y (Wischmeier y Smith, 1978)

2.6. Propuestas de Mitigación del Suelo Erosionado

Para mitigar los efectos del suelo erosionado, es fundamental implementar una combinación de estrategias de conservación del suelo y prácticas agrícolas sostenibles. Esto incluye la adopción de técnicas como la siembra directa, que reduce la exposición del suelo al impacto de las gotas de lluvia y la erosión, así como la rotación de cultivos y la diversificación de cultivos, que mejoran la estructura del suelo y reducen la erosión.

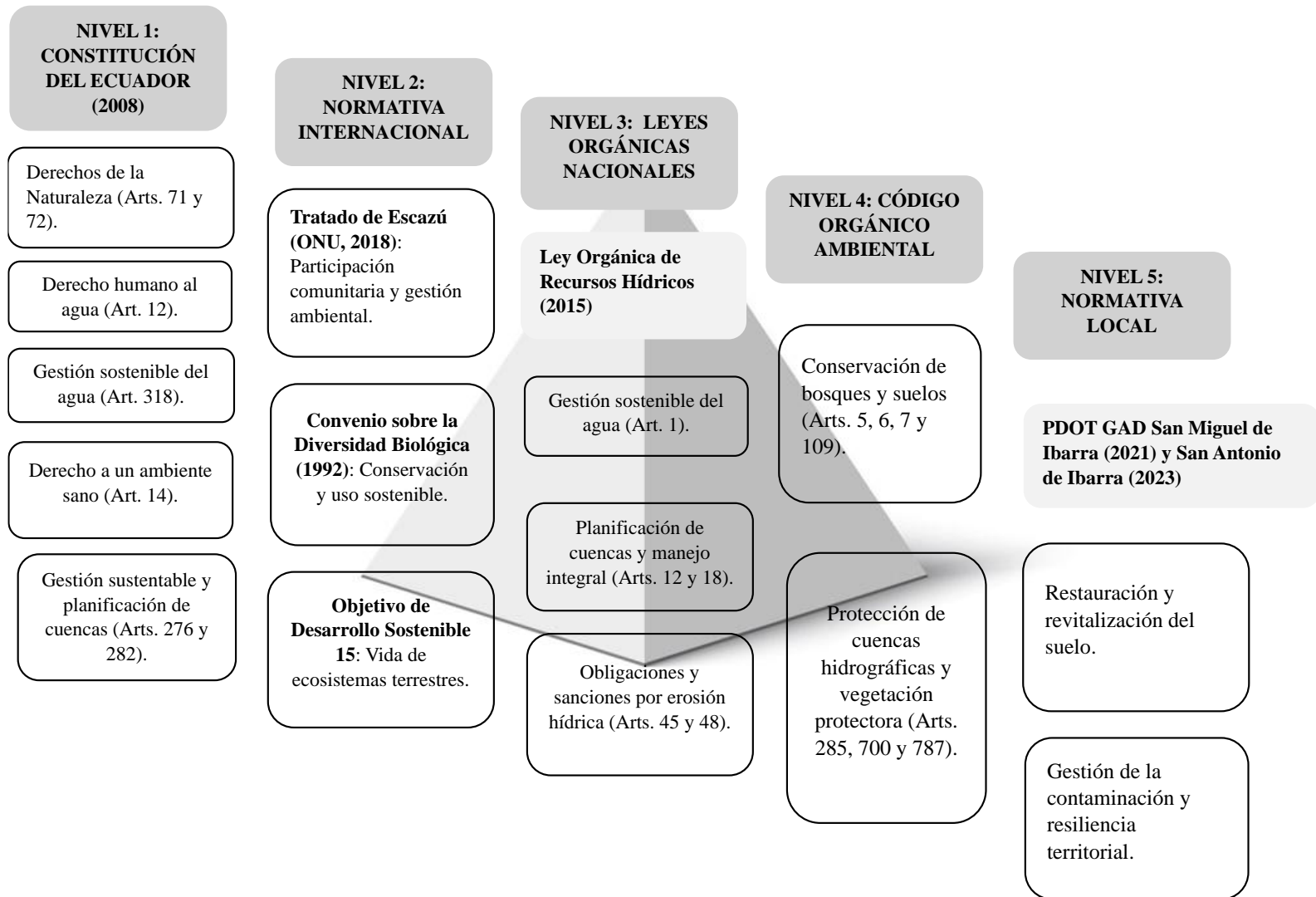
Además, la gestión sistémica de cuencas, fundamentada en la creación de terrazas y la restauración, actúa como un regulador crítico de la dinámica de escorrentía y la cohesión estructural del suelo. Esta estabilización física, sin embargo, requiere un andamiaje institucional que trasciende la técnica. Solo mediante la convergencia de marcos normativos y programas de acompañamiento en territorio se podrá consolidar una gobernanza del suelo que garantice la resiliencia productiva a escala nacional (Quiñonez-Marret, 2022).

2.7. Marco Legal

El fundamento legal de esta investigación sobre la *Evaluación del Riesgo de Erosión Hídrica en la microcuenca del río Chorlaví, Cantón Ibarra* que establece la normativa reguladora del Estado ecuatoriano como se muestra en el Gráfico 1: Las Naciones Unidas (2018) en el tratado de Escazú, Convención sobre la Biodiversidad Biológica, y con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 15 “Vida de ecosistemas terrestres”. Asimismo, aborda la Constitución de la República del Ecuador (2008), la Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua de la República del Ecuador

(2015). En el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2017) en el Código Orgánico Ambiental y el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra (2021) en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento.

Gráfico 1. Marco legal - pirámide de Kelsen



CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

3.1. Descripción del Área de Estudio

La microcuenca del río Chorlaví se encuentra ubicada en la cuenca del río Mira en la provincia de Imbabura en la parte norte de Ecuador, en el cantón de San Miguel de Ibarra con una altitud de 2.225 *m.s.n.m.* a 4435 *m.s.n.m.* y con un clima templado y seco. De acuerdo con Arias-Muñoz et al. (2023), la clasificación de la cuenca es microcuenca, al presentar una superficie de 53.83 km², una longitud de 15.73 km, un perímetro de 39.87 km² y una anchura de 3.42 km (Gráfico 2). Cubriendo un área que oscila entre 4 000 y 15 000 hectáreas, es considerada una microcuenca de acuerdo con la clasificación ecuatoriana.

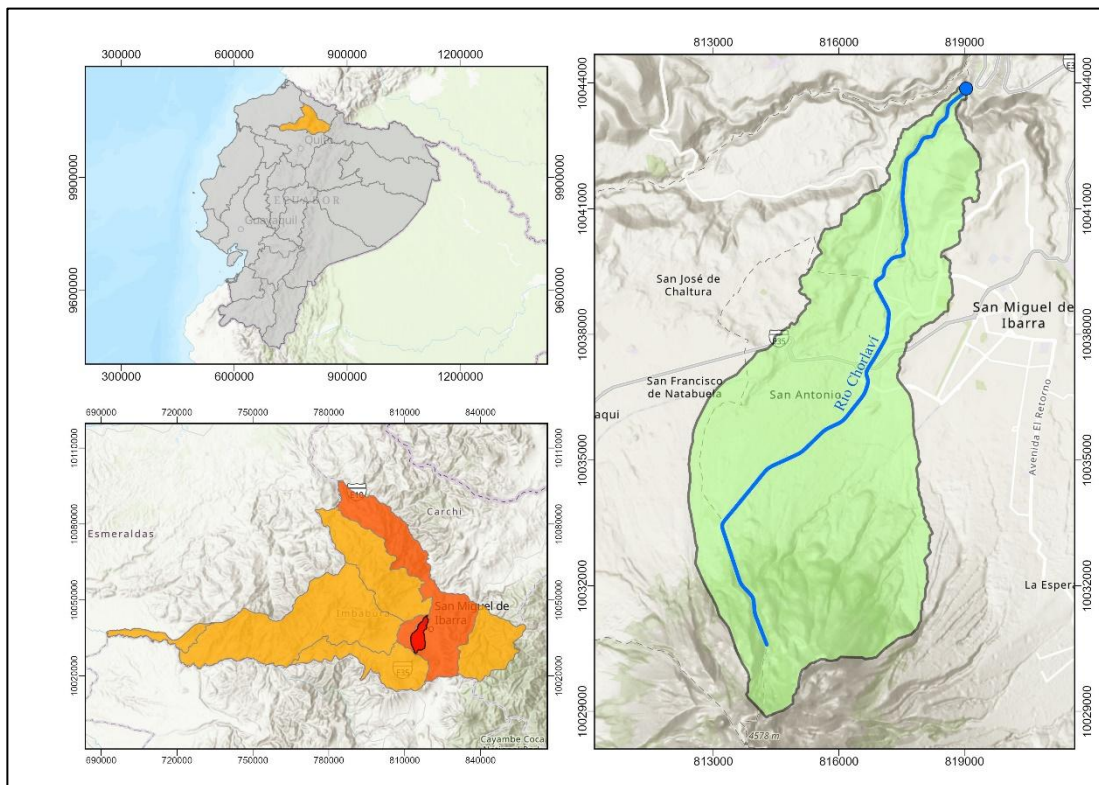
Presenta una superficie de 53.83 km², lo largo del año, la temperatura oscila generalmente entre los 4.5°C y los 28.3°C (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra, 2021). El río Chorlaví, con una longitud de 8.5 km, tiene su origen en quebradas que originan en el Cerro Imbabura, principalmente en las quebradas Farinango y San Antonio, a una altitud de 3660 *m.s.n.m.* al sureste del cantón. Este río recorre 6.6 km a través de Antonio Ante, a una altura de 1800 *m.s.n.m.*, y más adelante se une al río Tahuando, con una longitud de 675 m. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Antonio Ante, 2019).

La parroquia de San Antonio está ubicada dentro de la microcuenca, abarca el 47.06% de la microcuenca del río Chorlaví, en la quebrada de Tanguarín, ubicada en

esta parroquia, es una fuente de agua significativa y la principal corriente de la microcuenca hidrológica del río Chorlaví (Riofrio-Humanante, 2023). Es una de las parroquias mejor atendidas en cuanto al servicio de alcantarillado, ya que los 27 barrios que la componen cuentan en su mayoría con alcantarillado sanitario (Espinosa-Montesdeoca, 2017).

La población supera los 20,000 habitantes, con una cobertura aproximada del 88.74% y una red de alcantarillado que se extiende por unos 60 km (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de San Antonio de Ibarra, 2023). Todas las descargas de estos barrios van al colector marginal del río Chorlaví, que lleva las aguas residuales a la PTAR de El Milagro, la cual se encuentra colapsada debido al aumento de caudales de otros sectores que exceden su capacidad (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra, 2021).

Gráfico 2. Delimitación de la microcuenca del río Chorlaví



3.2. Morfometría de la microcuenca del río Chorlaví

La morfometría permite analizar estadísticamente las características físicas de la microcuenca del río Chorlaví, integrando variables de relieve, forma y drenaje. La evaluación del área, perímetro, y parámetros de forma permitió determinar la complejidad espacial del territorio y su dinámica hidrológica (Tabla 4).

Tabla 4. Características físicas de la microcuenca del río Chorlaví

PARÁMETROS DE FORMA		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Área	En la tabla de atributos: $A = 53.83 \text{ km}^2$ $A = 5383.56 \text{ Has}$	Según Arias-Muñoz et al. (2023) : de acuerdo con el área calculada se clasifica como: Microcuenca
Perímetro	$P = 39.87 \text{ km}$	De acuerdo con el perímetro calculado se clasifica como: Medio
Longitud axial	$La = 15.73 \text{ km}$	La longitud axial es la distancia máxima medida desde el punto de salida hacia la parte más distante de la cuenca, siguiendo la dirección del río principal
Ancho promedio	$Ap = 3.42 \text{ km}$	El ancho promedio es la distancia medida en sentido perpendicular a la longitud axial. La longitud axial y el ancho promedio forman el rectángulo equivalente de la cuenca
Altitud mínima	$H_{\text{mín}} = 1799 \text{ msnm}$	La cota mínima se encuentra en el punto de salida de la cuenca
Altitud máxima	$H_{\text{máx}} = 4436 \text{ msnm}$	La cota máxima se encuentra en la parte más alta de la cuenca
Coefficiente de compacidad	$Kc = 1.52$	El coeficiente de compacidad es la medida utilizada para comparar la forma de la cuenca con la de un círculo. Según el cálculo, la cuenca se clasifica como: Oval oblonga a rectangular oblonga
Factor forma	$Ff = 4.59$	Intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. Según el cálculo, la cuenca tiene un factor de forma: tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

PARÁMETROS DE RELIEVE		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Altitud media	$H_{\text{med}} = 2596.03 \text{ m}$	La altitud media corresponde a una cuenca de montaña.
Desnivel	$De = 2637 \text{ msnm}$	El desnivel de la cuenca o variación de altitud es de: 2637 msnm

Pendiente media	Pmed = 24.84 % Pmed = 13.94°	De acuerdo con el valor calculado, la cuenca tiene: relieve ondulado
------------------------	---------------------------------	---

PARÁMETROS HIDROLÓGICOS		
PARÁMETRO	CÁLCULO	INTERPRETACIÓN
Longitud del cauce principal	Lcp = 16.31 km Lcp = 16314.2 m	El cauce principal tiene una longitud: Media
Pendiente del cauce principal	Pcp = 11.03 %	La pendiente media del cauce principal es propia de ríos de montaña.
Tiempo de concentración	Tc = 1.33 h	El tiempo de concentración de la cuenca, es el tiempo que tarda en llegar la escorrentía superficial desde el punto más alejado del río hasta la salida de la cuenca.
Densidad de drenaje	=2.05 km ²	De acuerdo con la densidad de drenaje la cuenca es de tipo Dendrítico, donde los cursos de agua confluyen hacia el río principal formando una red de drenaje.
Numero de orden de ríos	Orden 4	La cuenca pertenece hidrológicamente al Orden 4, lo que implica un alto potencial erosivo.

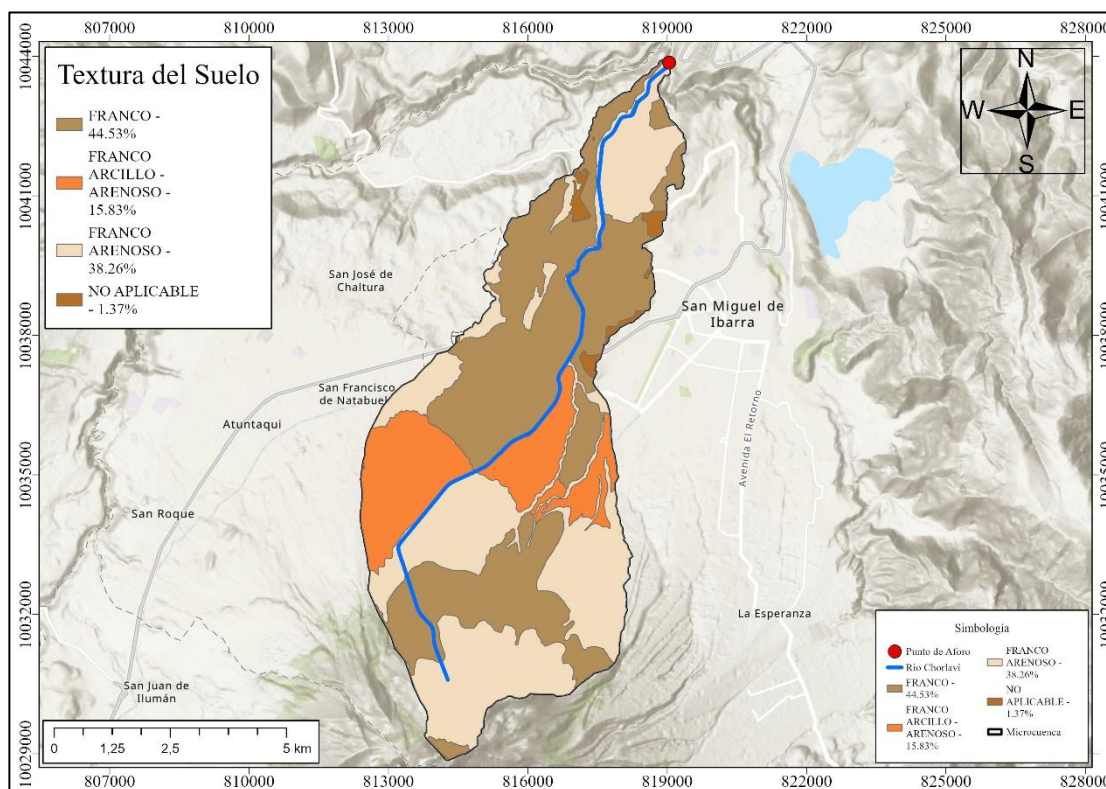
3.2.1. Edafología

La homogeneidad textural hacia el tipo Franco en una cuenca hidrológica representa un estado de equilibrio funcional sistémico. Minimizando los índices de erodabilidad al integrar las propiedades de consistencia de las arcillas con la capacidad de infiltración de las fracciones gruesas. Esto reduce la vulnerabilidad del área de

estudio antes eventos de precipitación extrema y favoreciendo la estabilidad de los horizontes superficiales. Dentro de la microcuenca existe una predominancia de textura Franco ocupando el 45.37% de la superficie con una extensión de 2397.37 ha, seguido en orden de representatividad por la textura Franco – Arenoso con 2059.8 ha y Franco Arcilloso – Arenoso con una superficie de 852.473 ha (Gráfico 3).

Para validar esta información se llevó a cabo una fase de campo para la recolección de muestras de suelos en puntos estratégicos como se presenta en el Anexo 10.

Gráfico 3. Edafología de la microcuenca del río Chorlavi



3.3. Métodos

La metodología de esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo de tipo transversal donde se basó en la aplicación RUSLE una herramienta ampliamente reconocida para estimar la tasa de erosión del suelo en terrenos agrícolas. y no agrícolas, fue fundamental para evaluar la sostenibilidad del uso del suelo y la conservación de los recursos hídricos y edáficos.

3.3.1. Cálculo de la Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica

Para el cálculo de la pérdida de erosión se aplicará la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Ecuación 2):

Ecuación 1

$$A = R * K * LS * C * P$$

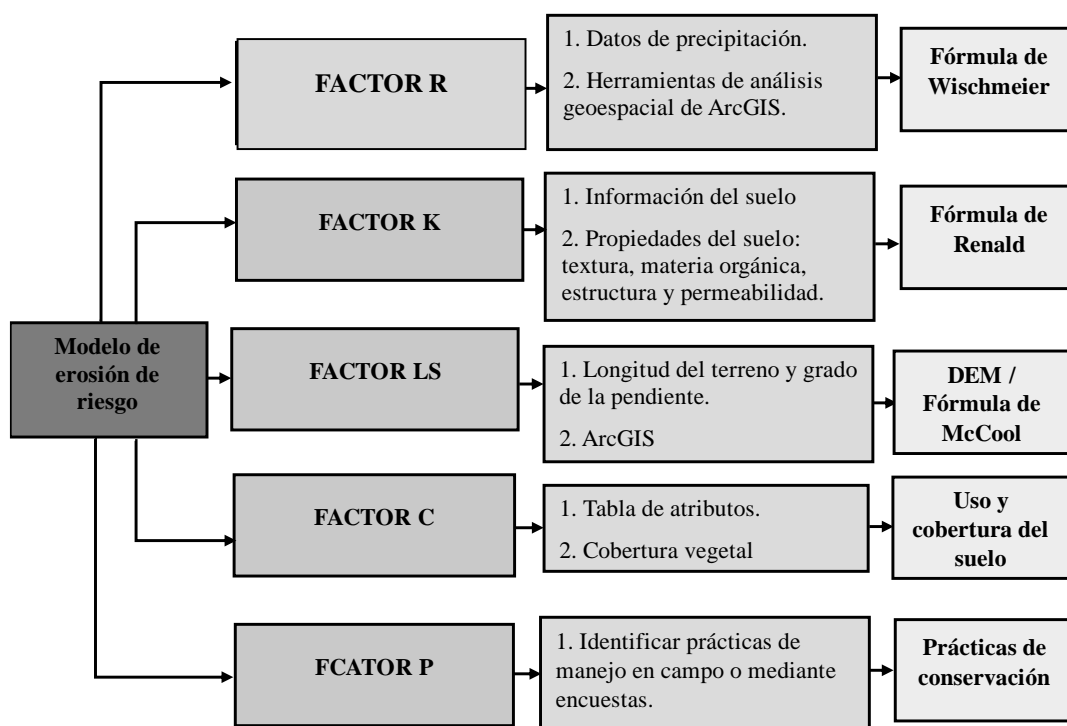
- A:** Pérdida de suelo (ton/ha/año)
- R:** Factor de erosividad de la lluvia (MJ*mm/ha*h*año)
- K:** Factor de erodabilidad del suelo (ton*h*ha/(ha*MJ*mm))
- LS:** Factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional)
- C:** Factor de cobertura y manejo del suelo (adimensional)
- P:** Factor de prácticas de conservación (adimensional)

El factor de erosividad (*R*) que representa la capacidad erosiva de la lluvia, que se calcularon a partir de la energía cinética total de la lluvia y la intensidad máxima en 30 minutos. Para calcular el factor de erodabilidad (*K*) que es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, que depende de sus propiedades físicas y químicas. Para los factores de longitud (*L*) y gradiente (*S*) de la pendiente siendo el efecto de la topografía en la erosión, calculados a partir de mediciones de campo o modelos digitales de elevación. Para estimar el factor de cobertura y manejo (*C*) que es el efecto de la vegetación y las

prácticas de manejo en la reducción de la erosión. Existen tablas con valores típicos para diferentes tipos de cultivos y coberturas. Para el factor de prácticas de conservación (P) que es el efecto de las medidas de conservación de suelos implementadas, como terrazas y cultivo en contorno. Para finalizar el cálculo la pérdida de suelo (A) que se utilizará la ecuación USLE y los valores de los factores determinados en los pasos anteriores (Arias-Muñoz et al., 2023).

