



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA
DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL
SALVADOR**

Anna Lucía García Sagastume

Asesorado por el Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta

Guatemala, febrero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA
DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL
SALVADOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANNA LUCÍA GARCÍA SAGASTUME

ASESORADO POR EL ING. MANUEL ALFREDO ARRIVILLAGA OCHAETA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta
EXAMINADOR	Ing. Oscar Argueta Hernández
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA
DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL
SALVADOR**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería civil, con fecha 3 de julio de 2020.

Anna Lucía García Sagastume

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 20 de enero de 2022
REF.EPS.DOC.04.01.2022

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Anna Lucía García Sagastume, Registro Académico 201603098 y CUI 3383 30747 2007** de la Carrera de Ingeniería Civil, procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL SALVADOR.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Civil

.c. Archivo
MAAO/ra

Edificio de EPS, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, zona 12.
Teléfono directo: 2442-3509

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 24 de enero de 2022
REF.EPS.D.11.01.2022

Ing. Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Fuentes Roca:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL SALVADOR**, que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Anna Lucía García Sagastume, CUI 3383 30747 2007 y Registro Académico 201603098**, quien fue debidamente asesorada y supervisada por el Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación por parte del Asesor-Supervisor, como Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS



OAH/ra



ESCUELA DE
INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Guatemala, 21 de enero 2022

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Coordinador del Departamento de Hidráulica
Guatemala

Ingeniero Aguilar:

Le informo que he revisado el Informe Final de EPS, **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL SALVADOR**, de la estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil **ANNA LUCÍA GARCÍA SAGASTUME**, Registro Académico 201603098, como Asesor al Ing. **MANUEL ALFREDO ARRIVILLAGA OCHAETA**.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte académico para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
U S A C

Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa

Revisor del Departamento de Hidráulica

Asesor
Interesado





ESCUELA DE
INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

LNG.DIRECTOR.042.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL SALVADOR**, presentado por: **Anna Lucía García Sagastume**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, febrero de 2022

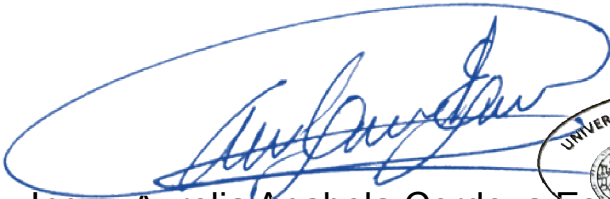


Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.0104.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LEMPA, UBICADA EN LA REGIÓN TRIFINIO: GUATEMALA, HONDURAS Y EL SALVADOR**, presentado por: **Anna Lucía García Sagastume**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, febrero de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Dina Jezabel Sagastume Cerón y Oscar Giovani García Portillo por enseñarme a soñar en grande, creer en mí, ser mi soporte y por su infinito cariño.

Mis hermanas

Vivian Rocío, Dina Jezabel y Christell Lissette García Sagastume, por su apoyo incondicional, por soñar conmigo, por cuidar de mí y ser fuente de inspiración, así como también una luz en el camino.

Mis amigos

Rodrigo Merck, Luis Alfredo Alvarado y Daniela Arriola, por su compañía, sus consejos y su cariño con el cual iluminaron incluso mis días grises.

Mis profesores

Ronald Mynor Peláez Sánchez y Luis Fernando Olayo Ortiz, por creer en mi talento y apoyar mis sueños.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios la cual me brindo herramientas para formarme académicamente, pero sobre todo como persona.

**Facultad de
Ingeniería**

Por ser el medio a través del cual alcancé mi sueño, aprendí muchas cosas y conocí a personas con quienes formé lazos académicos y también amistades valiosas.

**Mancomunidad
Trinacional
Fronteriza Río
Lempa**

Por confiar en mis capacidades y abrirme las puertas para realizar mi Ejercicio Profesional Supervisado.

**Centro de Estudios
Urbanos y
Regionales**

Por permitirme realizar mis practicas finales. Agradezco su amabilidad y su apertura, pues fue acá donde encontré una base con la que amplié mi visión y redireccioné mis anhelos profesionales.

Mis profesores

Por compartirme sus experiencias y conocimientos; por creer en mí, proteger mis sueños y alentarme a seguir adelante. Agradezco especialmente a Jaime Pérez, Eddy Josué Solares, Bertha Molina, Mario Rodolfo Corzo Ávila, Ronald Mynor Peláez Sánchez y Luis Fernando Olayo Ortiz.

Mis amigos de la vida

Daniela Arriola, Luis Miranda, Kevin Sánchez, Andrea Velásquez y Tiffany España por su amistad constante, por apoyarme y alegrarse de mis éxitos.

Mis amigos de promoción

Glenda Borrayo, Jorge Baldizon, Ashley Guzmán, Edwin López, Rodrigo Merck, Orlando Osorio y Elí Machic Por acompañarme en el proceso de aprendizaje, por darme alegrías y momentos únicos que guardaré por siempre en mi mente y corazón.

Mis amigos de la universidad

Por enseñarme que la amistad se encuentra en cualquier lugar y que la formación académica va más allá de las aulas y los libros.

Nely Ramírez

Por hacerme más fácil el estar lejos de casa. Por su cariño, apoyo y por ser una amiga.

Mi asesor

Ingeniero Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta por apoyarme y acompañarme en este proceso. Su entusiasmo y alegría hizo más fácil esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	3
2.1. Descripción del proyecto	3
2.2. Características biofísicas de la cuenca	4
2.3. Ciclo hidrológico	6
2.4. Infiltración	7
2.5. Escorrentía	7
2.6. Evaporación.....	8
2.7. Evapotranspiración	9
2.8. Recarga hídrica	9
2.8.1. Clasificación de zonas de recarga hídrica	10
2.9. Parámetros que intervienen en el proceso de recarga hídrica	11
2.9.1. Balance hídrico	13
2.10. Calidad fisicoquímica del agua	14
2.10.1. Oxígeno disuelto.....	16
2.10.2. Potencial de hidrogeno	17

2.10.3.	Temperatura	17
2.10.4.	Conductividad eléctrica	17
2.10.5.	Turbidez	18
2.10.6.	Sólidos totales.....	18
2.10.7.	Sólidos disueltos totales.....	19
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	21
3.1.	Variables y campo de estudio	21
3.2.	Metodología	23
3.2.1.	Metodología de Gunther Schosinsky	23
3.2.2.	Metodología de Matus Silva.....	33
3.2.3.	Análisis estadístico.....	40
3.3.	Fase de investigación	41
3.3.1.	Determinación de puntos de muestreo para estudiosde suelo.....	41
3.3.2.	Información climática	44
3.4.	Fase de servicio técnico profesional	45
3.4.1.	Determinación de la textura del suelo	45
3.4.2.	Pruebas de infiltración.....	46
3.4.3.	Análisis de la calidad de agua del río.....	47
3.4.4.	Información climática	47
4.	FASE DE GABINETE FINAL	49
4.1.	Metodología de Gunther Schosinsky N.....	49
4.2.	Metodología Matus Silva.....	52
4.2.1.	Mapa de pendientes.....	53
4.2.2.	Mapa de tipo de suelos	54
4.2.3.	Mapa geológico.....	57
4.2.4.	Mapa de cobertura vegetal	59

4.2.5.	Mapa del uso del suelo	62
4.2.6.	Mapa de potencial de recarga hídrica por el método de Matus Silva	65
5.	RESULTADOS	67
5.1.	Textura del suelo	67
5.2.	Pruebas de infiltración	69
5.3.	Análisis de la calidad de agua del río	69
5.4.	Información climática.....	71
5.5.	Recarga hídrica con metodología Gunther Schosinsky....	73
5.6.	Recarga hídrica con la metodología Matus Silva.....	77
6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	81
6.1.	Calidad de agua	81
6.2.	Análisis de la metodología Gunther Schosinsky.....	83
6.3.	Análisis de la metodología Matus Silva	83
6.4.	Comparación de metodologías.....	84
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	APÉNDICES	99
	ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Parámetros de calidad de agua en Guatemala, Honduras y El Salvador	16
2.	Ubicación de la Cuenca Alta del Río Lempa (CARL), 2021	22
3.	Puntos de monitoreo para la calidad del agua en CARL, 2021	42
4.	Estaciones meteorológicas con influencia en CARL, 2021	45
5.	Triángulo de textura	46
6.	Mapa de pendientes de CARL, 2021	53
7.	Potencial de recarga hídrica según tipo de suelo, 2017	56
8.	Potencial de recarga hídrica según geología, 2019	58
9.	Cobertura vegetal CARL, 2020	61
10.	Uso del suelo CARL, 2011	64
11.	Textura de suelos de CARL, 2021	68
12.	Posibilidad de recarga hídrica en CARL usando la metodología de Gunther Schosinsky, 2020	73
13.	Área en kilómetros de zonas potenciales de recarga hídrica de CARL según la metodología de Gunther Schokosinsky	74
14.	Área de potencial de recarga hídrica por país en kilómetros cuadrados según la Metodología de Gunther Schosinsky	75
15.	Posibilidad de recarga hídrica en CARL usando la metodología de Matus Silva.....	77
16.	Área en kilómetros de zonas potenciales de recarga hídrica de CARL según la metodología de Matus Silva.....	78