Los insumos necesarios para calcular el modelo *RUSLE* se presentan en el Gráfico 4:

Gráfico 4. Insumos



Fuente: Adaptado de Arias-Muñoz et al. (2023)

3.3.2. Determinación del Factor R

El Factor R, también conocido como el factor de erosividad de la lluvia, representa la capacidad de la precipitación para causar erosión. Este factor se basa en la energía cinética de la lluvia, que es la fuerza que desintegre el suelo en partículas individuales, las cuales luego son trasladadas por salpicones o escorrentía. La energía cinética de la lluvia depende de las características físicas de las pequeñas o grandes partículas de las gotas, como su tamaño, masa y velocidad de caída. A mayor tamaño de gota, mayor será su masa y velocidad de caída, lo que se convierte en una mayor energía cinética de afectación y una mayor desagregación del suelo. Esto, a su vez, genera mayor deterioro de suelo por erosión (Ayma- Villagra, 2023). El Factor R se calculó ampliando la Ecuación 3 y como insumo se utilizó la precipitación de área de estudio para un período de 30 años.

Ecuación 2

$$\mathbf{Factor\ R} = \sum_{i=1}^{12} 1,735 * 10^{(1,5 \log_{10} \left(\frac{P_i^2}{P}\right) - 0,08188)}$$

Dónde

R: (x, y) es el Factor R (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹) en el tamaño de celda (x, y)

pi: es precipitación mensual (mm)

p: es una precipitación anual (mm).

3.3.3. Determinación del Factor K

El Factor K se calculó con datos obtenidos del archivo geoespacial de Geopedología del Ecuador (<http://www.sigtierras.gob.ec/geoportal/>) a escala 1:250000 y la Ecuación 4 propuesta por Neitsch et al. (2011), se tomaron muestras representativas

de suelo en puntos estratégicos de la microcuenca para un análisis en laboratorio para corroborar la información obtenida.

Ecuación 3

$$\mathbf{K}_{USLE} = f_{sand} * f_{ci-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$$

Donde:

K_{USLE}: erodabilidad del suelo modelo RUSLE

fsand: contenido de arena

fcl-si: contenido de arcilla y limo

forge: contenido de carbono orgánico

fhisand: altos contenidos de arena

Para ajustar la ecuación **K_{USLE}** al modelo RUSLE fue necesario aplicar un factor de conversión de 0.1317 (Ecuación 5)

Ecuación 4

$$\mathbf{K}_{USLE} = K * 0.1317$$

Donde **K_{USLE}** representa la erodabilidad del suelo expresada en ton*h*ha/ha*MJ*mm, compatible con el modelo RUSLE. La ecuación empleada para estimar los factores a partir de las propiedades físicas y químicas del suelo se detallan en la Ecuación 6.

Ecuación 5

$$f_{csand} = \{0.2 + 0.3 * \exp[-0.256 * m_s * (1 - \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}})]\}$$

Ecuación 6

$$f_{ci-si} = (\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}})^{0,3}$$

Ecuación 7

$$f_{orgc} = \left\{ 1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp(3.75 - 2.95 \times orgC)} \right\}$$

Ecuación 8

$$f_{hisand} = \left\{ 1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right\}$$

Donde

m_s: porcentaje de arena
m_{silt}: porcentaje de limo
m_c: porcentaje de arcilla
orgC: porcentaje de SOC

Una vez que se determinó los valores del Factor K para cada muestra de suelo, se empleó un sistema de información geográfica (SIG) para interpolar estos valores y crear un mapa de erosionabilidad del suelo en toda la microcuenca.

Se validaron los resultados del Factor K obtenidos mediante observaciones de campo y datos de erodabilidad ya existentes en la microcuenca.

3.3.4. Determinación del Factor LS

El Factor LS es la combinación de la inclinación de la pendiente y su longitud, por lo tanto, este aumento causa el incremento de la erosión hídrica (Arias-Muñoz et al., 2023). Utilizando la plataforma Open Topography, se adquirió un Modelo de Elevación de 30 m de resolución para el análisis del relieve. Posteriormente, este insumo digital se integró mediante el cálculo de la Ecuación 10 la cual fue establecida

por McCool (Renald et al., 1994). También el grado de la pendiente que se expresa típicamente como porcentaje o en grados, de igual manera la información sobre el perfil de la pendiente, que puede ser cóncavo, convexo o recto (Ramos-Arboleda & Sánchez-Pullas, 2023).

Ecuación 9

$$LS = \left(\frac{\text{flow accumulation} \times \text{cell size}}{22.13} \right)^{0.4} \left(\frac{\text{sin slope}}{0.0896} \right)^{1.3}$$

Donde

LS: longitud de la pendiente y pendiente inclinada

Flow accumulation: número de celdas que contribuyen al flujo de una celda dada

Cell size: tamaño de las celdas que es de 30 m, 22.13: constante de la longitud

Sin slope: es el *Seno* de la pendiente en radianes

3.3.5. Determinación del Factor C

El Factor C determina como la cobertura y el manejo del suelo influyen en la erosión, este factor analiza cómo distintos tipos de vegetación y prácticas agrícolas pueden proteger o exponer el suelo a la erosión hídrica. Arias-Muñoz et al. (2023) establecen valores para el factor en su estudio, los cuales se consideraron como referencia para el presente estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Valores del factor C

Cobertura del Suelo	Factor C
Bosque	0.01
Matorral	0.035
Páramo	0.040
Pastizal	0.037

Cultivos	0.35
Roca	0
Zona Urbana	0

Fuente: Arias-Muñoz et al. (2023)

Hay que tomar en cuenta el tipo de insumos para este factor, que pueden ser la información detallada sobre la cobertura vegetativa que está presente en el área a estudiar. La clasificación de la densidad y cobertura, estos datos se agregarán al realizar la práctica del manejo del suelo. Así mismo se incluyen los mapas de uso de suelo en donde se identificaron las áreas específicas de entrenamiento designadas (Ramos-Arboleda & Sánchez-Pullas, 2023).

3.3.6. Evaluación del Riesgo de Erosión

Para llevar a cabo la evaluación del riesgo de erosión, fue esencial considerar varios procesos e insumos. Los procesos incluyen la determinación de factores que influyen en la erosión, como la capacidad erosiva de las lluvias, la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, la longitud e inclinación de la pendiente, la protección proporcionada por las coberturas vegetales y las prácticas de conservación (Tabla 6). Fue crucial estimar las pérdidas potenciales de suelo utilizando modelos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*RUSLE*). El uso de tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitió modelar y analizar el proceso erosivo con un enfoque. (Ramos-Arboleda & Sánchez-Pullas, 2023).

Los insumos necesarios para esta evaluación incluyeron datos climáticos, especialmente registros diarios de lluvia para estimar la capacidad erosiva, y características del suelo como textura, estructura, materia orgánica y profundidad del

primer horizonte. También se requirió información topográfica, que incluye la longitud y el gradiente de la pendiente, así como datos sobre la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo. Mapas de suelos y otros datos espaciales fueron fundamentales para aplicar la metodología en un SIG, que facilita un análisis detallado y preciso del riesgo de erosión (Ayma- Villagra, 2023).

Tabla 6. *Categorías de erosión y sus principales características*

Tasa de erosión (ton/ha/año)	Categorías	Característica
0	Nula	Zonas no susceptibles al proceso erosivo como zonas urbanas, embalses, entre otros.
0 – 15	Muy baja	Zonas con niveles erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables.
15 – 25	Baja	Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser tolerables.
25 – 50	Moderada	Zonas con procesos erosivos leves, existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista.
> 50	Alta	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables

Fuente: (El Jazouli et al., 2017)

3.4. Validación del Modelo *RUSLE*

Para la comprobación del modelo *RUSLE*, se aplicó la metodología propuesta por Ebrahimzadeh et al. (2018), permitiendo estimar la producción de sedimentos (*sediment yield*). Esta variable cuantifica la carga sedimentaria neta transportada hasta la parte baja de la microcuenca (Ecuación 11).

Ecuación 10

$$SY = A * SDR$$

Donde:

SY = producción total de sedimentos (mm)

A = pérdida anual del suelo (mm)

SDR = cantidad estimada de suelo erosionada (mm)

La determinación del valor de SY se basó en la integración de los datos empíricos obtenidos en el área de estudio y los resultados simulados por el modelo RUSLE. En la fase de campo, se valoró el SY a partir de la Concentración de Sólidos Suspendedos (CSS) y su correlación con el caudal medio anual. Estos registros se contrastaron con los valores simulados para fundamentar el proceso de validación, de acuerdo con Tsegaye & Bharti (2021) permite cuantificar la erosión del suelo en función de la longitud de la pendiente (Ecuación 12).

Ecuación 11

$$SDR = 0.5656 * S^{-0.11}$$

Donde:

0.5656 = constante adimensional

S = superficie de la microcuenca (km²)

-0.11 = exponente que expresa la relación inversa entre el tamaño de la microcuenca y el SDR

La validación del modelo se realizó contrastando los valores de producción de sedimentos simulados (SY) frente a los observados en campo, basándose en el conjunto de 12 muestras (Gráfico 5). Para cuantificar el desempeño del modelo, se emplearon

indicadores estadísticos de sesgo porcentual (Ecuación 13) (PBIAS) y la raíz del error cuadrático medio (Ecuación 14) (RMSE). Siguiendo los criterios de Moriasi et al. (2015), el PBIAS evalúa la tendencia del sesgo: valores positivos indican subestimación y negativos sobrestimación, considerándose un ajuste para los sedimentos a escala de la microcuenca si el valor se mantiene en el rango de $\pm 55\%$.

Ecuación 12

$$PBias = \frac{\sum(SY_{ob} - SY_{sim})(100)}{\sum SY_{ob}}$$

Donde:

SY_{ob} = sedimentos observados (ton/ha/año)

SY_{sim} = sedimentos simulados (ton/ha/año)

Ecuación 13

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(SY_{sf} - SY_{rg})^2}{n}}$$

Donde:

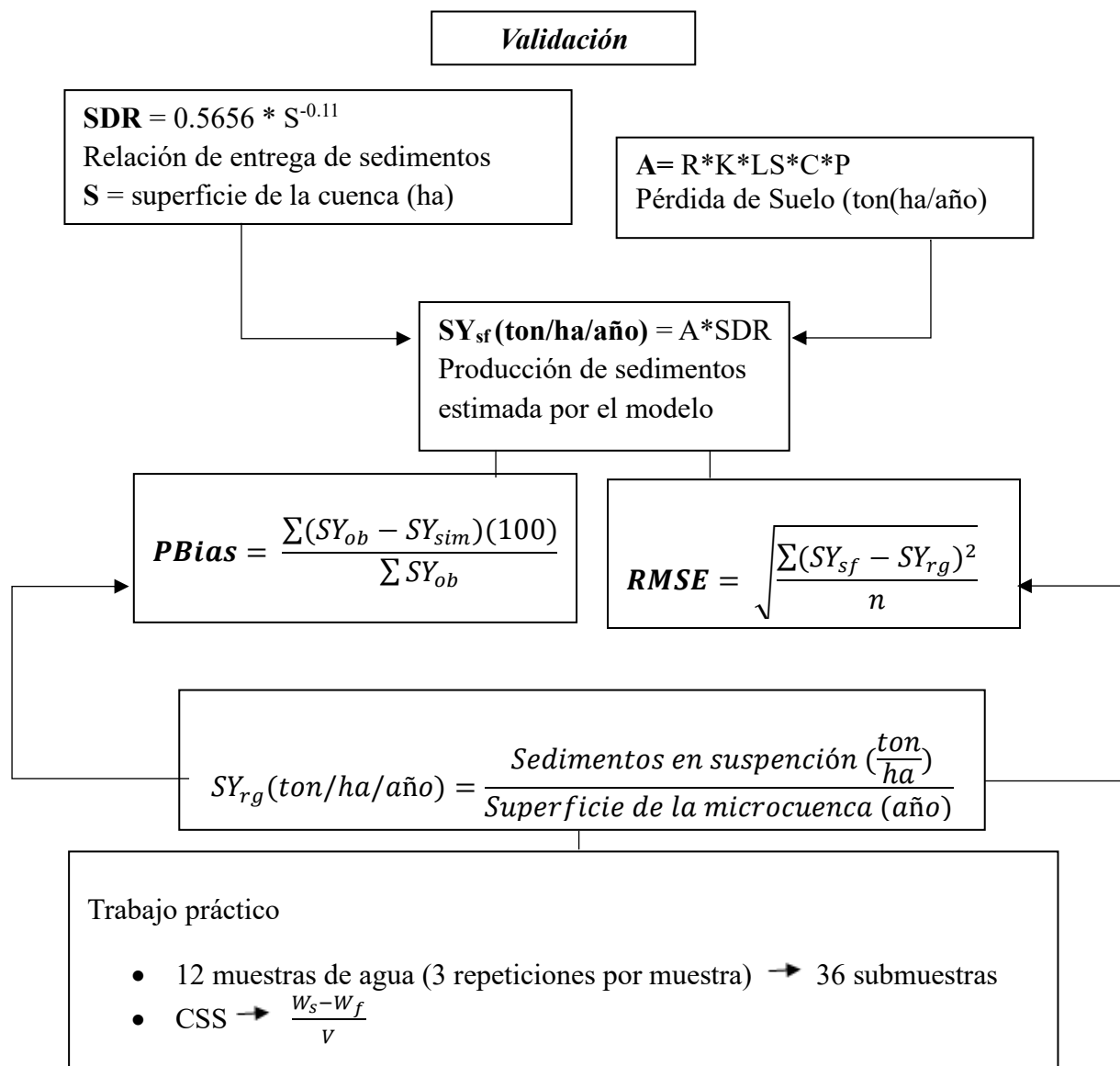
SY_{sf} = sedimentos calculados por el modelo (ton/ha/año)

SY_{rg} = sedimentos observados a registrados (ton/ha/año)

n = número total de observaciones utilizadas en comparación

$\sum(SY_{sf} - SY_{rg})$ = suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores calculados y observados

Gráfico 5. Esquema metodológico de la validación del modelo RUSLE

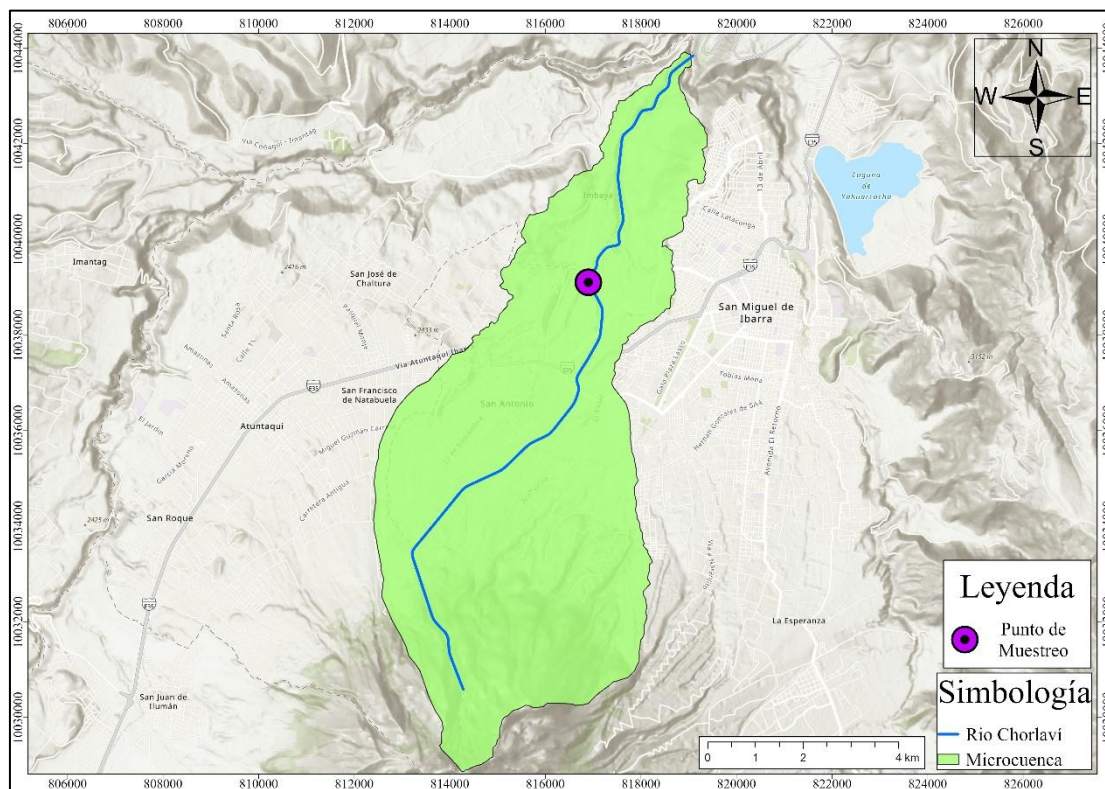


3.4.1. Muestreo del Agua y Análisis en Laboratorio

El protocolo de muestreo de agua estuvo compuesto por 12 fases de recolección bajo un criterio de representación estacional de la microcuenca en las coordenadas 816899 E, 10039100 N con una altitud de 2151 m.s.n.m. (Gráfico 6 y 7). Se priorizó el

análisis comparativo entre las estaciones de estiaje y precipitación intensiva tomando en cuenta que la dinámica de transporte de los sedimentos y la carga aluvial que presentan una dependencia directa con la variación del caudal. La concentración de sólidos se expresa generalmente en mg/L.

Gráfico 6. Punto de muestreo de agua



Posteriormente, con las muestras obtenidas se analizó en el laboratorio la concentración de sólidos suspendidos (Ecuación 15) (CSS). La masa de sólidos se obtiene por gravimetría, método que consistió en determinar la cantidad exacta de una sustancia mediante la medición de su masa, separando sus variaciones de peso tras un cambio químico controlado. (Moore & Wilson, 1992). En cada muestra se realizó un

total de tres repeticiones, obtenido así un total de 36 submuestras en el cual se utilizó un filtro de microfibra de vidrio GF2 de 0.1 μm para la concentración de sólidos suspendidos (*ASTM International*, 2019).

Ecuación 14

$$CSS = \frac{W_s - W_f}{V}$$

Donde:

W_s = peso del filtro con sedimentos secos (mg)

W_f = peso del filtro vacío (mg)

V = volumen de agua filtrada (L)

A posteriori se multiplico con el caudal (m^3/s) para obtener el dato de sedimentos en suspensión (kg/s) (Ecuación 16).

Ecuación 15

$$\text{Sedimentos en Suspensión} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = CSS * Qx$$

Donde:

CSS = concentración de sólidos suspendidos (mg/L)

Qx = caudal de la microcuenca (m^3/s)

La cifra obtenida se transformó en ton/año y se multiplicó por la superficie de la microcuenca para obtener el valor en ton/ha/año (Ecuación 17).

Ecuación 16

$$SS = \frac{SS \left(\frac{kg}{s} \right) * 3600 * 24 * 365}{1000}$$

Donde:

SS = sedimentos en suspensión

Gráfico 7. Toma de muestra de agua



3.5. Estrategias de Manejo de Conservación

La caracterización de la vulnerabilidad erosiva en la microcuenca del río Chorlaví se articuló mediante un diagnóstico estratégico basado en la técnica FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). Este marco analítico permitió decodificar la compleja interacción entre las actividades antrópicas, el estado biofísico del suelo y las respuestas ecosistémicas, fundamentando así el diseño de estrategias de conservación bajo el criterio de sostenibilidad Nikulin & Becker (2015).

El proceso metodológico integró los resultados del modelo RUSLE, la zonificación del riesgo erosivo y la capacidad de uso potencial del área de estudio. La síntesis de estas variables derivó en una matriz de estrategias transversales (FO, FA, DO, DA), las cuales fueron validadas mediante la superposición cartográfica de tres ejes críticos: la aptitud física del suelo, la identificación de conflictos por sobre uso y subuso del suelo, y la jerarquización de clases agrologicas (III a VIII) según su restricción productiva y sensibilidad ambiental.

3.6. Materiales y Equipos

Para esta investigación se requirieron diversos materiales, equipos e insumos que permitieron una evaluación precisa de la erosión del suelo mediante la ecuación RUSLE (Tabla 7).