17.	Área de potencial de recarga hídrica por país en kilómetros cuadrados según la Metodología de Matus Silva	79
-----	---	----

TABLAS

I.	Unidad de medida de las variables a utilizar	21
II.	Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad aparente según textura de suelo	26
III.	Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo.....	26
IV.	Valores para infiltración por efecto de pendiente (Kp)	29
V.	Valores de infiltración por efecto de cobertura vegetal (Kv)	29
VI.	Potencial de recarga hídrica según el modelo de Matus Silva	34
VII.	Posibilidad de recarga según micro relieve y pendiente.....	35
VIII.	Posibilidad de recarga según textura del suelo	36
IX.	Posibilidad de recarga según el tipo de roca	37
X.	Posibilidad de recarga según el porcentaje de cobertura vegetal	39
XI.	Posibilidad de recarga según el uso del suelo.....	40
XII.	Puntos de monitoreo para la calidad del agua de CARL	43
XIII.	Estaciones meteorológicas que influyen en CARL	44
XIV.	Reclasificación del NDVI para el cálculo de profundidad de raíces.....	50
XV.	Reclasificación del NDVI para el cálculo de Kv	51
XVI.	Posibilidad de recarga según volumen de recarga anual por kilómetro cuadrado	52
XVII.	Reclasificación de zonificación hídrica potencial de la Región Trifinio según la metodología de Matus Silva.....	55
XVIII.	Reclasificación de unidades hidrogeológicas de la Región Trifinio según la metodología de Matus Silva.....	57
XIX.	Reclasificación del NDVI según la metodología de Matus Silva.....	61

XX.	Reclasificación de cobertura y uso de la tierra según la metodología de Matus Silva.....	63
XXI.	Velocidad del suelo según textura	69
XXII.	Análisis de la calidad de la cuenca alta del río Lempa, febrero 2020...	70
XXIII.	Temperatura media de las estaciones meteorológicas ubicadas cercanas o dentro de la cuenca alta del río Lempa, 2020.....	71
XXIV.	Precipitación media de las estaciones meteorológicas ubicadas cercanas o dentro de la cuenca alta del río Lempa, 2020	72
XXV.	Porcentaje de potencial de recarga hídrica por país según la metodología Gunther Schosinsky	76
XXVI.	Porcentaje de potencial de recarga hídrica por país según la Metodología de Matus Silva	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CC	Capacidad de campo
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
°C	Grados centígrados
F	Grados fahrenheit
Ha	Hectárea
NDVI	índice de vegetación de diferencia normalizada
m	Metro
mm	Milímetro
mm/día	Milímetros por día
PMP	Punto de marchitez permanente

GLOSARIO

Capacidad de campo	Es el contenido de agua que se retiene en el suelo después de ser saturado con agua.
Infiltración	Velocidad con que el agua penetra en la superficie del suelo.
Interpolación IDW	Herramienta que permite la estimación de los valores cercanos a las celdas, mediante el cálculo del valor promedio de los puntos de dato vecinos de la celda de procesamiento.
Isotermas	Línea que une los puntos de un plano cartográfico que tienen la misma temperatura en un tiempo determinado.
Isoyetas	Línea que une los puntos de un plano cartográfico que tienen el mismo valor de precipitación en un tiempo determinado.
Landsat	Satélites estadounidenses que orbitan la Tierra, permitiendo la obtención de imágenes satelitales de alta resolución de la superficie terrestre.
Modelo de Elevación	Representación visual y matemática de los valores de

digital	altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas y relieves del terreno.
Precipitación efectiva	Fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas; se ve afectada por factores como intensidad de la precipitación, clima, topografía, contenido de humedad e infiltración.
Punto de marchitez	Punto donde las plantas son incapaces de ejercer una fuerza de succión que les permita absorber el agua, provocando que se marchiten irreversiblemente.
Sistemas de Información geográfica	Unión de la información y de las herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con objetivos concretos, los cuales traen inmersos una posición geográfica.
Sistema agroforestal	Combinación de cultivos agrícolas con árboles, con el fin de maximizar el aprovechamiento del espacio y uso del suelo.
Sistema silvopastoril	Sistemas que permiten la producción silvícola (madera) y pastoril (pasto), esto con el fin de maximizar la producción sin alterar las características propias del ecosistema.

RESUMEN

La cuenca del río Lempa, se caracteriza por estar ubicada en la Región Trifinio, nace en el Oriente de Guatemala, pasa por Honduras y desemboca en el Pacífico en territorio salvadoreño. La Región Trifinio ha estado propensa en los últimos años al crecimiento urbano, cambio del uso del suelo, contaminación del agua, tala de árboles, entre otras variaciones que afectan la disponibilidad y calidad del recurso hídrico; por tal razón, se llevó a cabo un proceso que tienen como propósito identificar las zonas potenciales de recarga hídrica en la Cuenca Alta del Río Lempa ubicada dentro de la Región Trifinio, puesto que la recarga hídrica ocurre naturalmente en esta parte de la cuenca; así también se hizo un monitoreo de la calidad de agua de las fuentes superficiales de la cuenca.

Las zonas de recarga hídrica son importantes puesto que permite que el agua proveniente de la precipitación, agua superficial o subterránea, se incorpore a un acuífero y de esta forma se reabastezcan las aguas subterráneas. Para la determinación de zonas potenciales de recarga hídrica en la Cuenca Alta del Río Lempa, se utilizaron dos metodologías, que consideran variables climáticas y parámetros del terreno, así también se hizo uso de sistemas de información geográfica. Las metodologías utilizadas fueron las planteadas por: Gunther Schosinsky en 2006 y Matus Silva en 2007.

Los resultados obtenidos mediante cada una de las metodologías fueron evaluados de forma individual y posteriormente se compararon. Ambas metodologías indicaron un potencial mayoritariamente moderado; al combinar ambos resultados, se encontró que el 28 % del área de la Cuenca Alta del Río Lempa tiene un potencial alto de recarga hídrica.

OBJETIVOS

General

Identificar las zonas potenciales de recarga hídrica en la parte alta de la cuenca Río Lempa, ubicada en Guatemala, El Salvador y Honduras.

Específicos

1. Describir los parámetros que intervienen en el proceso de recarga hídrica en la parte alta de la cuenca del Río Lempa.
2. Caracterizar y comparar el potencial de recarga hídrica de la cuenca alta del Río Lempa obtenido por distintas metodologías.
3. Elaborar mapas de zonas potenciales de recarga hídrica haciendo uso de sistemas de información geográfica.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Lempa se caracteriza por ser una cuenca trinacional, es decir que se encuentra ubicada en tres países: Guatemala, Honduras y El Salvador; esta situación complica el manejo y gestión de la cuenca debido a que cada país se rige bajo su propio marco jurídico. El río Lempa tiene una extensión de 17 926 km² de los cuales el 55,1 % se ubica en El Salvador, 14,3 % en Guatemala y el 30,6 % en Honduras. Debido a la distribución anteriormente descrita, el Río Lempa es uno de los ríos más importantes en El Salvador; sin embargo, la cuenca es de importancia y de interés para toda la región.

La parte alta de la cuenca, que es donde naturalmente ocurre la recarga, tiene una extensión de 4 343 km² y se ubica de igual forma en los tres países. Es importante indicar que para la investigación en cuestión se tomó únicamente la parte de la cuenca Alta del Río Lempa que se ubica dentro de la Región Trifinio, por tanto, el área de estudio tiene una extensión de 3 185 km², de los cuales el 51,38 % corresponden a Guatemala, el 17 % a Honduras y el 31,61 % a El Salvador.

Tomando en cuenta la riqueza hídrica de la zona, se considera de importancia identificar las zonas potenciales de recarga hídrica, puesto que el territorio está propenso a cambios de uso del suelo, crecimiento urbano, permeabilización del suelo, tala de árboles, entre otras variaciones que pueden afectar a la recarga hídrica. Cabe destacar que solamente se analiza el área de la cuenca alta del Río Lempa ubicada dentro de la Región Trifinio.

Para determinar la recarga hídrica se utilizó la metodología de Gunther Schosinsky (2006) y la de Matus Silva (2007), debido a que estas metodologías consideran factores climáticos y características del terreno; cabe destacar que se utilizaron Sistemas de Información geográfica, los cuales permitieron darle una ubicación geoespacial a las zonas identificadas.

1. ANTECEDENTES

La cuenca del río Lempa se caracteriza por tener relación de aguas arriba-aguas abajo en tres países: Guatemala, Honduras y El Salvador; esta situación complica el manejo y gestión de la cuenca debido a que cada país se rige bajo su propio marco jurídico. Por esta razón, múltiples instituciones e iniciativas han promovido acciones con el fin de impulsar la gestión del río Lempa de manera trinacional.