Tabla 7. Materiales, equipos e insumos de investigación

Materiales
Cartografía Digital
Base de Datos
Barreno
Imágenes Satelitales
Cilindros Metálicos
Probetas para Muestras de Agua
Pipetas para Muestras de Agua
Software de SIG
Equipos
GPS
Balanza
Horno
Computador
Cámara fotográfica
Vehículo
USB
Insumos
Ropa de Campo
Botas de Caucho
Guantes Quirúrgicos
Martillo de Goma
Metro
Pala de Desfonde
Etiquetas para Muestras
Libreta de Campo

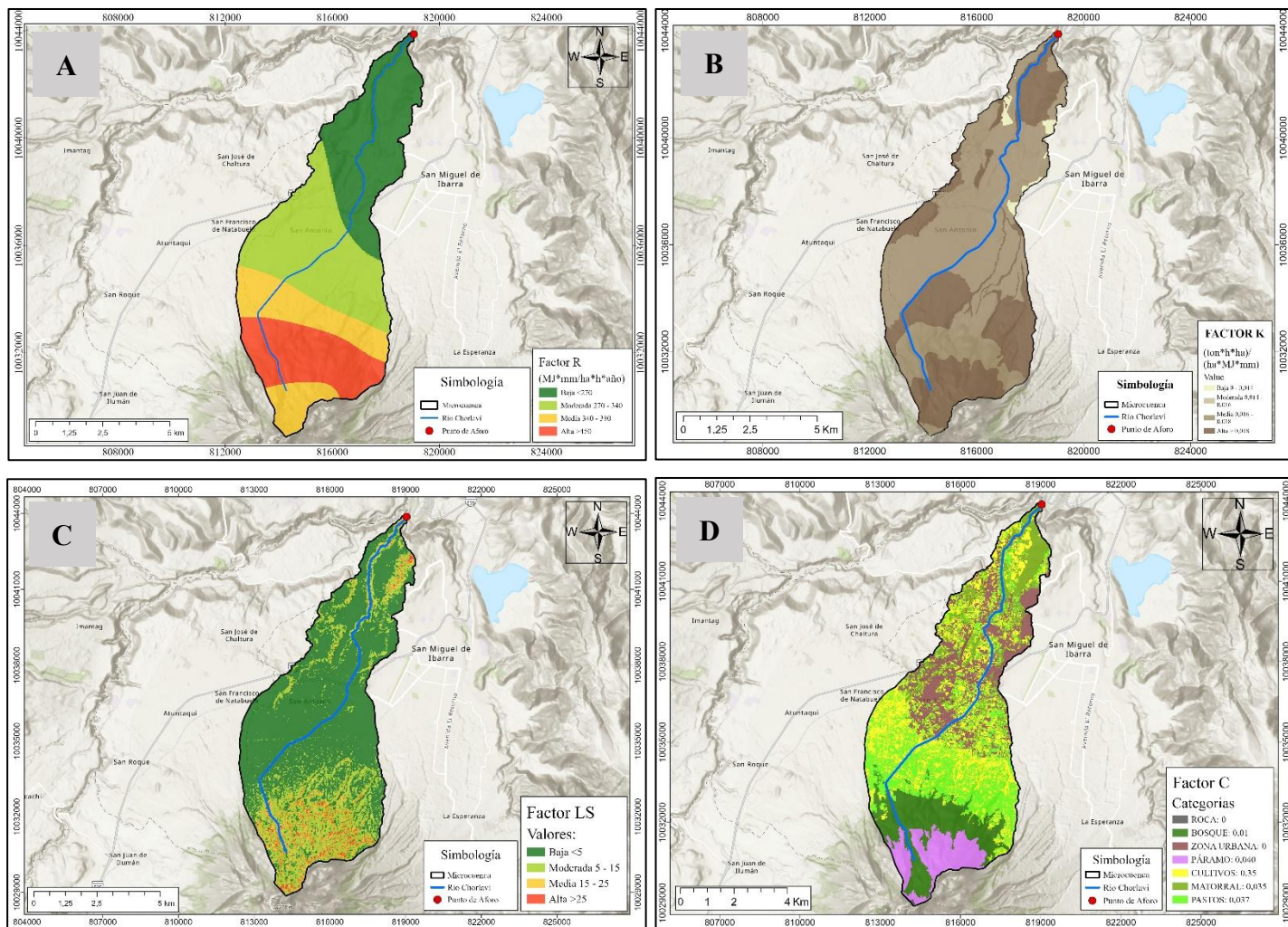
CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Zonificación del riesgo de erosión hídrica y determinación de la Pérdida de Suelo

En la Gráfico 8 se presenta la distribución espacial de los factores RUSLE calculados para la microcuenca hidrográfica. Esta unidad hidrológica exhibe niveles de erosividad clasificados en cuatro categorías, de baja a alta. Las zonas con valores inferiores a 270 (MJ*mm/ha*h*año), indican una erosividad baja, asociada a precipitaciones de menor intensidad erosiva, mientras que los valores superiores a 450 (MJ*mm/ha*h*año) corresponden a áreas donde la lluvia tiene una mayor capacidad erosiva, provocando una erosión hídrica considerable del suelo dentro del área de estudio (Gráfico 8a).

Gráfico 8. Factores del modelo RUSLE



La erodabilidad, por su parte, indica la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión y está determinada por sus propiedades físicas y químicas (Jaya-Santillán, 2023). Un parámetro condicionado por la compleja interacción entre el contenido de materia orgánica, la estabilidad estructural y la permeabilidad hídrica. Reflejando la susceptibilidad de los suelos a la erosión, los valores calculados van desde 0 y 0.018 ton*h*ha/ha*MJ*mm (Gráfico 8b). El área de estudio presenta erodabilidad muy baja, lo cual representa una de las condiciones de mayor estabilidad estructural para un suelo

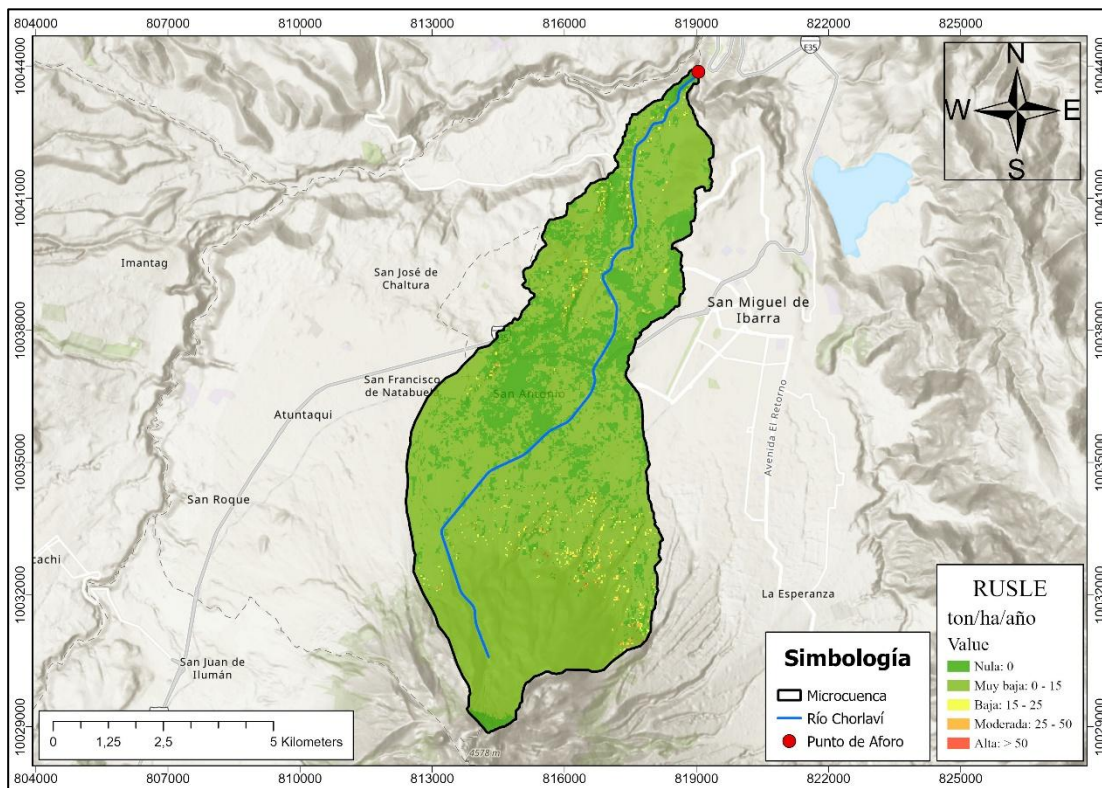
bajo el modelo RUSLE. (Correa et al., 2016). Con una distribución de las texturas en la microcuenca tiene una predominancia de la clase Franco con el 44.53 %, seguida de la clase Franco – Arenoso con 38.26 % y Franco – Arcilloso – Arenoso registra un 15.83 %.

La longitud de pendiente en el área de estudio los valores varían entre 0 y 25, los valores más elevados son de 15 – 25 que están localizados en las áreas con mayor inclinación de la pendiente y relieve montañoso (Gráfico 8c). La mayor parte de la microcuenca presenta zonas ligeramente planas con baja erodabilidad, donde se acumulan sedimentos, mientras que las pendientes onduladas y montañosas concentran los valores más altos, lo que vuelve el suelo más vulnerable a la pérdida de materia orgánica y al desprendimiento de partículas por la acción de la lluvia. Por otro lado, y de forma complementaria, se presenta la distribución del Factor C, que determina la influencia de la cobertura de suelo en la erosión.

Los resultados indican que las zonas urbanas y rocosas tienen un valor de 0 debido al proceso de impermeabilización, mientras que los cultivos aceleran los procesos erosivos frente a la cobertura boscosa, el páramo y la vegetación arbustiva, que actúan como escudo ante los procesos erosivos hídricos (Gráfico 8d). Finalmente, ante la ausencia de estrategias de mitigación en la microcuenca del río Chorlaví, se aplicó el coeficiente de prácticas de conservación de uno (1), siguiendo los lineamientos de Vijith et al. (2018), ya que en el área de estudio no se aplican prácticas de conservación de suelo.

Esta realidad es confirmada por Haro et al. (2024) quienes identificaron que en la región andina ecuatoriana enfrenta malas gestiones agrícolas y la deforestación, factores que afectan al terreno directamente en su cobertura vegetal y exacerbaban los procesos erosivos. La magnitud de este fenómeno es particularmente crítica en el sector norte, donde las investigaciones de Haro et al. (2024) señalan un aumento de estas prácticas en alrededor 16 %, siendo una tendencia alarmante. El resultado final de la combinación de estos factores genera un valor promedio en la erosión hídrica de 1.69 ton/ha/año y una fluctuación entre 0 a 77 t/ha/año, es decir que la erosión es baja y solo en áreas sin cobertura vegetal es crítica (Gráfico 9).

Gráfico 9. Erosión hídrica en la microcuenca del río Chorlaví



La microcuenca del río Chorlaví muestra cinco categorías de erosión, que van desde nula hasta alta. Los valores del modelo evidencian que las áreas de bajo riesgo de erosión (25– 50 ton/ha/año y > 50 ton/ha/año) representan zonas de desequilibrio crítico en las que se supera la pérdida de suelo. En estos sectores, la convergencia de pendientes pronunciadas y una escasa cobertura vegetal favorecen la aceleración del transporte de sedimentos. Las zonas con alta erosión son propensas a sufrir daños severos si no se implementan medidas efectivas para mitigarla. En la cuenca predominan los rangos de erosión nula y muy baja, lo que se atribuye a los valores reducidos de los factores del modelo *RUSLE*, influenciados por la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal.

4.2. Validación del Modelo *RUSLE*

En la validación del modelo dentro del área de estudio determinó una Relación de Entrega de Sedimentos (SDR) de 0.22, lo que implica que el 22% del material erosionado es transportado hacia el punto de aforo. Bajo este parámetro, la modelación predictiva estimó una producción de sedimentos (SY) de 0.37 ton/ha/año. El caudal calculado de la microcuenca fue de 1.49 m³/s, mediante el método de transferencia de caudales, utilizando como cuenca contenedora la cuenca río Mira. Con estos resultados se contrastó con la carga sedimentaria obtenida en campo, calculada mediante la integración de la concentración de sólidos suspendidos y el caudal instantáneo.

El indicador estadístico PBIAS reveló un sesgo positivo del 26.05%, lo que sitúa el modelo dentro de un umbral “bueno” de acuerdo con la clasificación de Moriasi et al. (2015) Para la evaluación del modelo RUSLE en la microcuenca del río Chorlaví reveló un Error Cuadrático Medio (RMSE) de 0.40, evidenciando una alta precisión en la estimación de erosión hídrica. Estos indicadores fueron esenciales para alcanzar una validación técnica rigurosa, el uso simultáneo de ambos indicadores permitió detectar el sesgo acumulado.

Tabla 8. *Sedimentos en suspensión (ton/ha/año)*

N° de Muestra	SY_{ob}	SY_{sim}
1	1.48	0.37
2	0.73	0.37
3	0.14	0.37
4	0.26	0.37
5	0.24	0.37
6	0.21	0.37
7	0.11	0.37
8	0.27	0.37
9	0.75	0.37
10	0.68	0.37
11	0.72	0.37
12	0.35	0.37
Promedio	0.49	

4.3. Discusión

El análisis comparativo del Factor R evidenció una heterogeneidad espacial significativa que condiciona las tasas de pérdida de suelo en la región. Mientras que en la cuenca del río Mira se observa un rango de variabilidad entre 208.91 y 1.954.90 MJ mm/ha*h*año. La microcuenca del río Chorlaví tiene 1.69 ton/ha/año, lo cual se encuentra ligado a la distribución vertical de la precipitación. Es notable que, en ambos

sistemas, la mayor capacidad degradativa de la lluvia se concentra en los pisos altitudinales inferiores a 133 - 1.719 m.s.n.m., donde los valores de erosividad superan el umbral de los 450 MJ mm/ha*h*año (Arias-Muñoz et al., 2023).

Esta dinámica de "erosividad inversa" respecto a la altitud sugiere que, a medida que el gradiente asciende hacia las secciones altas 3.305 - 4.892 m.s.n.m., el potencial de desprendimiento de partículas disminuye, situándose por debajo de los 270 MJ*mm/ha*h*año. Esto junto con Arias-Muñoz et al. (2023) la estructura de la vegetación de montaña presenta su dinámica de intercepción pluvial, el proceso de impermeabilización en zonas urbanas y roca, con un valor de 0, introduce una variable de control hidrológico donde hay ausencia de erosión hídrica.

Tal comportamiento es consistente con los hallazgos en la microcuenca, donde la baja intensidad erosiva de las precipitaciones en las zonas de mayor elevación, la presencia de bosques y páramo, actúan como un factor de protección natural que limita la erosión hídrica a valores mínimos (Wischmeier & Smith, 1978). Por lo tanto, se puede inferir que el relieve de la zona no solo determina la zonificación climática, sino que establece un límite de seguridad edáfica en la parte alta de la cuenca, contrastando con la vulnerabilidad observada en los valles bajos donde la energía cinética de la lluvia se intensifica considerablemente(Arias-Muñoz et al., 2023).

Por otro lado, la erodabilidad de la microcuenca del río Chorlaví, los valores registrados fluctúan entre 0 y 0.018 ton*ha*h/ha*MJ*mm, una magnitud sensiblemente inferior a los rangos observados en la cuenca del río Mira, donde el

Factor K alcanza umbrales de hasta 0.11 ton*h*ha/ha*MJ*mm (Ochoa-Cueva et al., 2015). Esta diferencia es significativa; mientras que en el río Mira los sectores con valores elevados evidencian una predisposición crítica al desprendimiento de partículas y a la pérdida acelerada de materia orgánica. La microcuenca presenta una clasificación de erodabilidad "muy baja", lo que denota una de las condiciones de mayor estabilidad estructural bajo el modelo RUSLE.

El factor de longitud y grado de pendiente (LS) constituye el principal catalizador del transporte de sedimentos por escorrentía superficial. En la cuenca del río Mira, los valores LS alcanzan un máximo de 67. Esta última magnitud refleja una capacidad de transporte hídrico significativamente superior a la registrada en la microcuenca del río Chorlaví, donde los valores oscilan en un rango más conservador de 0 a 25 (Arias-Muñoz et al., 2023). Al situar estos datos en un contexto global, se observa que el río Mira presenta una analogía estructural con las cuencas del noreste de la India, cuyos valores máximos de 53.5 ratifican la agresividad de los sistemas montañosos de alta energía. (Wischmeier & Smith, 1978) En ambos casos, la topografía extrema actúa como un multiplicador de la velocidad del flujo, validando los postulados de Moore & Wilson (1992) sobre la relación directamente proporcional entre la longitud de la vertiente y la pérdida de suelo.

Aunque los valores máximos de longitud de pendiente (15 – 25) se concentran de manera previsible en las zonas de mayor inclinación y relieve escarpado, la menor amplitud del Factor LS sugiere un potencial de degradación más controlado en comparación con los sistemas del río Mira y la India (Ochoa-Cueva et al., 2015). Esta

diferencia no es meramente numérica; implica que la Microcuenca posee una longitud de vertiente que, a pesar de su relieve montañoso, limita la acumulación de energía cinética del agua antes de encontrar zonas de deposición o ruptura de pendiente. Por lo tanto, mientras que en el río Mira y el noreste de la India la severidad erosiva está dominada por la continuidad de pendientes extremas, en la microcuenca la fragmentación del relieve parece actuar como un mecanismo de regulación natural, manteniendo la tasa de erosión hídrica en niveles que no alcanzan la magnitud crítica observada en las cuencas de referencia internacional (Arias-Muñoz et al., 2023).

4.4. Prácticas de Conservación del Suelo para Mitigar Áreas Vulnerables a la Erosión Hídrica

Esta propuesta estratégica se articula con un enfoque de gestión sistémica de paisajes degradados, partiendo de los diagnósticos obtenidos en la microcuenca del río Chorlaví. El propósito es intervenir en el conflicto por suso y reducir la tasa de pérdida de suelo en las áreas con vulnerabilidad erosiva alta detectadas mediante el modelo RUSLE (Gráfico 12). Se señalan las directrices estratégicas diseñadas para el área de estudio (5383.56 ha), integrando criterios de sostenibilidad edáfica y resiliencia hidrológica.

La importancia de estas estrategias se radica en la capacidad para preservar la potencialidad edafológica de la microcuenca, protegiendo el 19.53% de los suelos de Clase III, estos terrenos son el soporte vital de la parroquia San Antonio mediante la preservación de la fertilidad y los ciclos biogeoquímicos (Gráfico 10 y 11).

Considerando la topografía de Imbabura, estas intervenciones actúan como un sistema de filtración biomecánica que regula la esorrentía. En un área de 5383.56 ha, donde el 46.35% del territorio enfrenta conflictos por uso y el modelo RUSLE previene pérdidas superiores a las 50 ton/ha/año en sectores críticos, la intervención técnica se constituye en el eje articulador de la resiliencia regional.

Gráfico 10. *Uso potencial del suelo de la microcuenca del río Chorlaví*

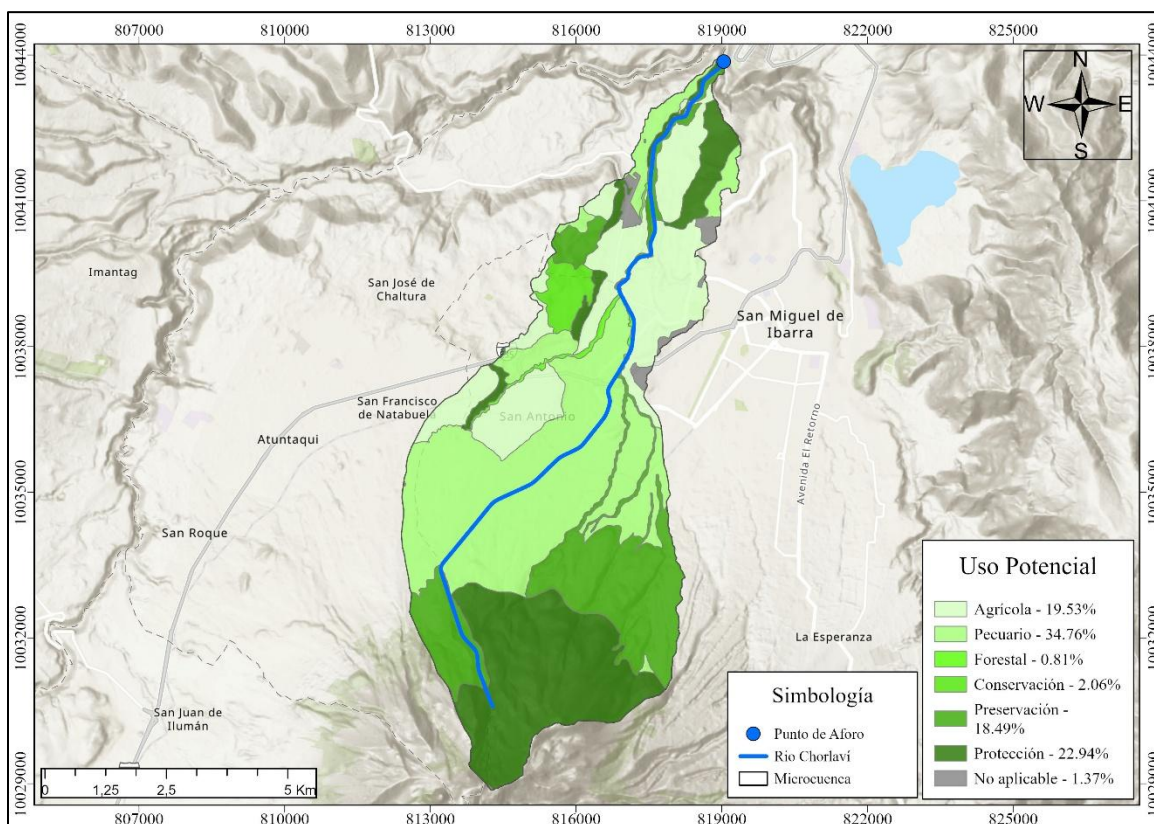
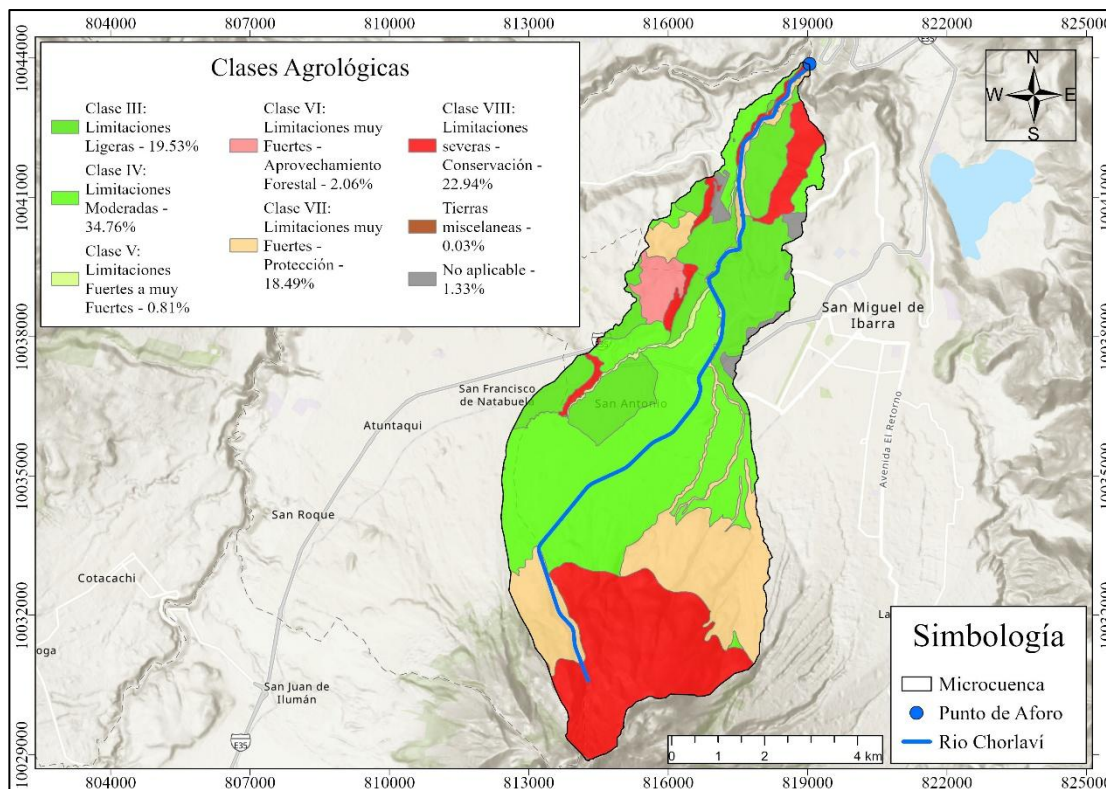
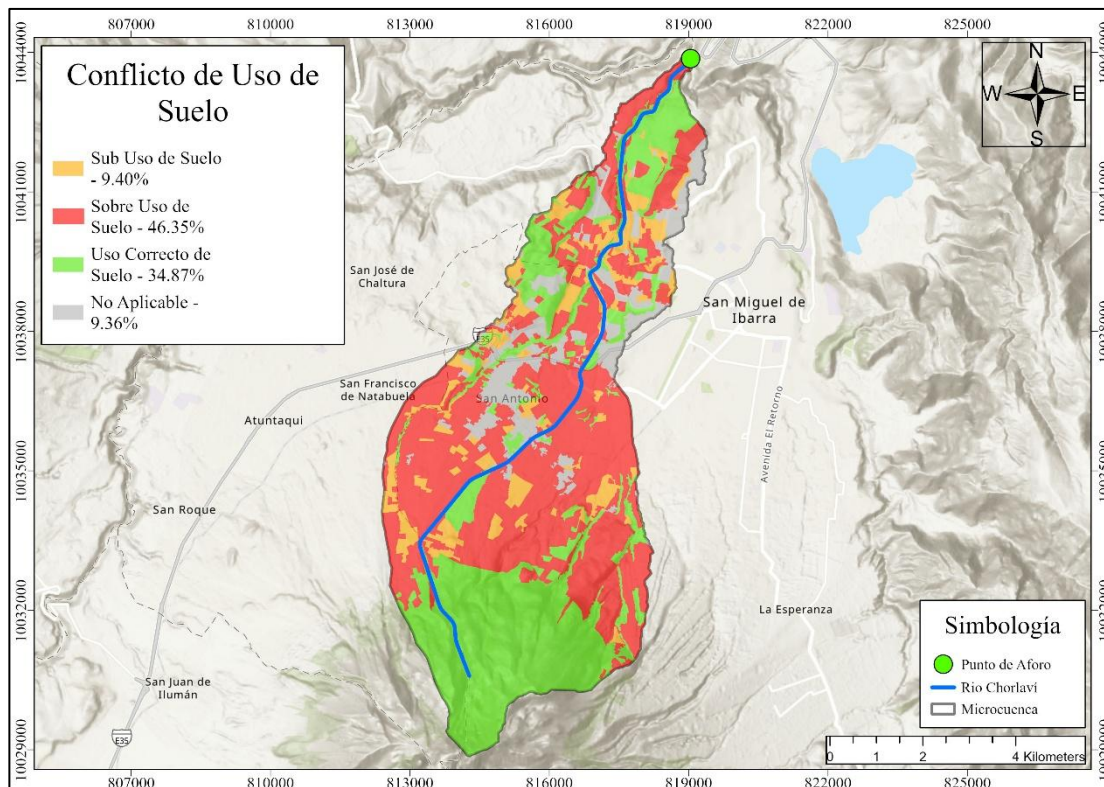


Gráfico 11. Clases agrológicas de la Microcuenca del río Chorlaví



Al intervenir en las 1235.19 ha destinadas a protección, se logra mitigar los problemas entre la vocación y el uso actual del suelo, transitando de un modelo de explotación degradativa hacia un aprovechamiento racional que minimiza los riesgos de remoción en masa y fortalece la capacidad de adaptación ecosistémica ante el cambio climático.

Gráfico 12. Conflictos de uso de suelo de la microcuenca del río Chorlaví



4.4.1. Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas

Para la gestión ambiental en la microcuenca del río Chorlaví se sistematizó un análisis FODA, segregando aquellas variables críticas, tanto endógenas como exógenas que actúan como barreras en la ejecución de prácticas de conservación (Tabla 9).

Tabla 9. Matriz FODA de la microcuenca del río Chorlaví

Fortalezas	Oportunidades
F1: Existencia de un 34.87% de uso correcto del suelo, lo que evidencia una gestión territorial que une la aptitud natural con la actividad antrópica.	O1: Presencia de un 9.40% de territorio en condición del uso, lo que permite la implementación de programas de intensificación agroecológica o restauración forestal sin conflicto.
F2: Presencia de un núcleo de preservación (18.49%) y protección (22.94%) que actúa como regulador hídrico y reserva de biodiversidad en las zonas altas.	O2: El aprovechamiento de zonas con aptitud forestal (2.06%) busca robustecer la resiliencia del paisaje. Al diversificar los modelos silviculturales, se garantiza un entorno más adaptable y con mayor estabilidad estructural.
F3: El (19.53%) de Clase III, ofrece una base productiva con restricciones mínimas. Es clave para escalar modelos de agricultura y asegurar el abastecimiento.	O3: Identificar áreas con erosión mínima permite aplicar medidas preventivas de bajo costo. La prioridad aquí es blindar la cobertura vegetal existente antes de que de inicien procesos de degradación irreversibles.
F4: Coincidencia entre la vocación de conservación (2.06%) y la aptitud de suelos de Clase VI, reduciendo los riesgos de degradación por intervención antrópica.	O4: Posibilidad de interconectar las zonas de Clase VII y VIII para consolidar corredores biológicos que mitiguen el aislamiento ecosistémico en la microcuenca.
Debilidades	Amenazas
D1: Alta prevalencia del uso del suelo (46.35%), indicando una presión productiva que excede la capacidad de carga y la capacidad de adaptación del ecosistema.	A1: Los enclaves con erosión moderada y crítica aceleran la pérdida. Esta dinámica comprende la funcionalidad hidráulica del río y degrada la integridad estructural del suelo.
D2: El 41.43% del territorio presenta limitaciones severas (Clase VII y VIII), asociadas a pendientes pronunciadas y suelos frágiles, restringiendo la expansión agrícola.	A2: Alta susceptibilidad a la degradación hídrica en sectores con pendientes pronunciadas, donde el Factor LS del modelo RUSLE agrava el desprendimiento de partículas del suelo.
D3: Déficit crítico de cobertura vegetal, representando apenas el 0.81% del uso potencial, lo que reduce el escudo protector al impacto pluvial.	A3: Disminución de la capacidad de infiltración por el uso intensivo en zonas de Clase IV (34.76%), aumentando el volumen de

D4: Ausencia de prácticas de conservación sistémicas en zonas de uso pecuario (34.76%), lo que incrementa la vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos.	escorrentía superficial hacia la microcuenca del río Chorlaví. A4: Riesgo de transporte de sedimentos hacia el río Tahuando, afectando la calidad hídrica de este cuerpo receptor debido a la erosión activa.
---	--

4.4.2. Diseño de Estrategias

Mediante el análisis de la unidad hidrológica de la microcuenca del río Chorlaví, se considera que las inconsistencias en el manejo del recurso suelo se han desempeñado como agentes aceleradores de la degradación ecosistémica y la pérdida de cohesión estructural del terreno. En respuesta a esta problemática, se han establecido tres estrategias vinculadas con la zonificación de la vulnerabilidad erosiva. Dicha planificación se fundamenta en la aplicación de la matriz FODA, herramienta que permite una síntesis diagnóstica precisa para la orientación, recuperación y manejo sostenible (Tabla 10).

Tabla 10. Matriz de estrategias FA, FO, DO, DA derivadas del análisis FODA de la microcuenca del río Chorlaví

Tipo	Combinación	Estrategia derivada
FO	F3+O1	Potenciación del 19.53% de suelos Clase III mediante la incorporación de las zonas en Subuso (9.40%) bajo modelos de agricultura de precisión, maximizando el rendimiento sin degradar la estructura edáfica.
FO	F2+O4	Utilización de las áreas de Preservación y Protección (41.43%) como nodos ancla para establecer conectividad ecosistémica en las zonas de Clase VII y VIII, fortaleciendo la resiliencia del paisaje andino.
FA	F2+A4	Fortalecimiento de la función protectora de los bosques de la parte alta para mitigar el transporte de sedimentos hacia el cauce
FA	F1+A2	Implementación de barreras vivas y sistemas agroforestales que actúen como amortiguadores ante la erosión moderada y alta en sectores de pendiente pronunciada.

DO	D1+O2	Transformación de las áreas con Conflictos de Sobreuso mediante programas de reforestación y restauración activa, aprovechando la aptitud de Aprovechamiento Forestal identificada en la Microcuenca.
DO	D3+O1	Mitigación del déficit de cobertura forestal mediante la inserción de abonos verdes y especies perennes en las zonas identificadas con potencial de subuso.
DA	D1+A2	Implementación de las normativas de uso de suelo que restrinjan la expansión agrícola
DA	D4+A1	Ante la ausencia de prácticas de conservación en zonas de alta erodabilidad, la ejecución y la construcción de zanjas de infiltración y estructuras de contención

Nota: Las combinaciones F, D, O y A corresponden a las Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas identificadas en la matriz FODA de la Microcuenca del río Chorlaví.

4.4.2.1. Estrategia 1: Implementación de barreras vivas y un sistema agroforestal en la microcuenca del río Chorlaví

Ubicación: Laderas del volcán Imbabura

Justificación

Es imperativo pasar hacia modelos que imiten la resiliencia forestal. Las barreras vivas reducen la energía cinética de la escorrentía, mitigando el transporte de sedimentos hacia el río Chorlaví.

Objetivos

Establecer un sistema de cobertura vegetal permanente en zonas de ladera para reducir la tasa de erosión hídrica y mejorar la conectividad ecosistémica.

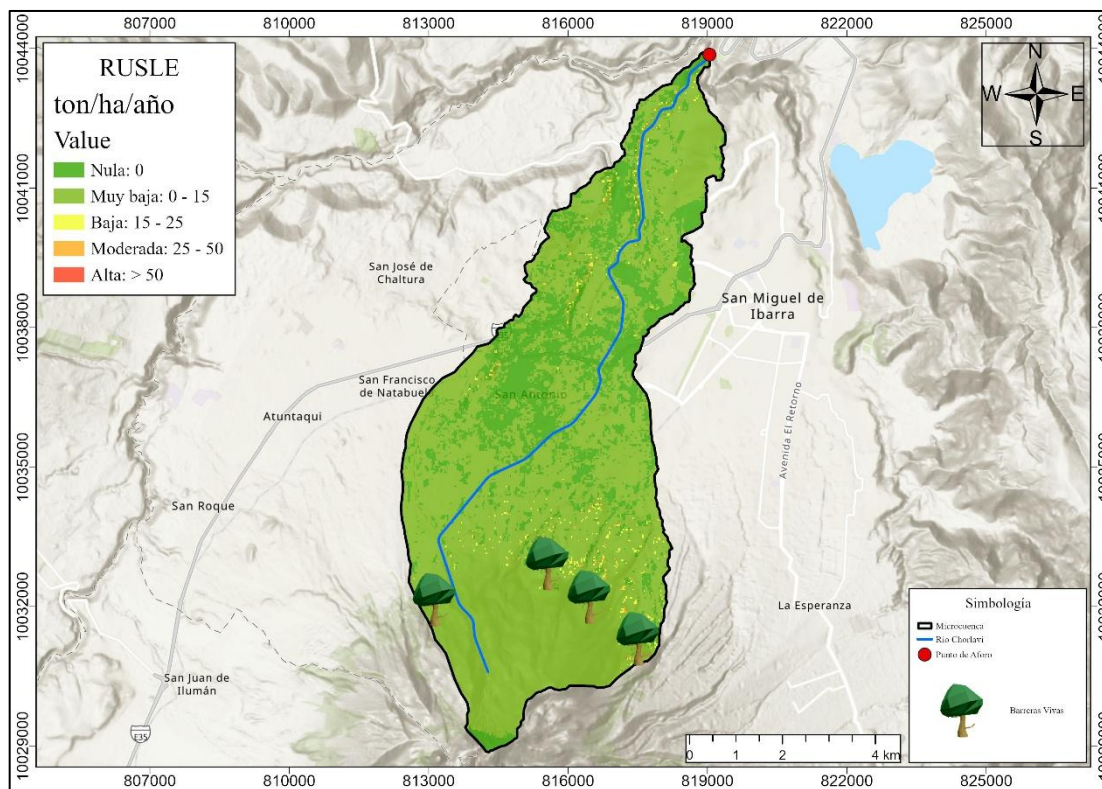
Meta

Implementar sistemas agroforestales y barreras vivas en el 25% de las áreas identificadas con sobreuso dentro de los primeros 24 meses de ejecución de las estrategias (Tabla 11 y Gráfico 13).

Tabla 11. Matriz Operativa Estrategia 1

Actividades	Indicadores	Medios de Verificación	de Alcance	Responsables
Diseño de sistemas agroforestales específicos para Clases agrológicas IV y VI.	Número de diseños técnicos aprobados.	Planos prediales, informes técnicos.	Unidades productivas en zonas de ladera.	Técnicos ambientales, universidades.
Producción en vivero de especies nativas estabilizadoras.	Cantidad de plántulas entregadas.	Registros de entrega, facturas de insumos.	Comunidades de la Microcuenca.	GAD Provincial, comunidades locales.
Instalación de barreras vivas en curvas de nivel.	Metros lineales de barreras establecidas.	Fichas de monitoreo, fotografías GPS.	Zonas con pendientes >15%	Propietarios de fincas, técnicos de apoyo.

Gráfico 13. Ubicación de la estrategia 1



4.4.2.2. Estrategia 2: Labranza mínima y manejo del suelo

Ubicación: Cultivos de la parte alta de la microcuenca y sectores de Socapamba de la parte baja.

Justificación

El manejo convencional en estas áreas acelera la compactación y la pérdida de materia orgánica. La labranza mínima es la práctica de conservación del suelo para mantener la productividad en el 34.87% de áreas con uso correcto y prevenir su degradación futura (Tabla 12 y Gráfico 14).

Objetivo General

Preservar la estructura física y biológica del suelo mediante técnicas de alteración mecánica mínima para optimizar la infiltración del agua en el suelo.

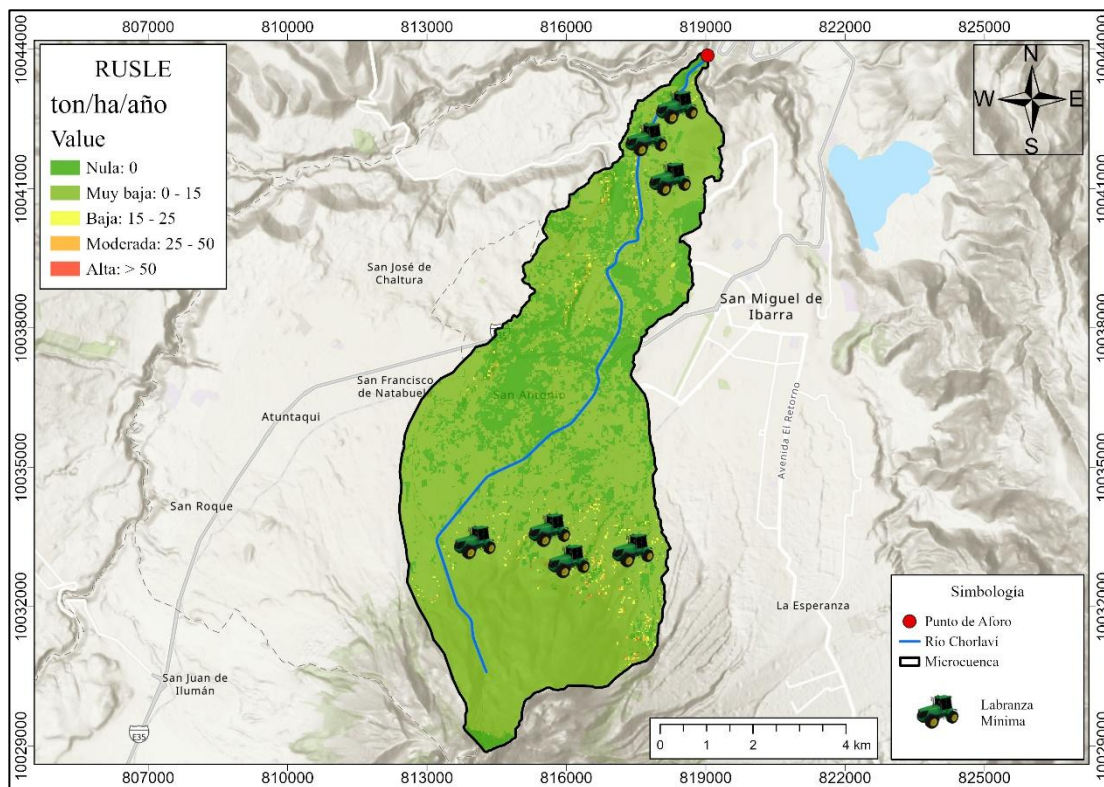
Meta

Lograr la transición a labranza mínima en el 40% de la superficie de Clase III en un periodo de tres temporadas de cultivos de ciclo corto.

Tabla 12. Matriz operativa estrategia 2

Actividades	Indicadores	Medios de Verificación	Alcance	Responsables
Capacitación en siembra directa y uso de sembradoras manuales.	Numero de productores capacitados con certificación.	Listados de asistencia, registros fotográficos.	Agricultores de zonas bajas y medias.	Ministerio de Agricultura, GADs.
Monitoreo de compactación y porosidad edáfica.	Variación en la densidad aparente del suelo (g/cm ³).	Análisis de laboratorio de suelos.	Parcelas demostrativas seleccionadas.	Universidades, centros de investigación.
Gestión y distribución de residuos de cosecha (mulch).	Porcentaje de cobertura superficial estimada.	Evaluaciones visuales en campo, drones.	Áreas de cultivo intensivo.	Productores agrícolas, técnicos.

Gráfico 14. Ubicación de la estrategia 2



4.4.2.3. Estrategia 3: Incorporación de abonos verdes con plantas leguminosas.

Ubicación

Cultivos de la parte alta de la microcuenca y sectores de Socapamba de la parte baja.

Justificación

La restauración de la fertilidad es importante para mitigar el impacto del sobreuso. Esta práctica es particularmente efectiva en suelos de Clase IV, donde la pérdida de nutrientes por lixiviación es alta. Los abonos verdes con leguminosas y gramíneas

incrementan la estabilidad de los agregados, reduciendo la erodabilidad detectada por el modelo RUSLE.

Objetivo general

Incrementar el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes mediante el uso de biomasa vegetal cultivada in situ.

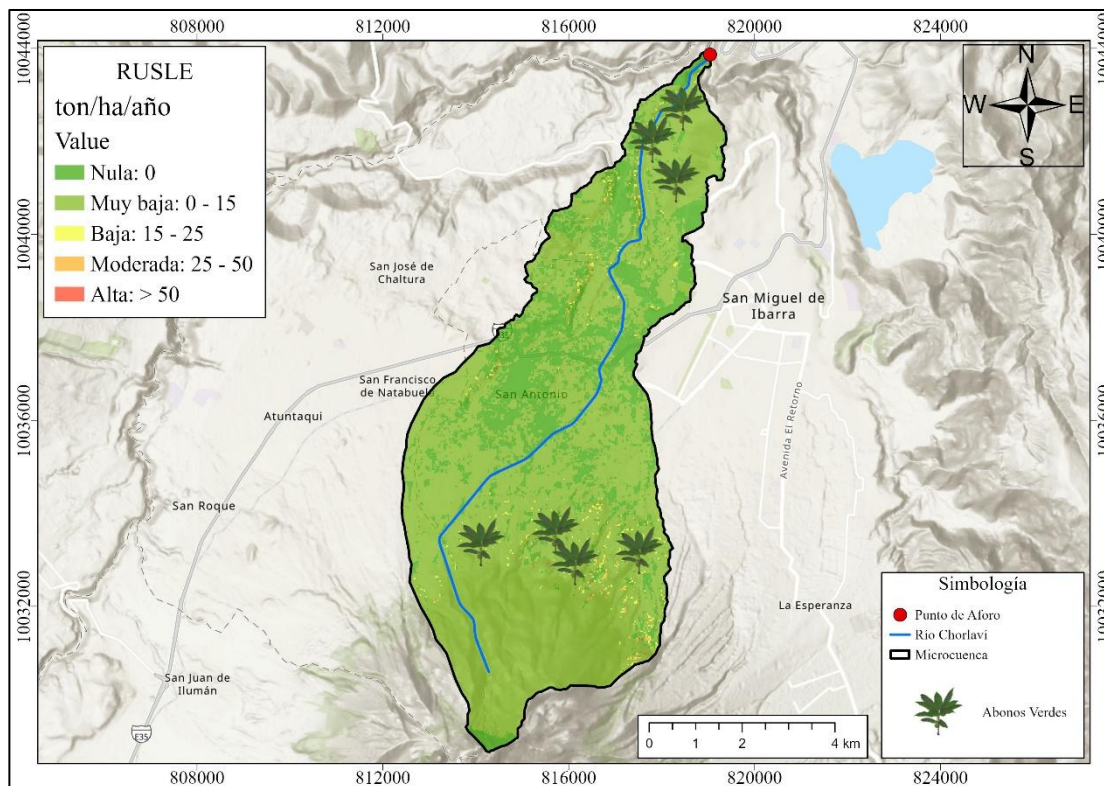
Meta

Incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo en 0.5% promedio en las parcelas intervenidas después dos años de implementación (Tabla 13 y Gráfico 15).