En 1997 se estableció la Comisión Trinacional Plan Trifinio (CTPT), con la firma de un Tratado Trinacional, entre las Repúblicas de El Salvador, Honduras y Guatemala; el Plan Trifinio forma parte del Sistema de Integración centroamericana (SICA) siendo su propósito el mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades fronterizas. En 2006, dicha Comisión formula la estrategia “Agua sin fronteras”, la cual reconoce la importancia del recurso hídrico considerando el impacto del agua en la sociedad, el ambiente y los procesos productivos. Producto de esta estrategia, en 2009 el Plan Trifinio publicó una investigación titulada “los recursos hídricos en la parte alta del río Lempa” en donde se abordan aspectos la cuenca del río Lempa como: ubicación, calidad de agua, uso de suelo, estaciones meteorológicas, precipitación anual, entre otros parámetros.

Debido al impacto e importancia de la región trifinio, la cual tiene necesidades y situaciones comunes, se formó por voluntad política de doce municipios de Guatemala, Honduras y El Salvador, la Mancomunidad trinacional fronteriza río Lempa (MTFRL) la cual funciona a través de políticas públicas, que ha impulsado desde el año 2009. Actualmente cuenta con cinco políticas pública

locales transfronterizas orientadas a temas priorizados como ordenamiento territorial, manejo integral de los residuos sólidos, manejo integral del recurso hídrico, gestión integral del recurso bosque y atención de la seguridad alimentaria y nutricional.

En lo referente al recurso hídrico de la región se desarrolló la política pública “Aguas compartidas” que tiene como objetivo la promoción de la gestión sostenible e integral del agua en la región trinacional. En esta política pública se aborda, entre otras acciones, el desarrollo y gestión de la infraestructura de abastecimiento de agua potable de las comunidades de la región trifuera; así también, considerando que la Cuenca Alta del Río Lempa (CARL), que es donde justamente se da la recarga, se encuentra ubicada dentro de la región trifuera.

La Unidad de Monitoreo Ambiental Trinacional (UMAT) de la MTFRL apoyada por el Centro Universitario de Oriente de la Universidad San Carlos de Guatemala (CUNORI), realiza de forma semestral, un monitoreo en 22 puntos distribuidos en CARL, de los cuales 8 puntos están ubicados en Guatemala, 8 en El Salvador y 7 en Honduras; dichos monitoreos evalúan la calidad de agua de cada microcuenca para determinar los focos de contaminación. Producto de estos monitoreos, en 2019 se publicó un documento en el cual se exponen los resultados de los análisis de la calidad de agua obtenidos en el periodo 2010-2018.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Descripción del proyecto

El río Lempa es una cuenca trinacional con una extensión de 17 926 km² de los cuales el 55,1 % se ubica en El Salvador, 14,3 % en Guatemala y el 30,6 % en Honduras; la cuenca se divide en alta, baja y media. Específicamente la Cuenca Alta del Río Lempa (CARL), que se caracteriza por ser donde naturalmente ocurre la recarga hídrica, tiene una extensión de 4 343 km².

Considerando que la parte alta de la Cuenca del Río Lempa se ubica en la región triffinio, la Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lempa (MTFRL), las municipalidades y otras instituciones realizan acciones constantes para la protección y gestión eficiente de la cuenca, por tal razón se considera importante proporcionar una herramienta que permita la ubicación espacial de las zonas potenciales de recarga hídrica en CARL.

En el presente trabajo se realizó un análisis de la parte alta del río Lempa ubicada dentro de la Región Triffinio, la cual tiene una extensión de 3 185 km², de los cuales el 51,38 % se encuentra en Guatemala, 17 % en Honduras y 31,6 % en El Salvador. Esto se hizo mediante trabajo de campo y utilización de sistemas de información geográfica. Se evaluaron 14 puntos ubicados en las microcuencas que componen CARL. Para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica se utilizó la metodología de Gunther Schosinsky y la de Matus Silva; para ello se recopiló la información geoespacial disponible, así como también información climática de los entes encargados de cada país.

2.2. Características biofísicas de la cuenca

Una cuenca está definida como un espacio territorial delimitado por la línea divisoria, conformada por un sistema hídrico que conducen sus aguas a un cuerpo de agua -río, lago o mar-¹. Al hablar de cuenca existen dos conceptos: cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica, la diferencia radica en que la primera hace referencia exclusivamente al agua superficial, mientras que la segunda incluye al agua subterránea; esta diferenciación es importante, principalmente cuando el relieve y fisiografía, tienen forma y simetría diferente a la configuración geológica de la cuenca²; es decir, que esta diferencia es relevante si la cuenca subterránea cambia la dirección del flujo subsuperficial para alimentar otra cuenca hidrográfica; por esta razón, el cálculo del balance hidrológico se hace sobre la cuenca hidrológica.

La cuenca se divide según su drenaje superficial en: subcuencas, microcuencas y quebradas³, las define de la siguiente manera:

- Subcuenca: conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.
- Microcuenca: es toda el área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca.

¹ MATUS SILVA, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR>. Consulta: 24 de enero de 2021.

² WORLD VISION. *Manual de manejo de cuencas*. <https://bit.ly/3CuGaV9>. Consulta: 24 abril de 2021.

³ ORDÓÑEZ GALVEZ, Juan Julio. *¿Qué es una cuenca Hidrológica?* <https://bit.ly/3AvK1Q1>. Consulta: 22 abril de 2021.

- Quebrada: es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca.

Además, una cuenca está compuesta por cuenca: alta, media y baja⁴.

- Cuenca alta: es la que corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por la divisoria de aguas.
- Cuenca media: es donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas, además es acá donde el río principal mantiene el cauce definido.
- Cuenca baja: (también llamada como zona transicional) es donde el río desemboca a ríos mayores o bien a zonas bajas tales como estuarios y humedales.

Sin embargo, las cuencas no siempre se pueden dividir en tres partes, pues si la diferencia de altura no es significativa (menor a 1 000 msnm) es factible dividir la cuenca solamente en dos partes e incluso hay ocasiones, cuando la cuenca es casi plana, la dificultad de dividirla es aún mayor; cuando esto sucede puede acudir a analizar el clima para establecer divisiones⁵.

Los aspectos biofísicos de la cuenca son: suelos, sistemas de producción, agua y flora⁶. En los suelos se debe tomar en cuenta el tipo de suelo, el uso, las pendientes, el potencial de erosión y la pedregosidad; en los sistemas de

⁴ ORDOÑEZ GALVEZ, Juan Julio. *¿Qué es una cuenca Hidrológica?* <https://bit.ly/3AvK1Q1>. Consulta: 22 abril de 2021.

⁵ WORLD VISION. *Manual de manejo de cuencas*. <https://bit.ly/3CuGaV9>. Consulta: 24 abril de 2021.

⁶ *Ibíd.*

producción, se debe evaluar los principales cultivos y su rendimiento; en el agua, se deben identificar los ríos, lagos y fuentes de agua; en la flora se deben identificar las principales especies existentes. También incluye la precipitación, la temperatura y la geología⁷.

2.3. Ciclo hidrológico

Describen al ciclo hidrológico a partir de tres subsistemas: atmosférico, superficial y de agua subterránea. Cada subsistema se abastece a través de diferentes formas⁸. En el caso del subsistema atmosférico se abastece mediante la evaporación o bien a través de la evapotranspiración, cuando existe cubierta vegetal en la superficie del terreno; el subsistema superficial se abastece mediante la escorrentía proveniente de la precipitación, y, el subsistema de agua subterránea se abastece mediante la infiltración proveniente de la precipitación. Es importante mencionar que no toda el agua proveniente de la precipitación se incorpora a los subsistemas superficiales o de agua subterránea, sino que vuelve a la atmosfera a través de la evaporación o evapotranspiración, a esta variable se le conoce como intercepción o pérdida.

Es decir, que el ciclo hidrológico depende de la precipitación, escorrentía superficial y la evaporación o bien la evapotranspiración; cada una de estas fases contribuye a la recirculación del agua en el planeta. El ciclo hidrológico es versátil y variable, debido a que en cada subsistema se retienen volúmenes de agua por determinado intervalo de tiempo; sin embargo, las propiedades físicas de la cuenca interfieren en la retención de dichos volúmenes de agua, así como

⁷ MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. p. 153.

⁸ BREÑA PUYOL, Agustín Felipe ; JACOBO VILA, Marco Antonio. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. <https://bit.ly/3xBuzzT>. Consulta: 22 de marzo de 2021.

también la actividad humana, pues el cambio de uso del suelo altera la permeabilidad de los terrenos provocando un incremento o reducción en la capacidad de infiltración, lo cual afecta a su vez en la cantidad de agua subterránea. A continuación, se detalla cada una de las partes del ciclo hidrológico.