Tabla 13. Matriz operativa estrategia 3

Actividades	Indicadores	Medios de Verificación	Alcance	Responsables
Selección de especies de abonos verdes según piso altitudinal.	Manual de especies seleccionadas.	Documento técnico de referencia.	Microcuencia completa.	Investigadores botánicos y edafólogos.
Implementación de parcelas de validación de biomasa.	Rendimiento de biomasa (ton/ha).	Registros de pesaje en campo.	Unidades productivas piloto.	GAD Parroquial, asociaciones.
Evaluación periódica de la fertilidad química del suelo.	Variación en niveles de N, P, K.	Informes de laboratorio comparativos.	Suelos bajo régimen de abonos verdes.	Laboratorios de suelos, técnicos.

Gráfico 15. Ubicación de la estrategia 3



4.4.2.4. Estrategia 4: Implementación de zanjas de infiltración y control de escorrentía

Ubicación: Cultivos de la parte alta de la microcuenca y sectores de Socapamba de la parte baja.

Justificación

Debido a la topografía montañosa y la identificación de puntos de concentración con erosión moderada y alta (>25 ton/ha/año), es necesario un control biomecánico del

agua. Las zanjas de infiltración protegen los drenajes menores y el cauce del río Chorlaví.

Objetivo general

Controlar los excedentes hídricos superficiales para reducir el transporte de sedimentos y proteger las zonas de recarga de los acuíferos de la microcuenca.

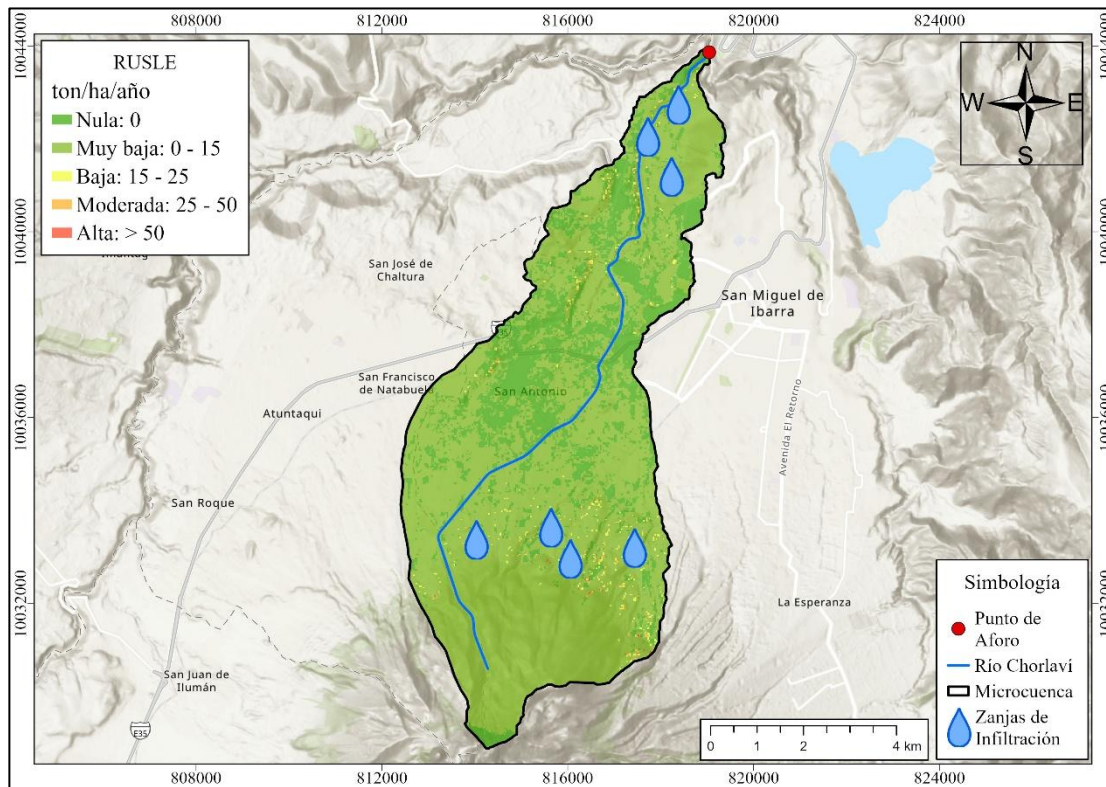
Meta

Implementar 50 km lineales de zanjas de infiltración en las laderas críticas de la microcuenca en el primer año de ejecución de las estrategias (Tabla 14 y Gráfico 16).

Tabla 14. *Matriz operativa estrategia 4*

Actividades	Indicadores	Medios de Verificación	Alcance	Responsables
Trazado de curvas con nivel en A o equipo topográfico.	Mapas de trazado por lotes de terreno.	Informes topográficos, planos.	Laderas con pendientes críticas.	Topógrafos, técnicos de campo.
Excavación y mantenimiento de zanjas de infiltración.	Metros cúbicos de suelo removido.	Planillas de avance de obra.	Zonas de recarga hídrica.	Mano de obra local, GAD Provincial.
Monitoreo de la reducción de carga sedimentaria en cauces.	Concentración de sólidos suspendidos.	Análisis de calidad de agua en el río.	Punto de aforo y afluentes.	Técnicos de cuencas hídricas.

Gráfico 16. Ubicación de la estrategia 4



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La aplicación del modelo permitió determinar que la pérdida del suelo en la microcuenca del río Chorlaví alcanza una tasa promedio de erosión de 1.69 ton/ha/año. Este valor promedio confirmaría que, el río no presenta una saturación de sólidos que indique procesos erosivos severos en la mayor parte de la cuenca, confirmando que la dinámica de transporte se mantiene dentro de niveles manejables y naturales para el ecosistema. De hecho, únicamente el 22% del territorio se encuentra en un nivel de riesgo alto, concentrado principalmente en las laderas del Volcán Imbabura. Esta diferencia se asocia con la interacción entre las pendientes pronunciadas y la transición de la cobertura vegetal al uso de suelos agrícolas de baja protección. En contraste, la clasificación del riesgo bajo se sitúa especialmente en el rango de 15 – 25 ton/ha/año, responde a que la pérdida de suelo en estas zonas no compromete la estabilidad estructural del terreno a corto plazo, manteniendo un equilibrio con los procesos de formación edafológica.

El presente estudio confirmó la hipótesis inicial, que los sedimentos simulados por erosión hídrica mediante el modelo RUSLE son similares a los sedimentos observados obtenidos mediante método de gravimetría en el laboratorio. Esto considerando a la obtención de un ajuste estadístico caracterizado por un PBias de 26.05% y un RMSE de 0.40, confirma que la estrategia de modelamiento adaptada

posee una alta fidelidad para representar la dinámica espacial de producción de sedimentos en el territorio.

La integración sistemática en un entorno GIS de los factores determinantes de la erosión, y su posterior validación con la comparación de en conjunto hace que la presente metodología trascienda el plano descriptivo para constituirse en un instrumento técnico fundamental en la priorización de intervenciones de mitigación y gestión sostenible de la microcuenca. Este hallazgo responde a la primera interrogante de la investigación, confirmando que la erosión hídrica es un proceso activo y degradante en el sistema hídrico evaluado.

Las estrategias de conservación propuestas no deben considerarse como medidas aisladas, sino, como un modelo de gestión integral adaptado a la morfología de la microcuenca. La priorización de técnicas como: a) implementación de barreras vivas y un sistema agroforestal, b) labranza mínima y manejo del suelo, c) incorporación de abonos verdes con plantas leguminosas y c) implementación de zanjas de infiltración y control de escorrentía; sugiere que la mitigación del riesgo en el río Chorlaví es técnica y operativamente viable, siempre que se integre la planificación biofísica con la realidad socioeconómica de la población local.

5.2. Recomendaciones

La zonificación del riesgo de erosión hídrica conseguida en este hallazgo sugiere que la implementación de medidas de restauración y conservación debe regirse por un estricto criterio de jerarquización espacial. En lugar de aplicar intervenciones uniformes, los esfuerzos técnicos y financieros deben focalizarse en los paisajes agrarios situados en la zona alta de la microcuenca del río Chorlaví. Al haber sido catalogadas como unidades de susceptibilidad crítica, la implementación de estrategias de mitigación debe intensificarse en estos puntos geográficos específicos. Este enfoque diferenciado es fundamental para neutralizar eficientemente el transporte de sedimentos y frenar la degradación hídrica en las cotas que presentan el mayor índice de fragilidad ambiental.

Por otro lado, se plantea que esta investigación sirva como base para la estructuración de planes de manejo y programas de rehabilitación hídrica, garantizando que la normativa local guarde coherencia con la realidad biofísica documentada en la microcuenca. Dada la sensibilidad que presenta el modelo RUSLE frente a la variabilidad de las forzantes climáticas, resulta imperativo priorizar el robustecimiento de los repositorios de información meteorológica local. La consolidación de series de datos validadas y de largo plazo no solo es un requisito para una validación estadística rigurosa, sino que permite que el modelamiento de la erosión trascienda su actual carácter estático, convirtiéndose en una herramienta predictiva dinámica y confiable para la gobernanza sostenible del territorio.

REFERENCIAS

- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). Estimation of soil erosion through the RUSLE model. Case study: upper-middle basin of Mira River in Andean-Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (79), 207–230. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- ASTM International. (2019). <https://store.astm.org/d3977-97r19.html>
- Ayma- Villagra, S. H. (2023). *Evaluación de la Tasa Promedio Anual por Erosión Hídrica Mediante los Modelos SWAT y USLE en la Cuenca Cusigocha, Distrito Chinchero, Provincia Urubamba - Departamento Cusco, 2022*. <https://orcid.org/0009-0001-6152-5236>
- Casas, R. R., Godagnone, R. E., & De La Fuente, J. C. (2022). *Evaluation and mapping of water erosion in Argentina*. <https://doi.org/10.34073/285>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., & Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *CATENA*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.07.003>
- Del Castillo Gonzales, J. J. (2023). *Evaluación de la Pérdida del Suelo por Erosión Hídrica Utilizando Metodología RUSLE con SIG en la Cuenca del Río Sacanche - San Martín*. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2715>
- Delgado-Peña, J. J., Ruiz, J. D., Jurado-Navarro, E., Cortes-Macías, R., Fernández-Lorenzo, J. M., & Acevedo-Rodríguez, P. (2011). La Degradación Ambiental de los Paisajes en las Cuencas Tributarias de la Ensenada de Sibarimar (Guanabo E Itabo, Cuba). *Cuadernos Geográficos*, 48, 161–188. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3842841.pdf>
- Durán-Trejo, S. (2012). *Riesgo a la Erosión Hídrica y Prácticas de Manejo*.
- Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., & Mirdar Harijani, F. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 1–17.
- El Jazouli, A., Barakat, A., Ghafiri, A., El Moutaki, S., Eттаqy, A., & Khellouk, R. (2017). Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Letters*, 4(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S40562-017-0091-6/TABLES/3>
- Espinosa-Montesdeoca, Y. D. (2017). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SOCIAL POR FLUJOS DE LODO DE LA PARROQUIA SAN ANTONIO DE IBARRA AÑO*

2016. <https://repositorio.puce.edu.ec/items/28452f0b-1973-4379-9801-44e46308786a>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2019). *Soil erosion : the greatest challenge for sustainable soil management*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a268e967-a373-4a56-adac-ae1d7ab3567f/content>

Fernández, M. J. (2016). *Evaluación del riesgo de erosión hídrica, su distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior (Mendoza)*.

Gallegos Reina, A. (2021). *Cambios en la Erosión Hídrica tras el Incendio Forestal de Sierra Bermeja (Málaga) de 2021*. <https://orcid.org/0000-0002-2711-111X>

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Antonio Ante. (2019). *Plan de Uso y Gestión del Suelo de Antonio Ante 2021-2033*. <https://www.antonioante.gob.ec/AntonioAnte/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial/>

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra. (2021). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. https://www.ibarra.gob.ec/site/docs/lotaip2023/anexos/s/PDOT-31-01-2022_compressed.pdf

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de San Antonio de Ibarra. (2023). *Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial de San Antonio de Ibarra*.

Gómez-Arcos, J. E. (2019). *Influencia de la Cobertura Forestal en la Regeneración de Caudales de la Microcuenca del Río Chorlaví*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9886>

Guadarrama-Tejas, R., Kido-Miranda, J., Roland-Antunez, G., & Salas-Salgado, M. (2016). *Contaminación del agua* (Vol. 2). https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num5/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N5_1.pdf

Haro, R., Espinosa, J., Moreno, V., & Suango, V. (2024). *Estimación de la erosión de la Sierra centro y norte del Ecuador; utilizando geoinformación*. [https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3\(Especial\)](https://doi.org/10.29166/siembra.v11i3(Especial))

Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26–39. <https://doi.org/10.29166/REVFIG.V15I1.4269>

- Lugo-Morin, D. R., & Rey, J. C. (2020). *Evaluación del Riesgo de Erosión Hídrica en los Llanos Centrales de Venezuela*. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29883.90403>
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. www.lexis.com.ec
- Moore, I. D., & Wilson, J. P. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil & Water Conservation*, 47(5), 423–428. <https://doi.org/10.1080/00224561.1992.12456740>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785.
- Naciones Unidas. (2018). *Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *COLLEGE OF AGRICULTURE AND LIFE SCIENCES Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*.
- Nikulin, C., & Becker, G. (2015). Una metodología Sistémica y creativa para la gestión estratégica: Caso de Estudio Región de Atacama-Chile. *Journal of Technology Management & Innovation*, 10(2), 127–144. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242015000200009>
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., & Boll, J. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes OF Southern Ecuador. *Land Degradation and Development*, 26(6), 565–573. <https://doi.org/10.1002/ldr.2219>
- Pinargote-Chóez, J. de los S., Palma Ponce, R. L., & Pinargote Menoscal, R. M. (2021). *Erosión Hídrica en la Cuenca Alta del Río Guineal, del Cantón 24 de Mayo, Ecuador*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7926947.pdf>
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Fernández, M. P., Rubilar, R., Balocchi, F., Ibáñez, A., & De Correspondencia, A. (2023). *Evaluation of water erosion under different forest covers through sediment capture in the south-central zone of Chile*. 15(1). <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2023-v15-1-01>
- Quiñonez-Marret, P. M. (2022). Evaluación de Riesgos por Erosión Hídrica en el Suelo de la Microcuenca de la Quebrada Quitumbe, Provincia de Imbabura. *Universidad Técnica Del Norte*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12305>

- Ramos-Arboleda, B. A., & Sánchez-Pullas, E. S. (2023). *Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe*. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10459/1/Ramos%20A.%20Bryan%200A%3B%20S%C3%A1nchez%20P.%20Estefan%C3%ADa%20S.%2C\(2023\)_%20Estimaci%C3%B3n%20de%20la%20p%C3%A9rdida%20de%20suelo%20utilizando%20el%20modelo%20USLE.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10459/1/Ramos%20A.%20Bryan%200A%3B%20S%C3%A1nchez%20P.%20Estefan%C3%ADa%20S.%2C(2023)_%20Estimaci%C3%B3n%20de%20la%20p%C3%A9rdida%20de%20suelo%20utilizando%20el%20modelo%20USLE.pdf)
- Renald, K. G., Foster, G. R., Yoder, D. C., & McCool, D. K. (1994). RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(3), 213–220. <https://www.jswconline.org/content/49/3/213>
- República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. <https://www.fielweb.com/Index.aspx?rn=28028&nid=1#norma/1>
- República del Ecuador. (2015). *LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA*. www.lexis.com.ec
- Riofrio-Humanante, S. A. (2023). *Evaluación de la Calidad Fisicoquímica del Recurso Hídrico y el Estado Actual de la Microcuenca de Río Chorlaví* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14533>
- Robles-Ortiz, C. (2003). *Expansión y transformación de la agricultura en una economía exportadora. La transición al capitalismo agrario en Chile (1850-1930)*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/643211.pdf>
- Scacco-Carrasco, A. (2020). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón de Ibarra*. https://www.ibarra.gob.ec/site/docs/estrategico/PDYOT_2020.pdf
- Silva del Castillo, G. E., & Delgado-Bardales, J. M. (2020). *El Impacto de la infraestructura en el desarrollo económico*. *Ciencia Latina*. https://doi.org/10.37811/el_rcm.v4i2.143
- Tellería, J. L. (2013). Pérdida de biodiversidad. Causas y consecuencias de la desaparición de las especies. Loss of biodiversity: causes and consequences of the species loss. In *Memorias R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 2ª ép (Vol. 10). <https://www.researchgate.net/publication/257238754>
- Tsegaye, L., & Bharti, R. (2021). Soil erosion and sediment yield assessment using RUSLE and GIS-based approach in Anjeb watershed. *SN Applied Sciences*, 3(5), 1–19.
- Valdez-Zertuche, J. L., Badii, M. H., Guillen, A., & Acuña-Zepeda, M. S. (2015). Causas e Impactos Socio-Económico y Ambientales de la Erosión. In *Daena*:

International Journal of Good Conscience (Vol. 10, Number 1).
[http://www.spentamexico.org/v10-n1/A6.10\(1\)76-87.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n1/A6.10(1)76-87.pdf)

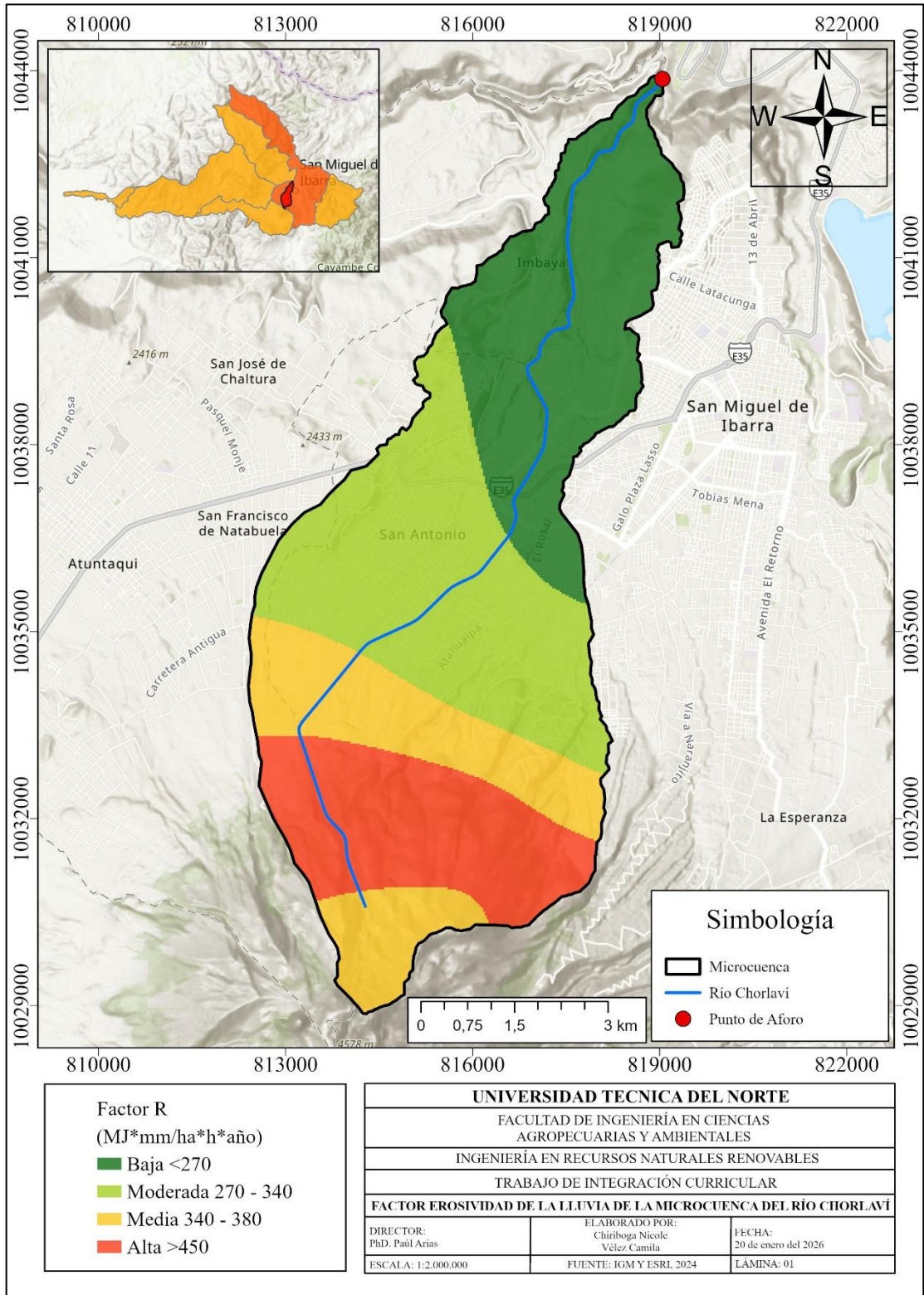
Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J., & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>

Wischmeier, W. H., & Smith, D. (1978). USLE. *Agriculture Handbook* , 67.