2.4. Infiltración

La infiltración como el movimiento de agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra⁹. Ante este concepto es importante hacer la diferenciación con la percolación, la cual es el movimiento del agua en la tierra. La capacidad de infiltración es la cantidad de agua que el suelo es capaz de absorber por unidad de tiempo (mm/h, cm/min o cm/h)¹⁰.

Es importante resaltar que no toda el agua que se infiltra abastece las aguas subterráneas, pues una parte es absorbida por las plantas y otra sube por efectos de capilaridad del suelo. La infiltración varía según la humedad, compactación y composición del suelo.

2.5. Escorrentía

Se define como la cantidad de agua proveniente de lluvia, riego o deshielo que al exceder la capacidad de infiltración del suelo, y la capacidad de almacenamiento, fluye aguas debajo de las pendientes¹¹.

⁹ LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULUS, Joseph. *Hidrología para Ingenieros*. p. 40.

¹⁰ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR>. Consulta: 24 de enero de 2021.

¹¹ *Ibíd.*

Quien indica que la escorrentía se clasifica en¹²:

- Esgurrimiento superficial: proviene de la precipitación no infiltrada, por lo que escorre sobre la superficie. Este tipo de escurrimiento existe durante toda o la tormenta e inmediatamente después que esta termine.
- Esgurrimiento subsuperficial: forma parte de la precipitación infiltrada. El efecto sobre el escurrimiento total puede ser inmediato o retardado. Si es inmediato se analiza de la misma forma que el escurrimiento superficial, de lo contrario se analiza como escurrimiento subterráneo.
- Esgurrimiento subterráneo: proviene del agua subterránea, la cual es recargada por parte de la precipitación infiltrada, una vez que el suelo se ha saturado.

2.6. Evaporación

Este fenómeno aparece como consecuencia del calentamiento que los rayos solares producen sobre la superficie líquida de mares, lagos ríos, así como también en los suelos húmedos, convirtiendo el agua en vapor, mientras la atmósfera no esté saturada de vapor a la temperatura ambiente¹³.

¹² MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. p. 185.

¹³ BREÑA PUYOL, Agustín Felipe; JACOBO VILA, Marco Antonio. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. <https://bit.ly/3xBuzzT>. Consulta: 22 de marzo de 2021.

2.7. Evapotranspiración

Se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo¹⁴. Es importante resaltar, que la evapotranspiración depende de la humedad del suelo, pues cuando este se encuentra a capacidad de campo la evapotranspiración es máxima, por el contrario de cuando el suelo se encuentra a punto de marchitez. Cuando el suelo se encuentra entre estos dos puntos las plantas transpiran menos de acuerdo con la cantidad de agua disponible en el suelo.

2.8. Recarga hídrica

La recarga hídrica es el proceso mediante el cual, el agua procedente de afuera -infiltración de agua lluvia, agua superficial, regadíos, o bien de otro acuífero- se incorpora a un acuífero¹⁵, es una formación geológica con la capacidad de contener y transmitir agua en grandes cantidades y de forma continua¹⁶.

Para evaluar la capacidad de recarga hídrica de una zona se deben estudiar los siguientes factores: intensidad de precipitación, capacidad de infiltración del suelo y contenido de humedad en el suelo o roca; la variación de estos factores provoca infiltración, escorrentía superficial o que el suelo llegue a su capacidad de campo.

¹⁴ SCHONSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos*. <https://bit.ly/3yCT9I6>. Consulta: 24 de marzo 2021.

¹⁵ MURILLO DÍAZ, José Manuel. *Recarga de acuíferos, evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero Aluvial del bajo Guadalquivir*. p. 194.

¹⁶ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR> Consulta: 24 de enero de 2021.

Cuando la recarga depende de la infiltración, es necesario que la intensidad de precipitación sea menor que la capacidad de infiltración del suelo y que el contenido de humedad del suelo o roca sea menor a su capacidad de campo; de lo contrario se generará escorrentía o bien el agua precipitada servirá para abastecer la humedad del suelo impidiendo la infiltración¹⁷. La ubicación de la capa freática también influye en la capacidad de recarga del suelo.

La zona donde ocurre la infiltración es conocida como zona de recarga hídrica. Es importante resaltar que no toda el agua que se infiltra contribuye a la recarga hídrica, pues el agua percolada durante la infiltración es interceptada por intersticios capilares que transportan cierto porcentaje a la superficie mediante la capilaridad, reduciendo la cantidad de agua que llega a los acuíferos.

En las zonas de recarga hídrica es importante conservar la permeabilidad del suelo, así como también evitar actividades que generen contaminación que afecte la calidad del agua que se infiltra a los acuíferos.

2.8.1. Clasificación de zonas de recarga hídrica

De acuerdo con la recarga hídrica puede clasificarse según el movimiento de agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso en las siguientes categorías¹⁸:

- zonas de recarga hídrica superficial: Corresponde a toda la cuenca hidrográfica a excepción de las zonas totalmente impermeables. Dependiendo de las condiciones de drenaje, después de cada lluvia, la

¹⁷ BREÑA PUYOL, Agustín Felipe; JACOBO VILA, Marco Antonio. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. <https://bit.ly/3xBuzzT>. Consulta: 22 de marzo de 2021.

¹⁸ FAUSTINO, Jorge. *Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica*. [notas de clase]. p. 53.

zona de recarga hídrica superficial se humedece y origina escorrentía superficial¹⁹.

- Zonas de recarga hídrica subsuperficial: corresponden a las zonas de la cuenca donde los suelos tienen capacidad para retener el agua o almacenarla superficialmente sobre una capa impermeable que hace que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje²⁰
- Zonas de recarga hídrica subterráneas: corresponden a las zonas de la cuenca, tales como sitios planos o cóncavos y rocas permeables, donde el flujo vertical de la infiltración es significativo. Es a partir de esta forma que se abastecen los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa, es decir la que viene de otra cuenca²¹.
- Zonas de recarga hídrica subterránea: corresponden a zonas de la cuenca que presentan fallas geológicas profundas o donde el balance hidrogeológico genera pérdidas por percolación profunda²².

2.9. Parámetros que intervienen en el proceso de recarga hídrica

Como se expresó con anterioridad la recarga hídrica depende de la precipitación, la saturación y capacidad de infiltración de los suelos; sin embargo,

¹⁹ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR>. Consulta: 24 de enero de 2021.

²⁰ *Ibíd.*

²¹ *Ibíd.*

²² *Ibíd.*

también existen otros factores físicos de la cuenca que también afectan a la capacidad de recarga. Los parámetros que intervienen en el proceso de recarga hídrica son²³:

- El clima: dentro de este factor se toma en cuenta la precipitación pluvial, la evaporación y la evapotranspiración.
- El suelo: dentro de este factor se toma en cuenta la textura, la densidad aparente, el grado de saturación del suelo (contenido de humedad) y la capacidad de infiltración.
- Topografía: dentro de este factor debe evaluarse la pendiente, debido a que es esta característica la que determina el tiempo de contacto que tiene el agua con la superficie, por lo que influye en la generación de escorrentía superficial o bien en la infiltración.
- Estratigrafía geológica: dentro de este factor se debe evaluar los materiales geológicos en los distintos estratos o capas del suelo hasta llegar a la zona saturada (agua subterránea), ya que estos pueden afectar grandemente la cantidad de recarga hídrica.
- Cobertura vegetal: este factor disminuye la escorrentía superficial permitiendo mayor contacto del agua con la superficie, por lo que se facilita el proceso de infiltración del agua. Por otra parte, la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección.

²³ INAB. *Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica*. https://drive.google.com/file/d/143BCE7fSip0O7hSdc8ZFTUKygc0B_Qm_/view. Consulta: 14 de abril de 2021.

- **Escurrimiento:** este factor se refiere al agua proveniente de las precipitaciones que forma flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos los cuales son captados por los cauces de los ríos.

2.9.1. Balance hídrico

El balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmosfera²⁴. A través de este análisis se cuantifica los recursos hídricos a diferente escala como parcela, finca, cuenca o región; entre sus aplicaciones está la planificación y evaluación de los recursos hídricos de una cuenca, una región, una zona bajo riego, entre otros. así como también la influencia de las actividades del hombre. En otras palabras, el balance hídrico proporciona información sobre la oferta del recurso hídrico.

Para realizar este análisis se utiliza la ecuación del balance hídrico, la cual a pesar de ser una expresión sencilla, su complejidad se deriva de la dificultad de calcular sus términos, debido a que la mayoría se calculan de forma indirecta; así también el proceso se complica debido a la variabilidad derivada de la evapotranspiración, las pérdidas profundas a acuíferos y la variación del agua almacenada; sin embargo, estas variaciones se resuelven a través de suponer que tanto las pérdidas como la variación en el almacenamiento son despreciables²⁵.

²⁴ MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. p. 153.

²⁵ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR>. Consulta: 24 de enero de 2021.

*precipitación (+agua de otras cuencas) = evapotranspiración +
escorrentía superficial + escorrentía subterránea(+agua de otras cuencas) ±
almacenamiento*

Algunos autores también la expresan de la siguiente manera:

Balance hídrico = Total entradas – Total salidas

Sin embargo, ambas expresiones indican lo mismo, pues en la primera la precipitación es definida como el total de entradas y el resto de los elementos, suman el total de salidas.

2.10. Calidad fisicoquímica del agua

Calidad de agua hace referencia a la composición de agua, puntualmente al grado de afección por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas, por tal razón es que no es posible clasificarla como buena o mala sin conocer el uso que se le dará al agua en estudio²⁶.

Para establecer la calidad de agua se utilizan parámetros de calidad de agua, los cuales están encuadrados bajo valores numéricos que son definidos como límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisible (LMP), cuyas definiciones se indican a continuación con base en lo establecido en la norma COGUANOR NTG 29001:

²⁶ MTFRL (Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lempa), CUNORI (Centro de Universitario de Oriente). *Vulnerabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la Región Trifinio: período 2010-2018*. <https://bit.ly/3m4dWJB>. Consulta: 22 de febrero de 2021.

- Límite máximo aceptable (LMA): es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual estas características son percibidas por los consumidores desde el punto de vista sensorial, pero sin que implique un daño a la salud del consumidor.
- Límite máximo permisible (LMP): es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba de la cual el agua no es adecuada para consumo humano.

Cabe destacar que El Salvador tan solo maneja LMP, además es el país con valores más conservadores en sus parámetros. Por su parte, Honduras utiliza los términos Valor Máximo Recomendado y Valor máximo admisible, cuyas definiciones son las mismas que LMA y LMP respectivamente.

Es importante resaltar que estos límites varían según el país, en Guatemala se regulan a partir de la Norma COGUANOR NTG 29001, en El Salvador según la Norma Salvadoreña NSO 13.07.01:08 y en Honduras según la Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable. A continuación, la figura 1 resume los parámetros según la legislación de cada país.

Figura 1. **Parámetros de calidad de agua en Guatemala, Honduras y El Salvador**

Parámetros	Guatemala		Honduras		El Salvador	
	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP
Físico-Químicos						
Color	5.0 u	35.0 u	1 mg/l	15 mg/l	—	15
Conductividad	—	< 1,500 µs/cm	400 µs/cm	—	—	—
Dureza Total	100 mg/l	500 mg/l	400 mg/l	—	—	500 mg/l
pH	7.0 - 7.5	6.5 - 8.5	—	—	—	8.5
Sólidos Disueltos Totales	500 mg/l	1000 mg/l	—	1000 mg/l	—	1000 mg/l
Temperatura	15 - 25°C	34°C	—	—	—	No rechazable
Turbidez	5.0 NTU	15.0 NTU	1.0 NTU	5.0 NTU	—	5.0 NTU
Aniones Mayores						
Cloruros (Cl)	100 mg/l	250 mg/l	25 mg/l	250 mg/l	—	—
Sulfatos (SO ₄)	100 mg/l	250 mg/l	25 mg/l	250 mg/l	—	400 mg/l
Nutrientes						
Nitratos (NO ₃)	—	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	—	45 mg/l
Nitritos (NO ₂)	—	1 mg/l	—	1 mg/l	—	1 mg/l
Características Bacteriológicas						
Coliformes Totales	—	< 3 NMP/100 ml	—	0 NMP/100 ml	—	< 1.1 NMP/100 ml
Coliformes Fecales	—	< 3 NMP/100 ml	—	0 NMP/100 ml	—	< 1.1 NMP/100 ml
E. Coli	—	< 3 NMP/100 ml	—	0 NMP/100 ml	—	< 1.1 NMP/100 ml

LMA: Límite Máximo Aceptables

LMP: Límite Máximo Permisible

u: unidades de color en la escala de platino-cobalto

µs/cm: microsiemens por centímetro

mg/l: miligramos por litro

NTU: unidades nefelométricas de turbiedad

NMP: número más probable

Fuente: MTFRL y CUNORI. *Variabilidad espacial y temporal de la calidad de agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la región triffinio: periodo 2010-2018.* p.110.

2.10.1. Oxígeno disuelto

Se define como el oxígeno disuelto en el agua proveniente en su mayoría de la turbulencia de la corriente. Este parámetro se ve afectado por la temperatura en el medio acuático, altura sobre el nivel del mar, cantidad de sales disueltas y características del cauce. Es por esta razón que este parámetro permite la identificación de contaminación en el agua: mayores niveles de oxígeno, mejor calidad de agua; menores niveles de oxígeno, agua contaminada²⁷. Cabe destacar que este parámetro puede expresarse en

²⁷ MTFRL y CUNORI. *Vulnerabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la Región Triffinio: período 2010-2018.* <https://bit.ly/3m4dWJB>. Consulta: 22 de febrero de 2021.

miligramos por litro (mg/l) o bien en porcentaje de saturación (%Sat) dependiendo del objetivo del estudio. Para este caso se utilizará el oxígeno disuelto medido en mg/l.

2.10.2. Potencial de hidrogeno

El Ph se mide para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una solución, mediante una escala del 1 al 14, siendo 1 el grado más ácido, 7 el valor neutro y 14 el valor base. La importancia de medir este parámetro es debido a que ciertos procesos químicos solo pueden desarrollarse en un determinado valor de pH, siendo un ejemplo los efectos tóxicos de sustancias como el hierro, aluminio y otros metales pesados²⁸.

2.10.3. Temperatura

Es uno de los parámetros físicos más importantes e influyentes en la calidad del agua. La temperatura influye en la cantidad de oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno y supervivencia de algunas especies importantes para ecosistemas acuáticos; de la misma forma, este parámetro puede afectar directamente los índices de reproducción de algunas especies acuáticas²⁹.

2.10.4. Conductividad eléctrica

Se define como la capacidad de una solución acuosa de transmitir una corriente eléctrica. Este parámetro es utilizado para determinar el contenido de

²⁸ MTFRL, CUNORI y Centro Agrónomo Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). *Análisis de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río lempa y residuos de plaguicidas en la producción hortícola: región triffinio: 2010-2012.* p. 35.

²⁹ MTFRL; CUNORI. *Vulnerabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la Región Triffinio: período 2010-2018.* <https://bit.ly/3m4dWJB>. Consulta: 22 de febrero de 2021.

sales en el agua, tomando en cuenta que está íntimamente relacionado con el contenido de sólidos disueltos totales y la dureza (carbonato de calcio) del agua³⁰.

2.10.5. Turbidez

Es una medida no específica de la cantidad de partículas en el agua (arcilla, arena, materia orgánica entre otros)³¹. Este parámetro se utiliza como indicador de la calidad de agua, especialmente en ríos y lagos; tomando en consideración que es a partir de este parámetro que procesos biológicos naturales del agua se llevan a cabo.

2.10.6. Sólidos totales

Son la sumatoria de los sólidos en suspensión, sedimentables y disueltos presentes en el agua. Los sólidos sedimentables son los que suelen encontrarse al fondo de un cauce con poca turbulencia debido a que son más pesados que el agua, pero también pueden encontrarse suspendidos momentáneamente debido a la turbulencia del río. Los sólidos en suspensión, por su naturaleza coloidal provocada por pequeñas cargas eléctricas de las partículas, se mantienen en suspensión; cabe destacar que es esta característica la que normalmente provoca un aumento en la turbidez del medio acuoso. Por último, los sólidos disueltos son sales minerales que se disuelven en el agua, están directamente relacionados con la conductividad eléctrica.

³⁰ MTFRL; CUNORI; CATIE. *Análisis de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Iempa y residuos de plaguicidas en la producción hortícola: región trifujo*. 2010-2012. p. 35.

³¹ *Ibíd.*

2.10.7. Sólidos disueltos totales

Este parámetro mide la totalidad de residuos sólidos no filtrables tales como sales y residuos orgánicos. Cabe destacar que el término sólido se refiere a la materia suspendida o disuelta en un medio acuoso. Altas concentraciones de sólidos disueltos puede afectar el desarrollo de la vida acuática, así como también impedir la transferencia de oxígeno provocando la muerte de organismos vivos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables y campo de estudio

Las variables para tomar en cuenta en el estudio, tal como lo muestra la tabla I, son infiltración, precipitación efectiva, escorrentía superficial, evapotranspiración y recarga hídrica.