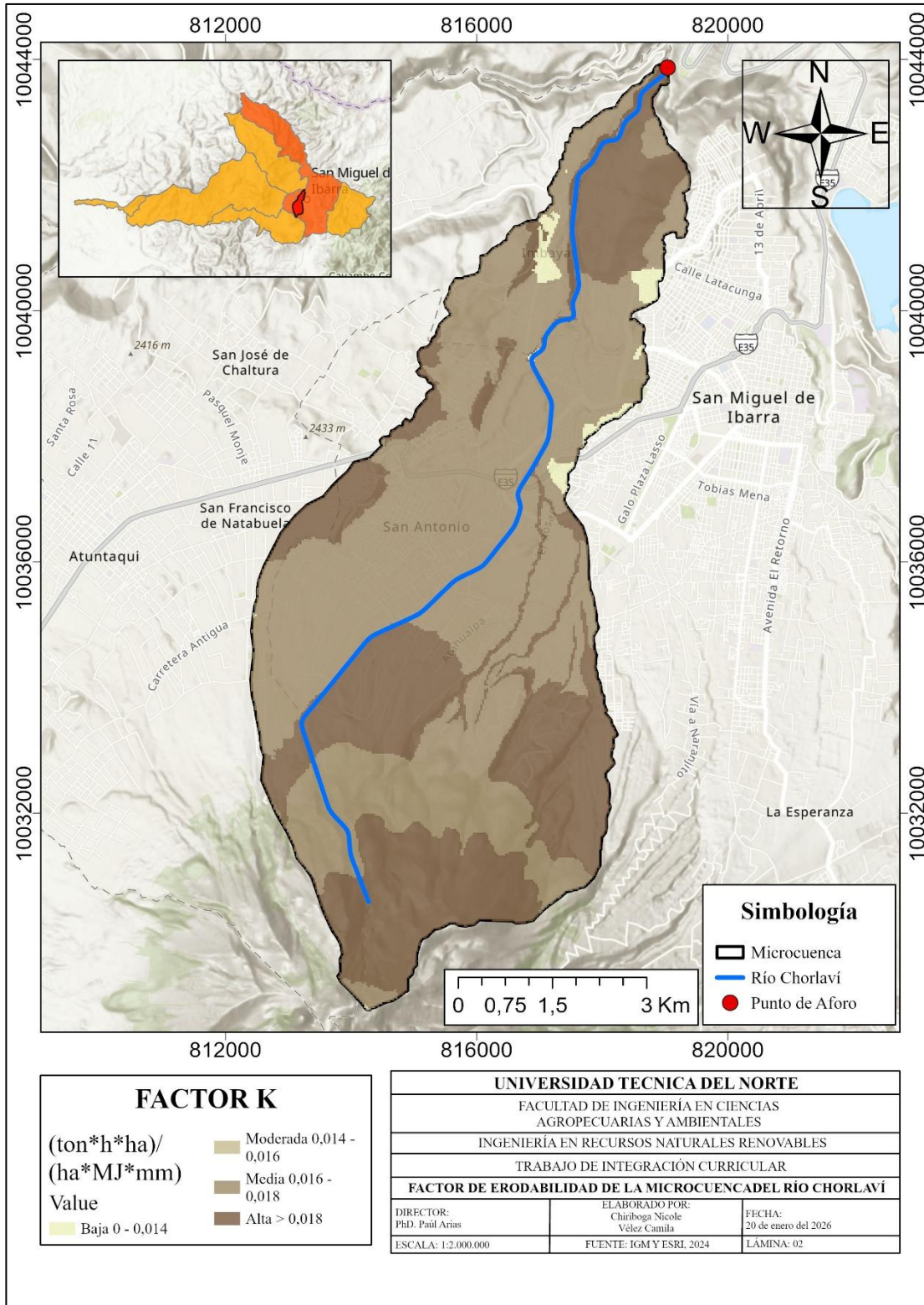
ANEXOS

Anexo 1.

Factor de erodabilidad de la microcuenca del río Chorlaví

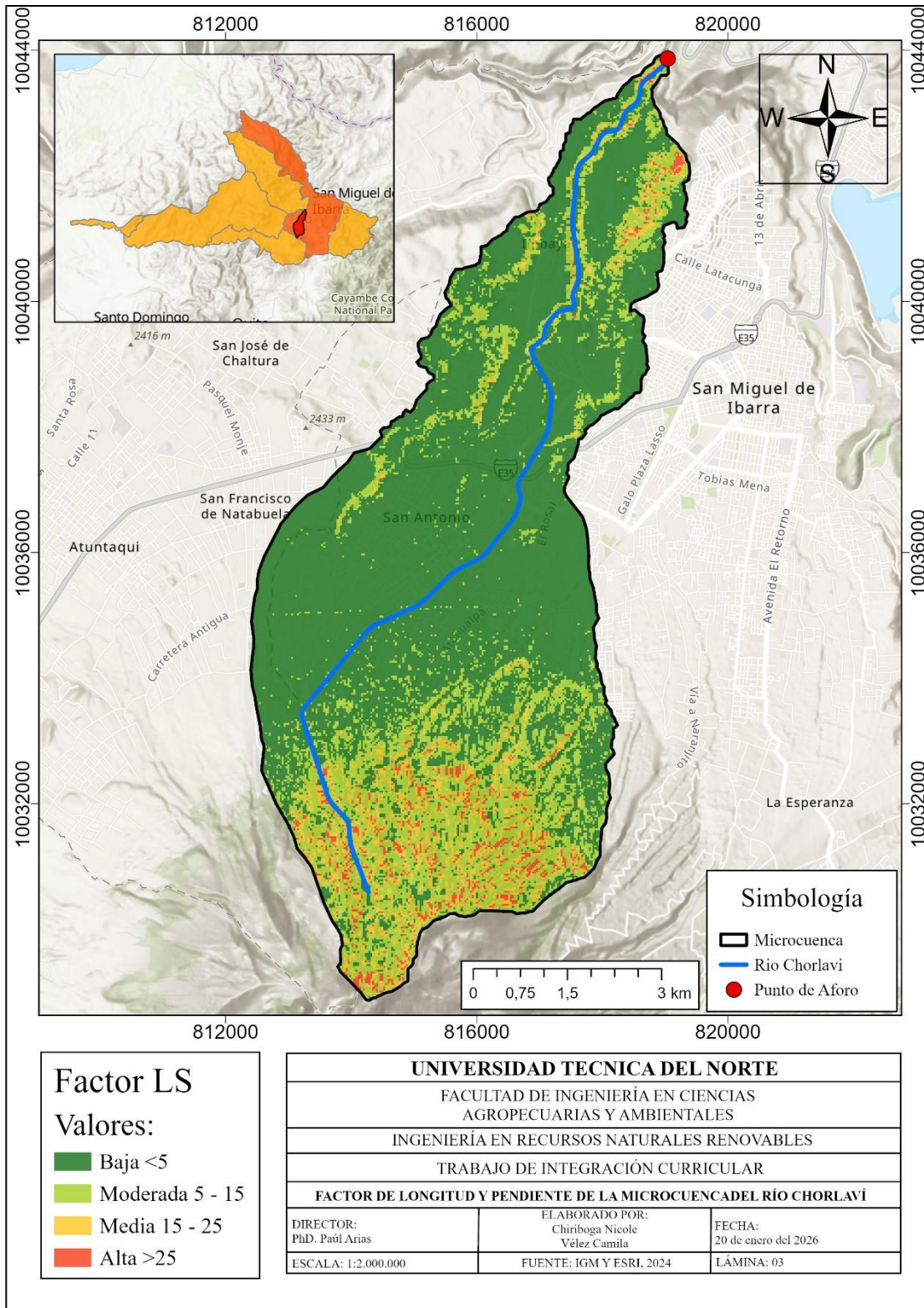


Anexo 2.
Factor de erosividad de la microcuenca del río Chorlaví

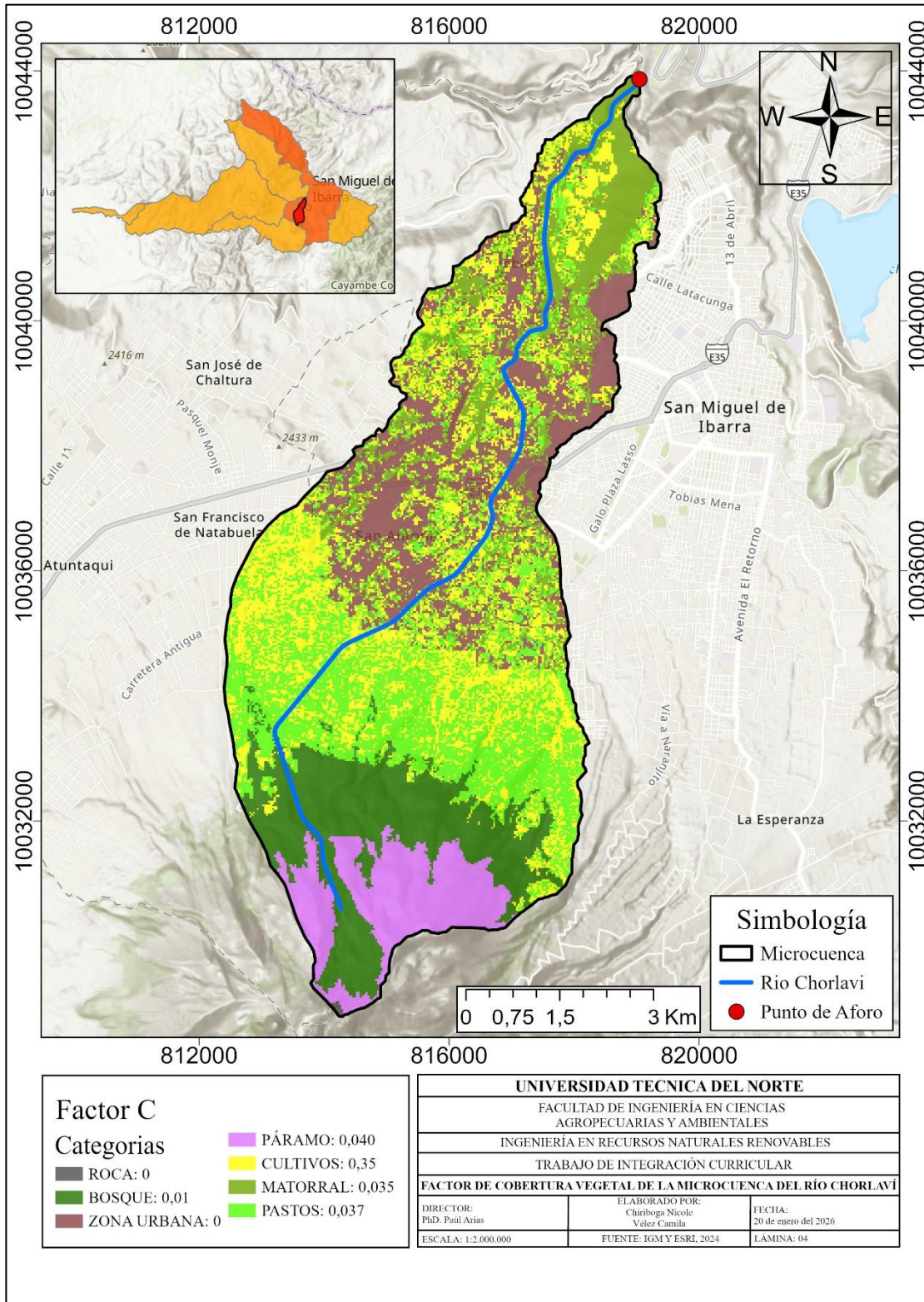


Anexo 3.

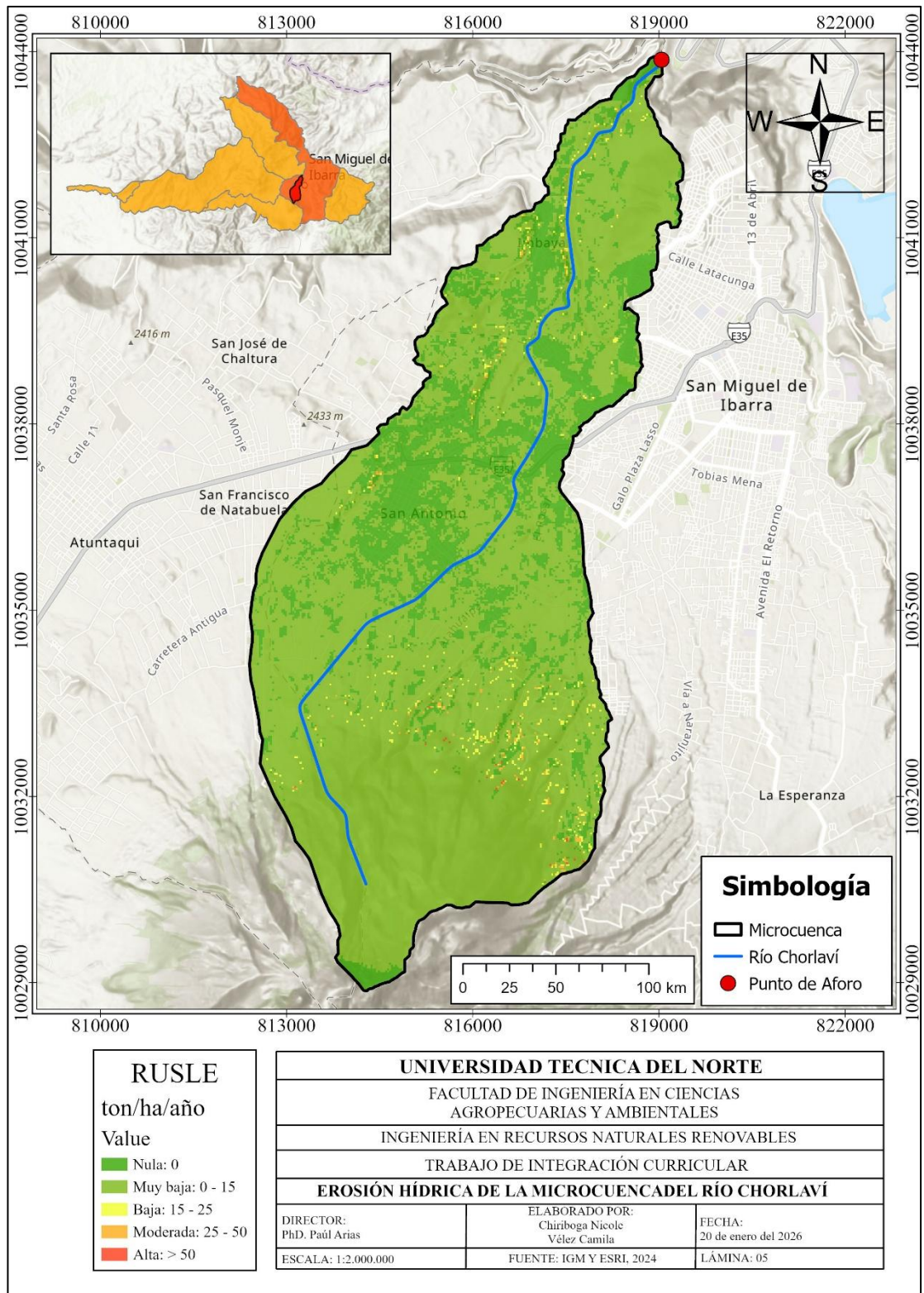
Factor de longitud y pendiente de la microcuenca del río Chorlaví



Anexo 4.
Factor de cobertura vegetal de la microcuenca del río Chorlaví

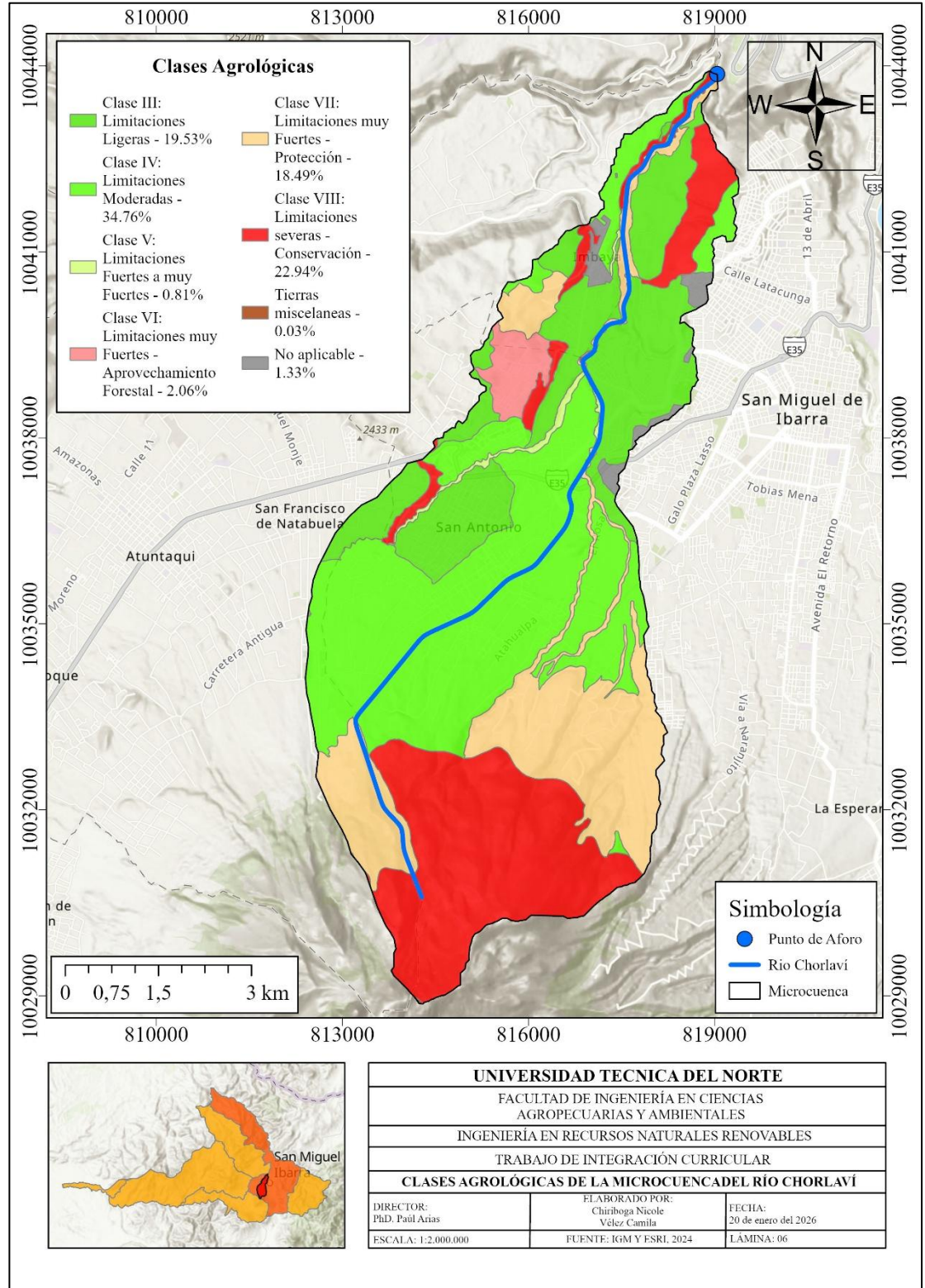


Anexo 5.
Erosión hídrica de la microcuenca del río Chorlaví



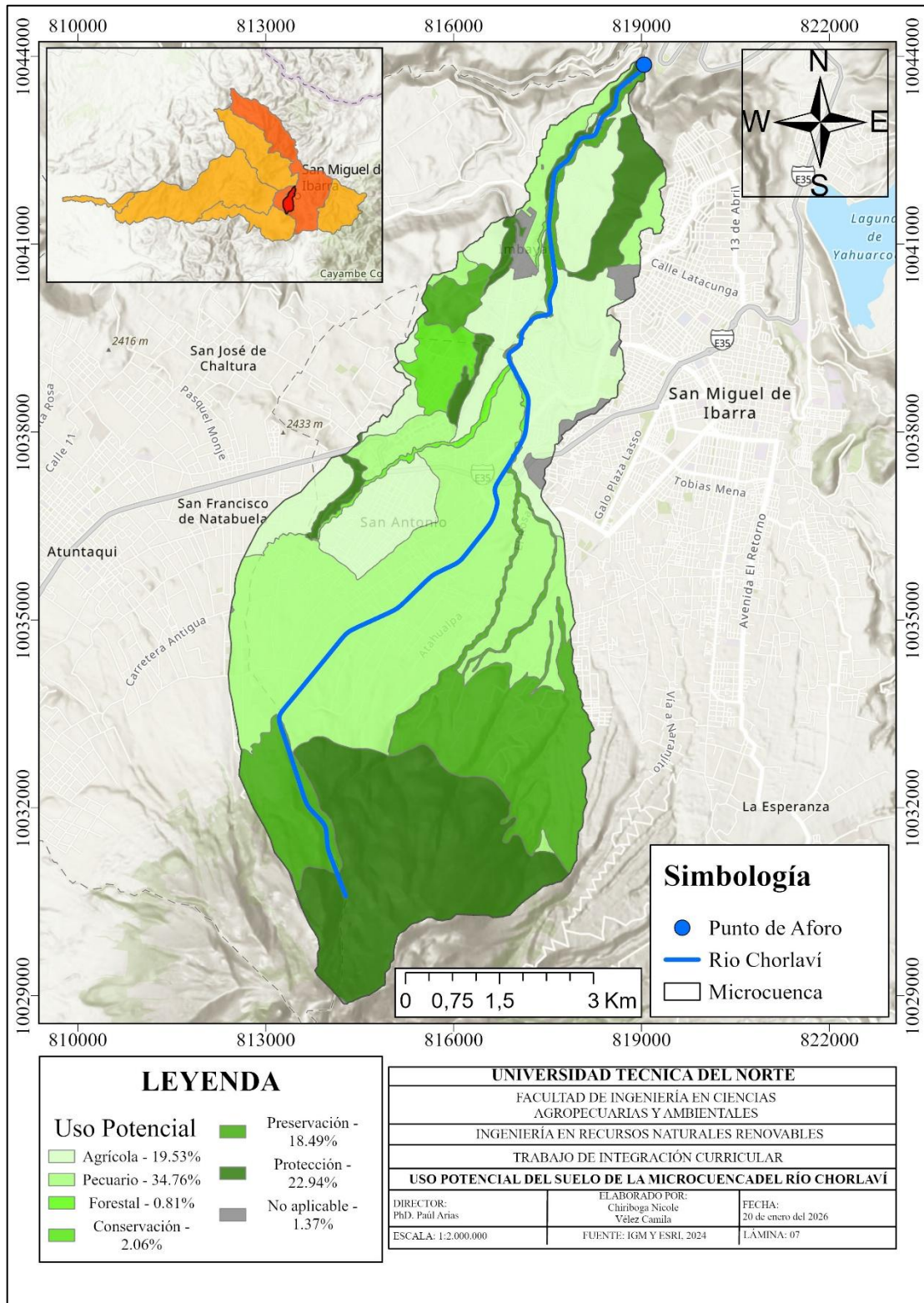
Anexo 6.