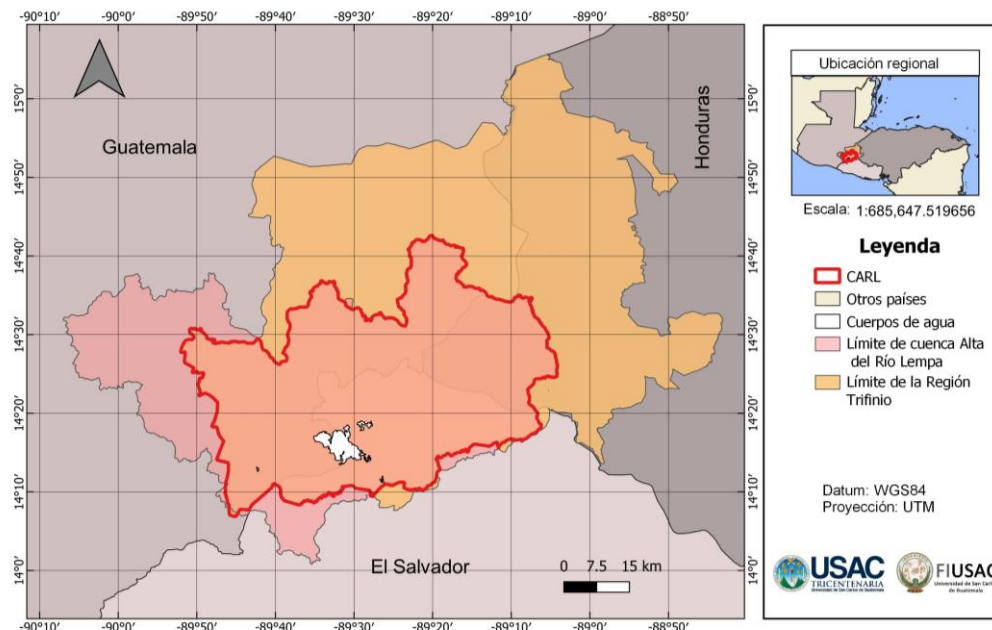
Tabla I. **Unidad de medida de las variables a utilizar**

Variable	Unidad
Infiltración	mm/mes
Precipitación efectiva	mm/mes
Escorrentía superficial	mm/mes
Evapotranspiración	mm/mes
Recarga hídrica	mm/mes

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Este trabajo se encuentra en el campo de estudio de la gestión sostenible e integral del agua en la Región Trifinio, dada su ubicación.

Figura 2. **Ubicación de la Cuenca Alta del Río Lempa (CARL), 2021**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 2, muestra la ubicación geográfica de la zona de estudio (CARL). Es importante mencionar, que se va a estudiar únicamente la parte de la Cuenca Alta del Río Lempa que se ubica dentro de la Región Trifinio. La extensión territorial de CARL es 3 141 km², de los cuales el 51,38 % del área se encuentra en Guatemala, 17,00 % en Honduras y el 31,61 % en El Salvador.

3.2. Metodología

Para la determinación de zonas potenciales de recarga hídrica se utilizaron dos metodologías: metodología de Gunther Schosinsky y la metodología de Matus Silva, las cuales se desarrollan a continuación.

3.2.1. Metodología de Gunther Schosinsky

Esta metodología permita a través de un modelo matemático determinar la recarga potencial de los acuíferos a través de un balance de suelos. Dentro del modelo se toman en cuenta la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración y así también las características del terreno: cobertura vegetal, evapotranspiración real, pendiente del terreno, uso del suelo y profundidad de raíces. La metodología genera un error de recarga menor al ochenta por ciento. Es importante mencionar que esta metodología fue desarrollada en Costa Rica por lo que tomando en cuenta que la región centroamericana comparte características climáticas, se considera apropiado aplicar esta metodología en este estudio³².

La metodología responde a la siguiente ecuación:

$$R_p = P_i + Hs_i - Hs_f - ETR$$

Donde:

R_p = recarga pontencial mensual [mm/mes]

P_i = precipitación que infiltra [mm/mes]

³² SCHONSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos*. <https://bit.ly/3yCT9l6>. Consulta 24 de marzo 2021.

HS_i = humedad del suelo al inicio del mes [mm]

HS_f = humedad del suelo al final del mes [mm]

ETR = evapotranspiración real [mm/mes]

Tal como muestra la ecuación, la recarga de acuíferos es posible si la cantidad de agua infiltrada es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El cálculo de los términos de la ecuación se indica a continuación.

- Humedad inicial del suelo: para encontrar el valor de este factor, establece que puede ubicarse el mes en el cual el suelo se encuentre a capacidad de campo, lo cual regularmente ocurre al final de la época con mayor precipitación.³³ Para ubicar este momento se deben identificar los meses consecutivos en los que la precipitación que se infiltra mensualmente supera a la evapotranspiración potencial mensual. Al mes siguiente de este conjunto de meses se le establecerá una humedad inicial igual a la capacidad de campo.

Indica que, una vez conocida la humedad inicial de un mes, es posible calcular la humedad final de ese mismo mes la cual a su vez será igual a la humedad inicial del siguiente mes y así sucesivamente³⁴. Entonces, al finalizar el ciclo se tendrá una humedad final que deberá ser igual a la del mes de partida es decir al mes al cual se le estableció humedad inicial igual a la capacidad de campo del suelo.

³³ SCHONSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos*. <https://bit.ly/3yCT9l6>. Consulta 24 de marzo 2021.

³⁴ *Ibíd.*

Es importante mencionar que el conjunto de meses consecutivos en los que la precipitación infiltrada es mayor a la evapotranspiración potencial puede ser solamente uno, dos o más.

Para el cálculo de esta humedad indica la siguiente ecuación³⁵:

$$H_{si} \% \text{ por volumen} = H_{si} \% \text{ de suelo seco} \times D_a$$

Donde:

$H_{si} \% \text{ por volumen}$ = humedad inicial del suelo por volumen [%]

$H_{si} \% \text{ de suelo seco}$ = humedad inicial del suelo seco [%]

D_a = densidad aparente [g/cm³]

Sin embargo, la humedad inicial se requiere en milímetros, para llevar a cabo esta conversión se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_{si} = H_{si} \% \text{ por volumen} \times P_r$$

Donde:

H_{si} = humedad inicial del suelo [mm]

$H_{si} \% \text{ por volumen}$ = humedad inicial del suelo por volumen [%]

P_r = profundidad de raíces [mm]

Los valores de capacidad de campo y punto de marchitez se pueden obtener a partir de ensayos de laboratorio o se pueden estimar a partir de la tabla II; de la misma forma la profundidad de raíces puede estimarse según la tabla III.

³⁵ BLANCO ROJAS, Harold. *Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica*. <https://bit.ly/3s6Jd0X>. Consulta: marzo de 2021.

Tabla II. **Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad aparente según textura de suelo**

Textura del suelo	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP %	CC %	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	2-6	6-12	1.55-1.80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1.40-1.60
Franco	8-12	18-26	1.35-1.50
Franco-arcilloso	11-15	23-31	1.30-1.40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1.25-1.35
Arcilloso	15-19	31-39	1.20-1.30
Franco arcillo limoso ³⁶	18	38	1.25
Franco limoso	11	32	1.39

Fuente: SCHOSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 18.

Tabla III. **Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo**

Tipo de cobertura vegetal del suelo	Profundidad de las raíces (m)	Profundidad de las raíces (mm)
Bosques	2	3 000
Zacate 75 %	0,5	1 500
Zacate 50 %	0,3	1 250
Pastizal	0,25	1 000
Cuerpos de agua/ sin cobertura vegetal	0	0

Fuente: elaboración propia, adaptada de OTÁROLA, Ticse. *Correlación de la cobertura vegetal de pastos naturales con la recarga hídrica de la cuenca alta del río Shullcas como medida de adaptación al cambio climático en el periodo julio -2013 hasta junio 2014*. p. 60.

Cabe destacar que este mismo procedimiento se utiliza para convertir los valores de punto de marchitez permanente (PM) y capacidad de campo (CC) de porcentaje a milímetros. Para determinar los valores de humedad inicial del resto de meses se utiliza la humedad del suelo final del mes anterior (Hsf).

³⁶ CHAVARRÍA VIDAL, Adrián E. *Prácticas relación suelo-agua-plantas en cultivos dendroenergicos*. <https://bit.ly/3s2084M>. Consulta: 18 abril 2021.

- Infiltración pluvial mensual: La precipitación infiltrada mensual se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$P_i = C_i(P - Ret)$$

Donde:

P_i = precipitación efectiva que se infiltra [mm/mes]

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual [mm/mes] (dato meteorológico)

Ret = Retención de la lluvia mensual por follaje [mm/mes]

Para calcular la retención se debe tomar en cuenta lo siguiente: las lluvias menores a 5 mm mensuales no generan infiltración, debido a que se estima que 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo³⁷. Es importante también tomar en cuenta el follaje de la vegetación (C_{fo}), el cual tendrá un valor de 12 % para follaje no denso y 20 % para follaje denso. Por tanto, el valor de la retención corresponde a lo siguiente:

Si $P \leq 5$ mm/mes, entonces $Ret = P$

Si $P > 5$ mm/mes, entonces calcular $P * C_{fo}$

Si $P * C_{fo} \geq 5$ mm/mes, entonces $Ret = P * C_{fo}$

Si $P * C_{fo} \leq 5$ mm/mes, entonces $Ret = 5$

Para determinar el coeficiente de infiltración debe tomarse en cuenta lo siguiente:

³⁷ SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. <https://bit.ly/37BXI3h>. Consulta 18 de marzo 2021.

$$\begin{aligned} \text{si } K_p + K_v + K_{fc} > 1 \text{ entonces } C_i &= 1 \\ \text{si } K_p + K_v + K_{fc} \leq 1 \text{ entonces } C_i &= K_p + K_v + K_{fc} \end{aligned}$$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional]

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional]

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional]

Los valores de K_p y K_v se definen a través de las tablas IV y V, mientras que K_{fc} se define a través de la infiltración básica del suelo (f_c), valor que se encuentra en campo a través de pruebas de infiltración, las cuales pueden ser: prueba de los anillos aplicada a la superficie del terreno, permeámetro de Guelph o prueba de Prochet.

El valor de K_{fc} se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Si } 16 \leq f_c \leq 1568 \text{ mm/día, entonces } K_{fc} = 0,267 \ln(f_c) - 0,000154f_c - 0,723$$

$$\text{Si } f_c < 16 \text{ mm/día, entonces } K_{fc} = \frac{0,0148f_c}{16}$$

$$\text{Si } f_c > 1568 \text{ mm/día, entonces } K_{fc} = 1$$

Tabla IV. **Valores para infiltración por efecto de pendiente (Kp)**

Por pendiente	Pendiente	K_p
Muy plana	0,02 %-0,06 %	0,3
Plana	0,3 %-0,4 %	0,2
Algo plana	1 %-2 %	0,15
Promedio	2 %-7 %	0,10
Fuerte	Mayor a 7 %	0,06

Fuente: SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. p. 45.

Tabla V. **Valores de infiltración por efecto de cobertura vegetal (Kv)**

Por cobertura vegetal	K_v
Cobertura con zacate menos del 50 %	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75 %	0,21

Fuente: SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. p. 45.

- Escorrentía superficial: si bien este valor no está en la ecuación de recarga de acuíferos, su cálculo es importante en la elaboración del balance.

Este valor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

ESC = escorrentía superficial [mm/mes]

Ret = retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes]

P_i = precipitación que se infiltra al suelo [mm/mes]

- Evapotranspiración: para el cálculo de la evapotranspiración, existen diferentes métodos; en esta ocasión se utilizará el método de Hargreaves, el cual incluye valores para Centroamérica. La evapotranspiración se define a través de la siguiente ecuación:

$$ETR = ETP * \frac{C_1 + C_2}{2}$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real [mm/mes]

C_1 = Coeficiente de humedad máxima, sin considerar la evapotranspiración [adimensional]

C_2 = Coeficiente de humedad mínimo, considerando la evapotranspiración [adimensional]

ETP = evapotranspiración potencial [mm/mes]

Los coeficientes se calculan a través de las siguientes ecuaciones:

$$C_1 = \frac{H_i - PM + P_i}{CC - PMP}$$

$$C_2 = \frac{H_i - PM + P_i - (C_1 * ETP)}{CC - PM}$$

Donde:

C_1 = Coeficiente de humedad máxima, sin considerar la evapotranspiración
[adimensional]

C_2 = Coeficiente de humedad mínimo, considerando la evapotranspiración
[adimensional]

H_i = humedad inicial del suelo [mm]

PM = punto de marchitez [mm]

P_i = precipitación que se infiltra [mm/mes]

CC = Capacidad de campo [mm]

ETP = evapotranspiración potencial [mm/mes]

Es importante tomar en cuenta que tanto C_1 como C_2 deben estar entre 0 y 1; por lo que se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Si $C_1 > 1$ entonces $C_1 = 1$

Si $C_1 < 0$ entonces $C_1 = 0$

Si $C_2 > 1$ entonces $C_2 = 1$

Si $C_2 < 0$ entonces $C_2 = 0$

Para calcular la evapotranspiración potencial se utiliza la siguiente ecuación:

$$ETP = 0,0075 * TMF * RSM$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial [mm/mes]

TMF = temperatura media mensual [°F]

RSM = Radiación solar incidente mensual

La radiación solar incidente mensual se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$RSM = 0,075 * RMM * S^{1/2}$$

Donde:

RMM = radiación mensual extraterrestre [mm/mes]

S = brillo medio mensual [%]

Las expresiones anteriores se definen a partir de las siguientes ecuaciones

$$RMM = RS * \#días$$

$$S = \frac{N}{24} * 100$$

Donde:

RS = radiación solar

$\#días$ = días del mes al que está expuesto a radiación solar

N = Número de horas de brillo solar

Cabe destacar que la radiación solar y el número de horas de brillo solar se indican en los Anexos 1 y 2.

- Humedad final del suelo: Para determinar el valor de la humedad final del suelo, es necesario saber la humedad disponible, esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$HD = H_{si} + P_i - PM$$

Donde:

HD = humedad del suelo disponible [mm/mes]

H_{si} = humedad inicial del suelo (a inicio de mes) [mm]

P_i = precipitación que se infiltra [mm/mes]

PM = punto de marchitez [mm]

A continuación, la humedad final del suelo se calcula a según los criterios descritos a continuación:

Si $HD + PM - ETR < CC$, entonces $H_{sf} = HD + PM - ETR$

Si $HD + PM - ETR \geq CC$, entonces $H_{sf} = CC$

Donde:

H_{sf} = humedad final del suelo (a fin de mes) [mm]

HD = humedad del suelo disponible [mm/mes]

ETR = evapotranspiración real [mm/mes]

CC = capacidad de campo del suelo [mm]

3.2.2. Metodología de Matus Silva

Esta metodología combina el conocimiento técnico-científico con el local o tradicional, brinda una ecuación para determinar el potencial de recarga hídrica de una zona tomando en cuenta la pendiente, micro relieve, tipo de suelo, de roca, la cobertura vegetal permanente y el uso del suelo. La metodología de Matus Silva le asigna un número según la presencia de los factores biofísicos anteriormente mencionados, finalmente el potencial de recarga es clasificado en muy alta, alta, moderada, baja y muy baja.

Para determinar el potencial de recarga hídrica, este método utiliza la siguiente ecuación:

$$ZR = 0,27(pend) + 0,23(T_s) + 0,12(T_r) + 0,25(C_{ve}) + 0,13(U_s)$$

Donde:

ZR = potencial de recarga hídrica

$pend$ = pendiente y micro relieve

T_s = tipo de suelo

T_r = tipo de roca

C_{ve} = cobertura vegetal permanente

U_s = uso del suelo

Según el valor obtenido, la tabla VI permite asignarle un valor cualitativo al potencial de recarga obtenido, en muy alto, alta, moderada, baja y muy baja.

Tabla VI. **Potencial de recarga hídrica según el modelo de Matus Silva**

Posibilidad de recarga	Rango
Muy alta	4,1-5
Alta	3,5-4,09
Moderada	2,6-3,49
Baja	2-2,59
Muy baja	1-1,99

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. p. 17.

El resto de los elementos descritos en la ecuación se calculan como se indica a continuación:

- pendiente y micro relieve: la capacidad de recarga se ve afectada por la pendiente y el micro relieve, debido a que mientras más tiempo de contacto tenga el agua con el suelo mayor posibilidad de recarga habrá. A partir de esto identificaron la posibilidad de recarga como se define en la tabla VII³⁸:

Tabla VII. **Posibilidad de recarga según micro relieve y pendiente**

Microrelieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plano o casi plano, con o sin rugosidad	0-6	Muy alta	5
Moderadamente ondulado o cóncavo	6-15	Alta	4
Ondulado/cóncavo	15-45	Moderada	3
Escarpado	45-65	Baja	2
Fuertemente escarpado	> 65	Muy baja	1

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. p. 12.

- Tipo de suelo: de acuerdo a la textura, porosidad, permeabilidad y compactación, la posibilidad de recarga será mayor o menor. La permeabilidad del suelo (textura gruesa y poroso) permiten mayores tasas de infiltración y por tanto de recarga hídrica. En la tabla VII se indica la posibilidad de recarga según la textura del suelo:

³⁸ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR>. Consulta: 24 de enero de 2021.

Tabla VIII. **Posibilidad de recarga según textura del suelo**

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos franco-arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración (más de 25 cm/h).	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración (12,7 – 25 cm/h).	Alta	4
Suelos franco-limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 – 12,7 cm/h).	Moderada	3
Suelos franco-arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0,13 – 2 cm/h).	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menos de 0,13 cm/h).	Muy baja	1

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. p. 13.