Clases agrológicas de la microcuenca del río Chorlaví

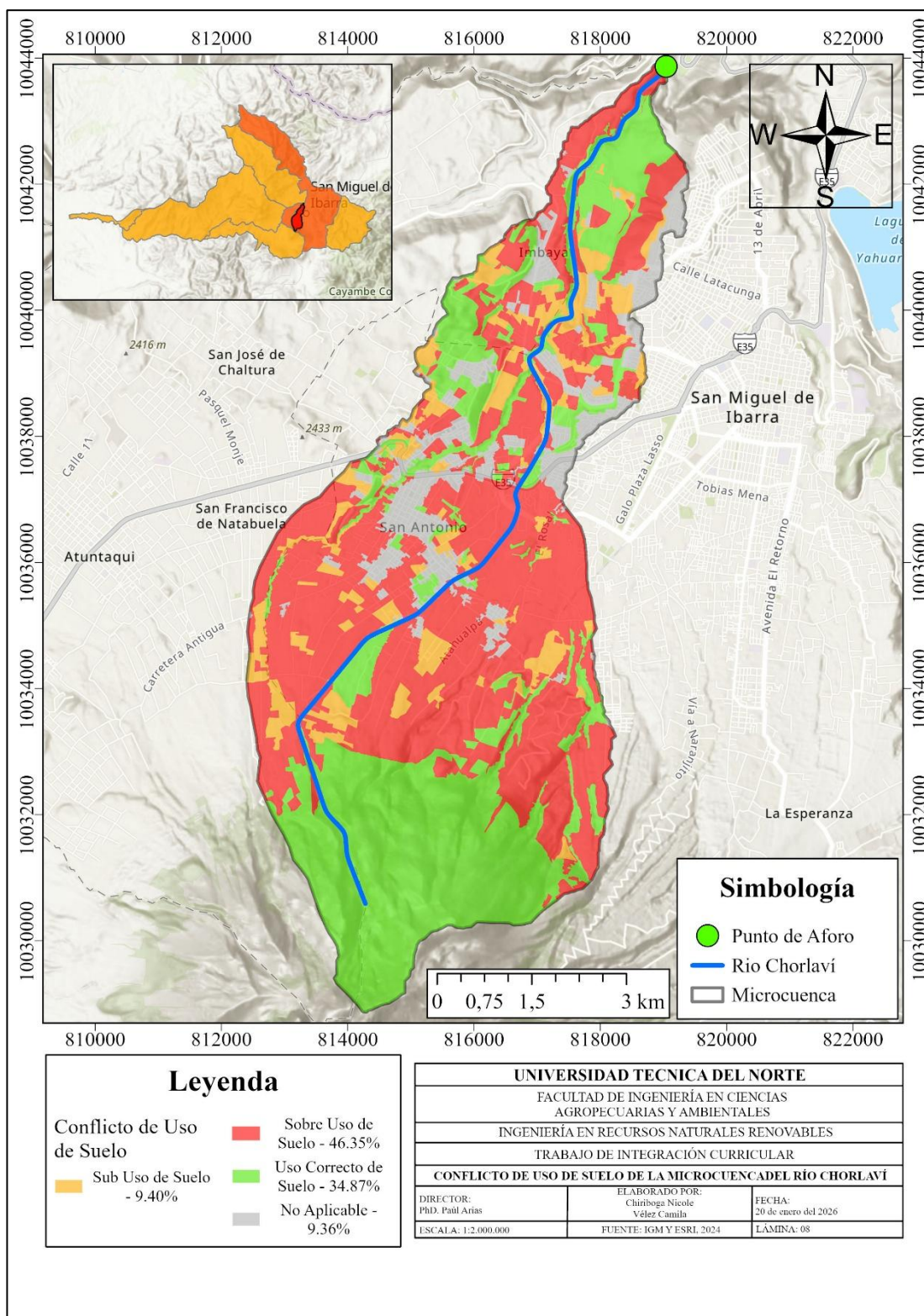


Anexo 7.

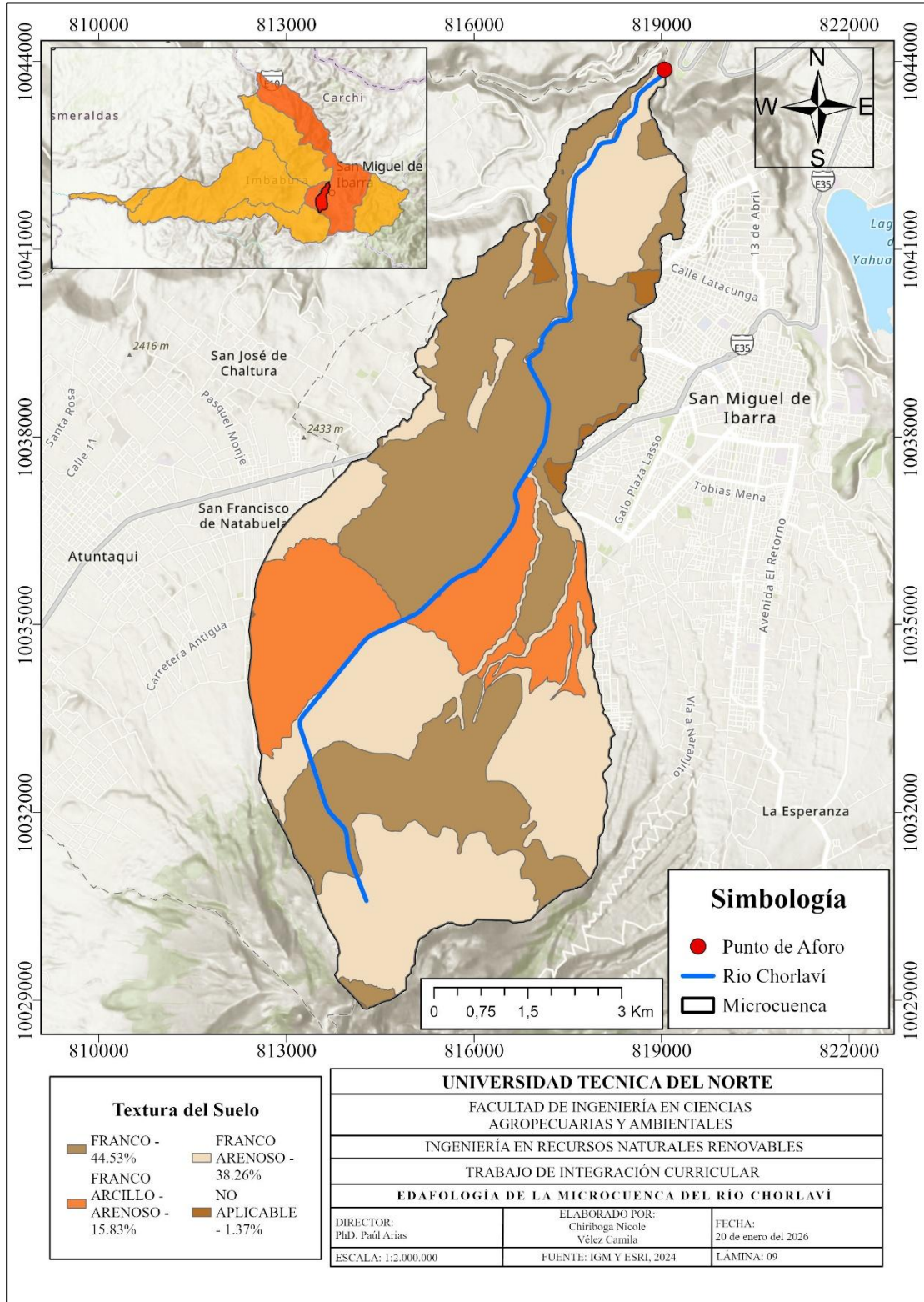
Uso potencial de suelo de la microcuenca del río Chorlaví



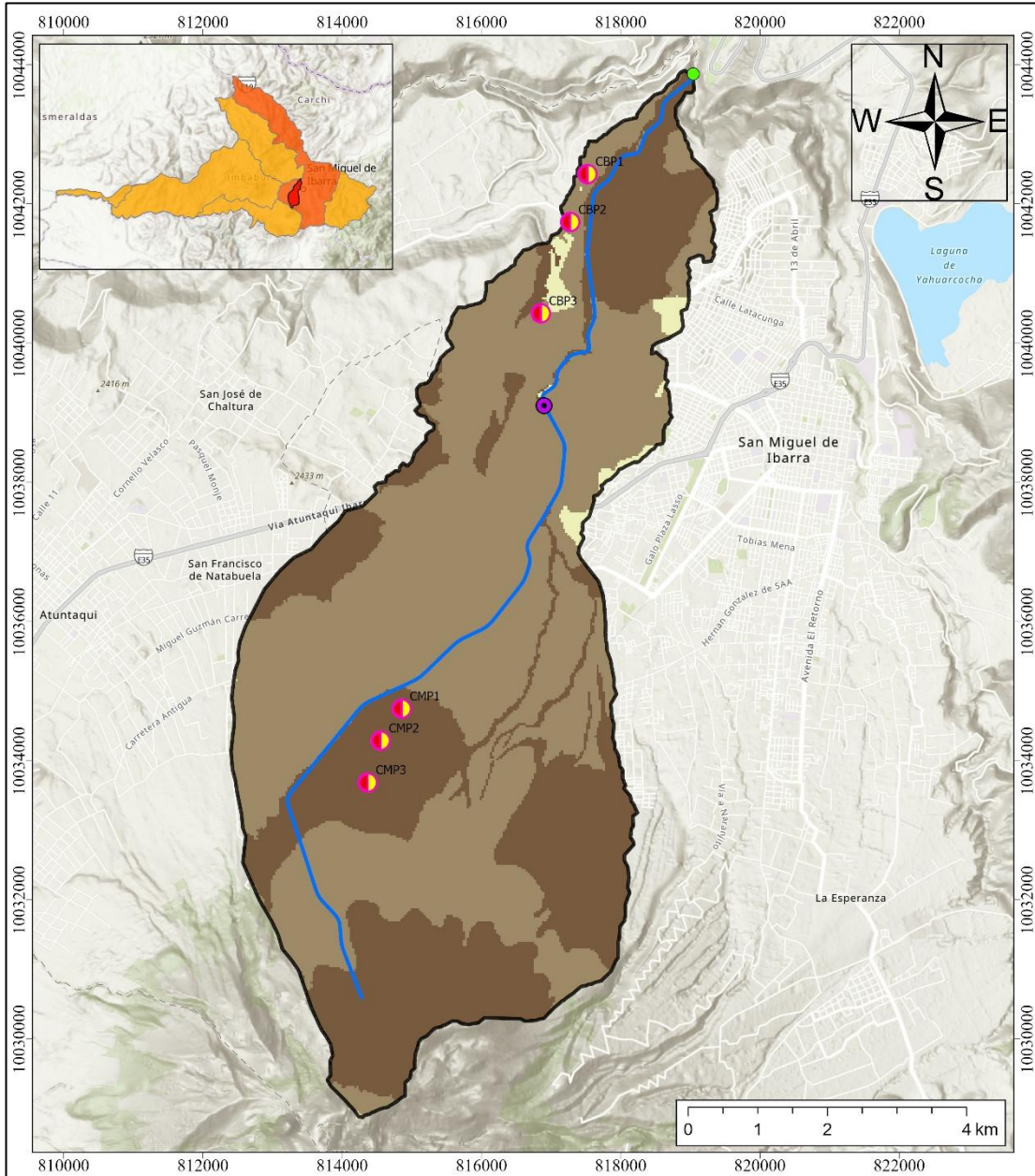
Anexo 8.
Conflictos de uso de suelo de la microcuenca del río Chorlaví



Anexo 9.
Edafología de la microcuenca del río Chorlaví



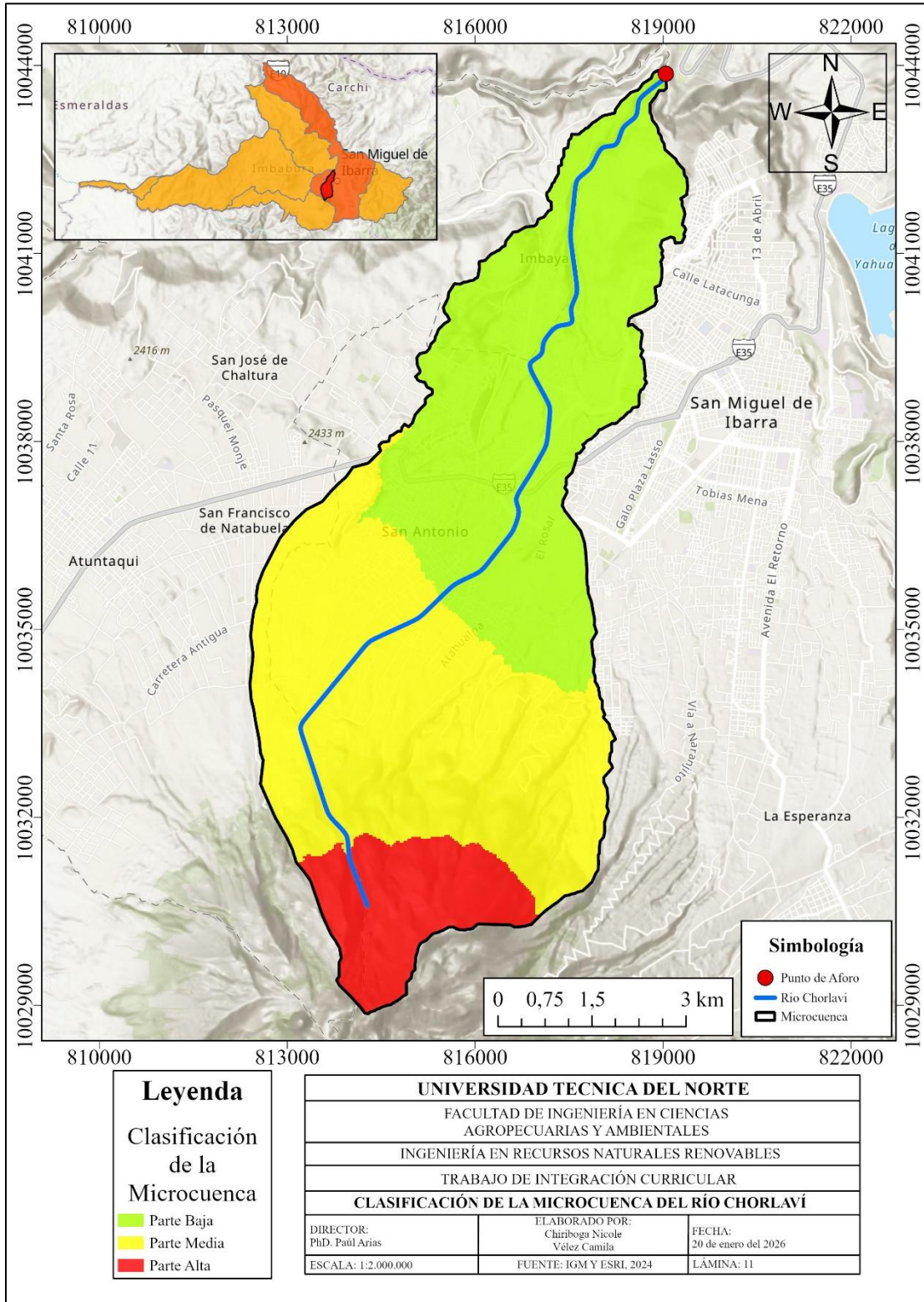
Anexo 10.
Puntos de muestreo de la microcuenca del río Chorlaví



Simbología	
	Río Chorlaví
	Muestreos de Suelo
	Punto de Muestreo de Agua
	Punto de Aforo
	Microcuenca

UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		
PUNTOS DE MUESTREO DE LA MICROCUENCADEL RÍO CHORLAVÍ		
DIRECTOR: PhD. Paul Arias	ELABORADO POR: Chiriboga Nicole Vélez Camila	FECHA: 20 de enero del 2026
ESCALA: 1:2.000.000	FUENTE: IGM Y ESRI, 2024	LÁMINA: 10

Anexo 11.
Clasificación de la microcuenca del río Chorlaví

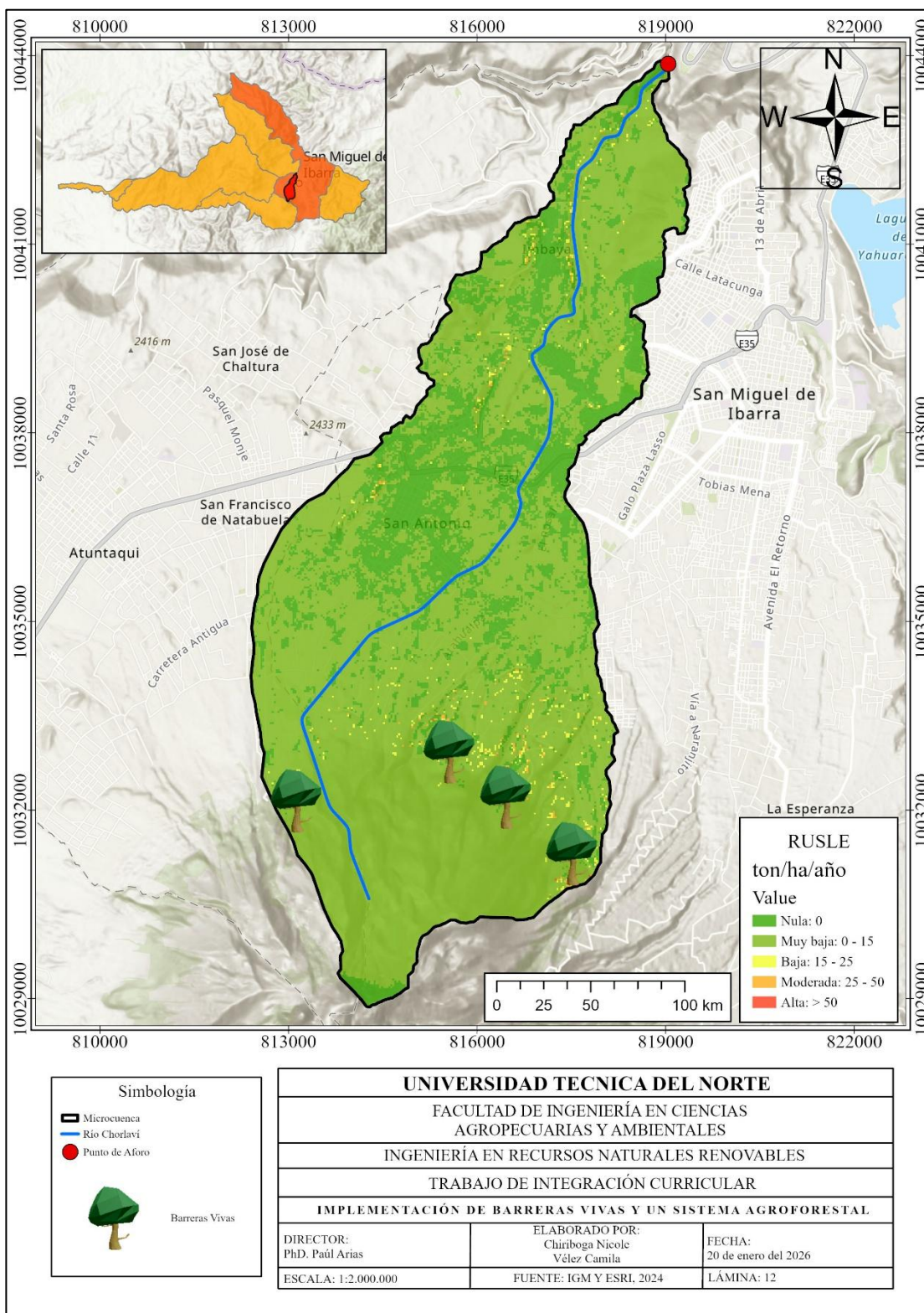


Legenda	
Clasificación de la Microcuenca	
■	Parte Baja
■	Parte Media
■	Parte Alta

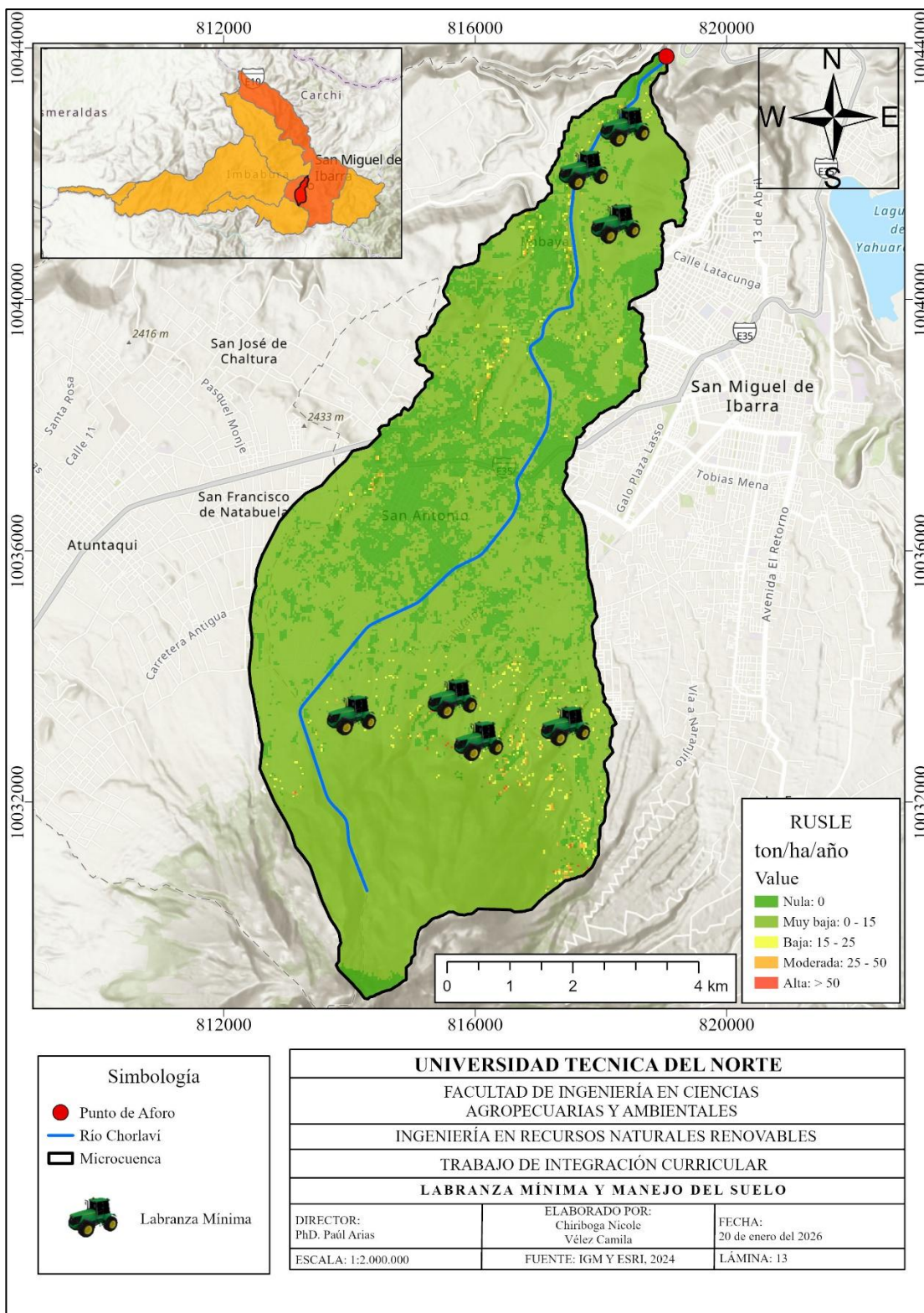
UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		
CLASIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHORLAVÍ		
DIRECTOR: PhD. Paúl Arias	ELABORADO POR: Chiriboga Nicole Vélez Camila	FECHA: 20 de enero del 2026
ESCALA: 1:2.000.000	FUENTE: IGM Y ESRI, 2024	LÁMINA: 11

Anexo 12

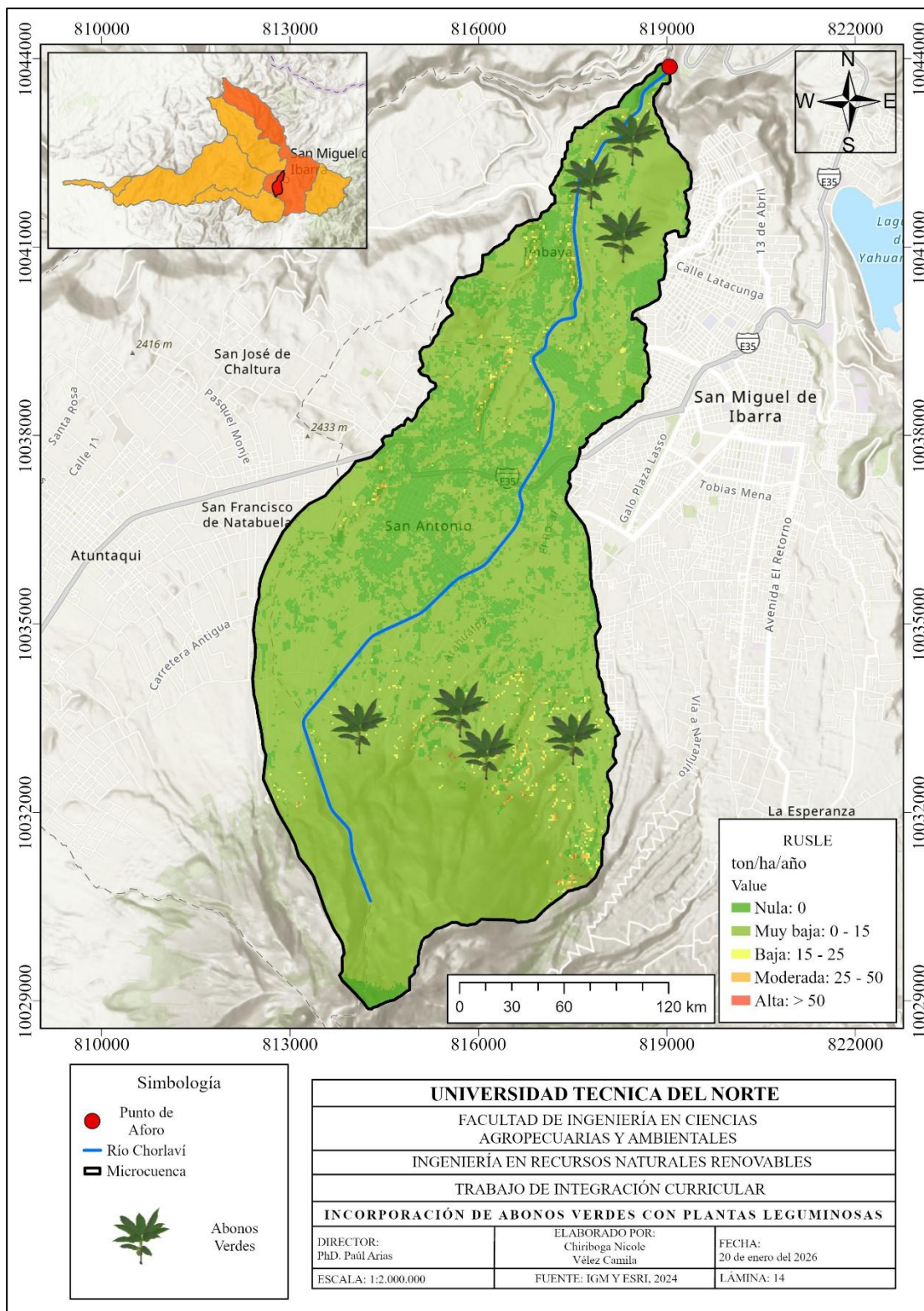
Implementación de barreras vivas y un sistema agroforestal



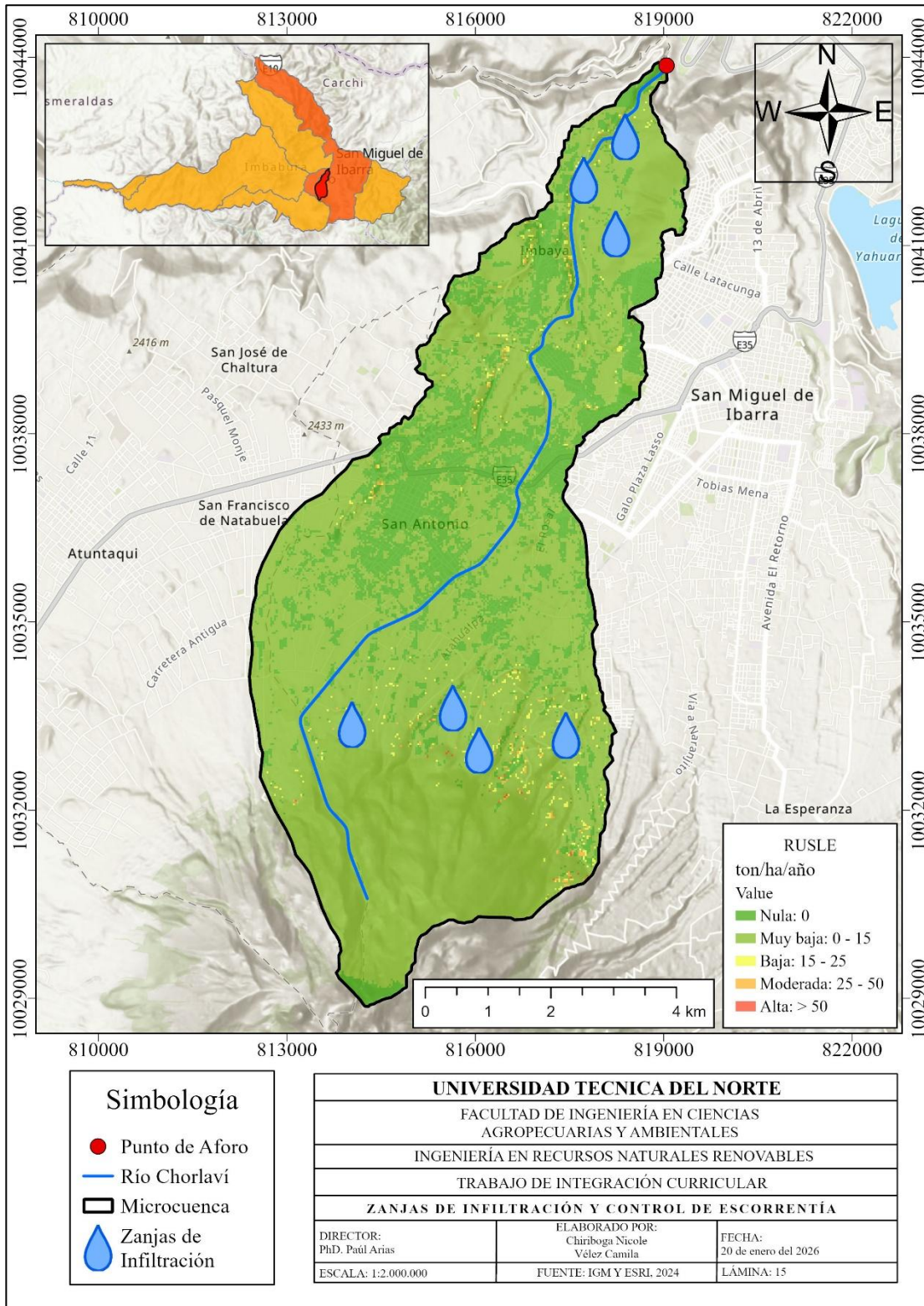
Anexo 13. Labranza mínima y manejo del suelo



Anexo 14. Abonos verdes con especies leguminosas



Anexo 15.
Zanjas de infiltración y control de escorrentía



Anexo 16. Matriz de confusión e coeficiente kappa

Confusion matrix online calculator

[Home page](#)

Draw confusion matrix for classes.

		Truth data							Classification overall	User's accuracy (Precision)
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7		
Classifier results	Class 1	<input type="text" value="48"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="48"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="64"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="67"/>	<input type="text" value="95.522%"/>
	Class 3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="66"/>	<input type="text" value="98.485%"/>
	Class 4	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="63"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="96.923%"/>
	Class 5	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="47"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="49"/>	<input type="text" value="95.918%"/>
	Class 6	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Class 7	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="31"/>	<input type="text" value="31"/>	<input type="text" value="100%"/>
	Truth overall	<input type="text" value="49"/>	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="65"/>	<input type="text" value="64"/>	<input type="text" value="48"/>	<input type="text" value="28"/>	<input type="text" value="34"/>	<input type="text" value="353"/>	
Producer's accuracy (Recall)	<input type="text" value="97.959%"/>	<input type="text" value="98.462%"/>	<input type="text" value="100%"/>	<input type="text" value="98.438%"/>	<input type="text" value="97.917%"/>	<input type="text" value="96.429%"/>	<input type="text" value="91.176%"/>			

Overall accuracy

(OA):

Kappa¹:

[> Calculate confusion matrix <](#)

2007 by Marco Vanetti

¹See: J. Richard Landis and Gary G. Koch - *The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data*, Biometrics, Vol. 33, No. 1 (Mar., 1977), pp. 159-174.

Anexo 17. Cálculo del PBias y RMSE para la validación del modelo *RUSLE*

Nº MUESTRA	SY Observado	SY Simulado	SYob-SYsim	(SYob-SYsim) ²	(SYob-Sobs mean) ²
1	1,48	0,37	1,11	1,23350	0,96
2	0,73	0,37	0,37	0,13455	0,06
3	0,14	0,37	-0,23	0,05163	0,13
4	0,26	0,37	-0,11	0,01175	0,06
5	0,24	0,37	-0,12	0,01535	0,06
6	0,21	0,37	-0,16	0,02562	0,08
7	0,11	0,37	-0,25	0,06403	0,15
8	0,27	0,37	-0,09	0,00863	0,05
9	0,75	0,37	0,38	0,14616	0,06
10	0,68	0,37	0,32	0,09932	0,03
11	0,72	0,37	0,36	0,12708	0,05
12	0,35	0,37	-0,02	0,00024	0,02
SUMATORIA	5,95	4,40	1,55	1,92	1,72

PROMEDIO 0,50

DESVEST 0,39514708

Pbias	0,26
Pbias (%)	26,05

	0,160
RMSE	0,40

Anexo 18. Resultados del análisis de agua

Caudal (m3/s)	Superficie cuenca (ha)	Sedimentos en Suspensión (kg/s)	Sedimentos en Suspensión (ton/año)	Sedimentos en Suspensión (ton/ha/año)	SDR SDR=0.5656*S^-0.11	A (Valor promedio RUSLE) ton/ha/año	SY SY=A*SDR (ton/ha/año)
1,49	6064,5	0,28608	9021,81888	1,487644304	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,2533	7988,0688	1,317185061	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,3129	9867,6144	1,627110957	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,33972	10713,40992	1,766577611	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,02682	845,79552	0,139466653	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,05662	1785,56832	0,294429602	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03576	1127,72736	0,185955538	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,02086	657,84096	0,108474064	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,02384	751,81824	0,123970359	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03278	1033,75008	0,170459243	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,05364	1691,59104	0,278933307	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,06258	1973,52288	0,325422191	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,07152	2255,45472	0,371911076	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03576	1127,72736	0,185955538	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03278	1033,75008	0,170459243	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03874	1221,70464	0,201451833	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,04172	1315,68192	0,216948128	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03874	1221,70464	0,201451833	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,01192	375,90912	0,061985179	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,02384	751,81824	0,123970359	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,0298	939,7728	0,154962948	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,06258	1973,52288	0,325422191	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,05662	1785,56832	0,294429602	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03874	1221,70464	0,201451833	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,13112	4135,00032	0,681836973	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,1639	5168,7504	0,852296216	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,13708	4322,95488	0,712829562	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,17582	5544,65952	0,914281395	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,03576	1127,72736	0,185955538	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,18178	5732,61408	0,945273985	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,1192	3759,0912	0,619851793	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,11026	3477,15936	0,573362909	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,18774	5920,56864	0,976266574	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,06258	1973,52288	0,325422191	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,07748	2443,40928	0,402903666	0,22	1,69	0,37
1,49	6064,5	0,06258	1973,52288	0,325422191	0,22	1,69	0,37

Anexo 19.

Análisis de materia orgánica de la zona media y baja de la microcuenca del río Chorlaví

LABONORT
LABORATORIOS NORTE
Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DE PROPIETARIO		DATOS DE LA PROPIEDAD	
Nombre: NICOLE CHIRIBOGA		Provincia: Imbabura	
Ciudad: Ibarra		Cantón: Ibarra	
Teléfono: 0988012839		Parroquia: San Antonio	
Fax:		Sitio: Sn Antonio	
DATOS DEL LOTE		DATOS DE LABORATORIO	
Sitio: San Antonio		Nro Reporte.: 12572	
Superficie:		Tipo de Análisis: Elemental	
Número de Campo: Muestra #1		Muestra: Suelo, M #1	
Cultivo Actual:		Fecha de Ingreso: 2025-12-15	
A Cultivar:		Fecha de Reporte: 2025-12-17	

Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION							
N		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
P		ppm								
S		ppm								
K		meq/100 ml								
Ca		meq/100 ml								
Mg		meq/100 ml								
Zn		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Cu		ppm								
Fe		ppm								
Mn		ppm								
B		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td><td style="width: 33%;">TOXICO</td></tr> </table> <p>0 Requiere Cal 5.5 6.5 7.0 7.5 8.0</p>			BAJO	MEDIO	ALTO	TOXICO	
BAJO	MEDIO	ALTO				TOXICO				
pH			<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 20%;">Acido</td><td style="width: 20%;">Lig. Acido</td><td style="width: 20%;">Pract. Neutro</td><td style="width: 20%;">Lig. Alcalino</td><td style="width: 20%;">Alcalino</td></tr> </table>			Acido	Lig. Acido	Pract. Neutro	Lig. Alcalino	Alcalino
Acido	Lig. Acido	Pract. Neutro				Lig. Alcalino	Alcalino			
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Al		meq/100 ml								
Na		meq/100 ml								
Ce		mS/cm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">No Salino</td><td style="width: 33%;">Lig. Salino</td><td style="width: 33%;">Salino</td><td style="width: 33%;">Muy Salino</td></tr> </table>			No Salino	Lig. Salino	Salino	Muy Salino	
No Salino	Lig. Salino	Salino				Muy Salino				
MO	1.93	%	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Ca		meq/100ml	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Mg		meq/100ml								

Ca	Mg	Ca+Mg (meq/100ml)	%	ppm	(%)	Clase Textural	
Mg	K	Sum Bases	NTot	Cl	Arena	Limo	Arcilla
		56.40			34.00	9.60	
							Franco arenoso

Dr. Quim. Edison M. Miño M.
Responsable Laboratorio

LABONORT
LABORATORIOS NORTE
Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DE PROPIETARIO		DATOS DE LA PROPIEDAD	
Nombre: NICOLE CHIRIBOGA		Provincia: Imbabura	
Ciudad: Urcuquí		Cantón: Urcuquí	
Teléfono: 0988012839		Parroquia: Imbaya	
Fax:		Sitio: Imbaya	
DATOS DEL LOTE		DATOS DE LABORATORIO	
Sitio: Imbaya		Nro Reporte.: 12573	
Superficie:		Tipo de Análisis: Elemental	
Número de Campo: Muestra #2		Muestra: Suelo, M #2	
Cultivo Actual:		Fecha de Ingreso: 2025-12-15	
A Cultivar:		Fecha de Reporte: 2025-12-17	

Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION							
N		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
P		ppm								
S		ppm								
K		meq/100 ml								
Ca		meq/100 ml								
Mg		meq/100 ml								
Zn		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Cu		ppm								
Fe		ppm								
Mn		ppm								
B		ppm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td><td style="width: 33%;">TOXICO</td></tr> </table> <p>0 Requiere Cal 5.5 6.5 7.0 7.5 8.0</p>			BAJO	MEDIO	ALTO	TOXICO	
BAJO	MEDIO	ALTO				TOXICO				
pH			<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 20%;">Acido</td><td style="width: 20%;">Lig. Acido</td><td style="width: 20%;">Pract. Neutro</td><td style="width: 20%;">Lig. Alcalino</td><td style="width: 20%;">Alcalino</td></tr> </table>			Acido	Lig. Acido	Pract. Neutro	Lig. Alcalino	Alcalino
Acido	Lig. Acido	Pract. Neutro				Lig. Alcalino	Alcalino			
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Al		meq/100 ml								
Na		meq/100 ml								
Ce		mS/cm	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">No Salino</td><td style="width: 33%;">Lig. Salino</td><td style="width: 33%;">Salino</td><td style="width: 33%;">Muy Salino</td></tr> </table>			No Salino	Lig. Salino	Salino	Muy Salino	
No Salino	Lig. Salino	Salino				Muy Salino				
MO	0.40	%	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Ca		meq/100ml	<table border="1" style="width: 100%; height: 80px;"> <tr><td style="width: 33%;">BAJO</td><td style="width: 33%;">MEDIO</td><td style="width: 33%;">ALTO</td></tr> </table>			BAJO	MEDIO	ALTO		
BAJO	MEDIO	ALTO								
Mg		meq/100ml								

Ca	Mg	Ca+Mg (meq/100ml)	%	ppm	(%)	Clase Textural	
Mg	K	Sum Bases	NTot	Cl	Arena	Limo	Arcilla
		70.40			26.00	3.60	
							Arenoso franco

Dr. Quim. Edison M. Miño M.
Responsable Laboratorio

Anexo 20
Fotografías de salidas a campo



Descripción: Colecta de muestras de agua y suelo durante el estudio.