- Tipo de roca: este factor determina si la recarga hídrica será subsuperficial o subterránea. Es importante resaltar que este factor es clave, debido a que, si en la cuenca existe una capa de material rocoso o arcilla impermeable, el agua infiltrada se convertirá en un flujo subterráneo que se incorporará a un manantial o a un río, sin contribuir a la recarga de las

aguas subterráneas³⁹. En la tabla IX se presenta la posibilidad de recarga según el tipo de roca presente en la cuenca.

Tabla IX. **Posibilidad de recarga según el tipo de roca**

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación.	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas.	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas. [rocas no acuíferas]	Muy baja	1

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. p. 15.

³⁹ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR> Consulta: 24 de enero de 2021.

Cabe destacar que por conveniencia se utilizó una categoría más: cuerpos de agua, a la cual se le asignó una ponderación de 0.

- Cobertura vegetal permanente: este factor se refiere al porcentaje de suelo ocupado por comunidades vegetales permanentes. La posibilidad de recarga se ve afectada por este factor debido a que según la cantidad de vegetación permite mayor tiempo de contacto entre el agua al suelo al disminuir la velocidad de la escorrentía superficial, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la sequedad del suelo causada por los rayos del sol. Es importante mencionar que incluso en suelos duros y arcillosos, la vegetación puede facilitar la infiltración del agua.

Al referirse a cobertura vegetal se toma en cuenta: árboles, arbustos y hierbas, debido a que son los que garantizan mejor cubierta vegetal, mayor cantidad de materia orgánica, mayor retención de agua y mayor infiltración. En la tabla X se indica la posibilidad de recarga según el porcentaje de cobertura vegetal en el suelo.

Tabla X. **Posibilidad de recarga según el porcentaje de cobertura vegetal**

Cobertura vegetal permanente (porcentaje)	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Muy alta	5
70-80	Alta	4
50-70	Moderada	3
30-50	Baja	2
<30	Muy baja	1

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. p. 16.

Según Bueso⁴⁰ el porcentaje de cobertura representa una proporción entre el área de una unidad de mapeo y el área cubierta por determinada vegetación. para determinar el porcentaje se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cobertura} = \frac{\text{Área de cobertura permanente}}{\text{Área de unidad provisional de mapeo}} * 100$$

- Uso del suelo: este factor es relevante, debido a que un uso inadecuado puede disminuir hasta un 50 % la posibilidad de recarga de un acuífero⁴¹. En la tabla XI se indica la posibilidad de recarga según el uso del suelo.

⁴⁰ BUESO, Marlon. *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Susho, Municipio de Chiquimula*. <https://bit.ly/3mrAS7f>. Consulta: 24 de abril de 2021.

⁴¹ MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. <https://bit.ly/3CuNyzR> Consulta: 24 de enero de 2021.

Tabla XI. **Posibilidad de recarga según el uso del suelo**

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo y agua.	Moderada	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua.	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo.	Muy baja	1

Fuente: MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. 2009. p 17.

3.2.3. Análisis estadístico

- Media aritmética: medida estadística que indica el valor promedio de un conjunto promedio de datos. Consiste en la suma del valor numérico de una serie de datos y lo divide dentro de la cantidad de valores, tan y lo como lo define la ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

Donde:

$\bar{x}$ = media aritmética

x_i = valor de la clase

N = cantidad de datos

Esta medida se utilizará para el cálculo de la temperatura mínima, media y máxima mensual; así como también para los datos de precipitación mensual de cada estación meteorológica debido a que los datos obtenidos fueron diarios.

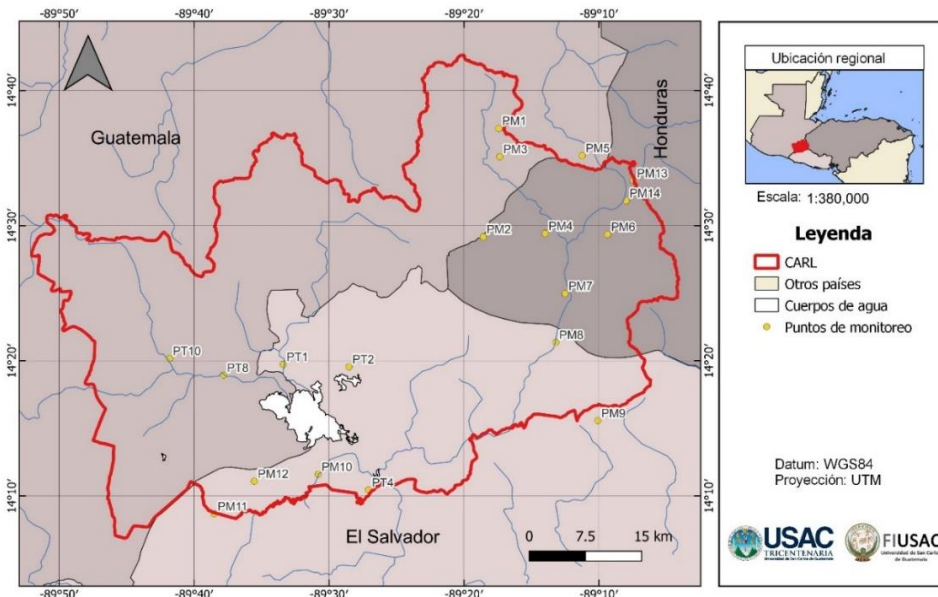
3.3. Fase de investigación

En esta fase se incluye el procedimiento para la determinación de puntos de muestreo para estudios de suelo, así como también la identificación de estaciones meteorológicas dentro del área de influencia de CARL.

3.3.1. Determinación de puntos de muestreo para estudios de suelo

La Mancomunidad Trinacional Fronteriza Río Lempa (MTFRL) realiza de manera semestral, en conjunto con el Centro de Estudios Universitarios de Oriente (CUNORI) un monitoreo semestral de la calidad de agua de los afluentes de la Cuenca Alta del Río Lempa, para ello ya se tienen definidos 14 puntos de monitoreo (ver figura 3 y tabla XII).

Figura 3. **Puntos de monitoreo para la calidad del agua en CARL, 2021**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

Considerando esta situación, la propuesta fue utilizar estos 14 puntos para realizar el muestreo de suelos; sin embargo, derivado del cierre de fronteras, el cierre de establecimientos y la restricción a la movilidad por la pandemia de Covid-19, se procedió a utilizar los recursos disponibles de estudios realizados con anterioridad en la región. La textura de suelo se tomó de los mapas disponibles en cada país, para el caso de Guatemala se tomó de Simmons⁴², para El Salvador de Ministerio de Agricultura y Ganadería⁴³ y para Honduras de FAO⁴⁴.

⁴² SIMMONS, Charles. *Clasificación de reconocimiento de suelos de la República de Guatemala*. p. 522.

⁴³ MAG. *Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A.* <https://bit.ly/3zsCT62>. Consulta: 24 de abril de 2021.

⁴⁴ FAO. *Los suelos de Honduras: informe al gobierno de Honduras (No° 2630)*. <http://www.fao.org/3/ar884s/ar884s.pdf>. Consulta: 24 de abril de 2021.

Tabla XII. **Puntos de monitoreo para la calidad del agua de CARL**

País	No.	Nombre del punto	Río	Municipio	Departamento	x	y
Guatemala	1	PM1	Río Olopita	Esquipulas	Chiquimula	-89.286668	14.620034
	3	PM3	Río Atulapa	Esquipulas	Chiquimula	-89.285462	14.585072
	2	PM2	Río Atulapa	Esquipulas	Chiquimula	-89.305957	14.48621
	19	PT10	Río Ostúa	Asunción Mita	Jutiapa	-89.693556	14.336117
	18	PT8	Río Ostúa	Asunción Mita	Jutiapa	-89.626645	14.315622
Honduras	5	PM5	Río Quilio	Ocatepeque	Ocatepeque	-89.183589	14.586278
	6	PM13	Río Quilio 2	Dolores Merendón	Ocatepeque	-89.120296	14.555535
	7	PM14	Río Quilio 3	Dolores Merendón	Ocatepeque	-89.129338	14.530820
	8	PM6	Río Tulas	Ocatepeque	Ocatepeque	-89.152244	14.489227
	4	PM4	Río Frío	Ocatepeque	Ocatepeque	-89.229402	14.490433
	9	PM7	Río Pomola	Ocatepeque	Ocatepeque	-89.204687	14.41628
El Salvador	10	PM8	Río Lempa	Citalá	Chalatenango	-89.216140	14.356009
	11	PM9	Río Nunuapa	La Palma	Chalatenango	-89.164300	14.259562
	14	PT4	Río Lempa	Masahuat	Santa Ana	-89.44761	14.173964
	15	PM10	Río Guajoyo	Metapán	Santa Ana	-89.509703	14.193254
	17	PM12	Río Cusmapa	San Antonio Pajonal	Santa Ana	-89.588669	14.184815
	16	PM11	Río Cusmapa		Ahuachapán	-89.638099	14.144427
	12	PT1	Río Angue	Metapán	Santa Ana	-89.553104	14.328883
	13	PT2	Río San José	Metapán	Santa Ana	-89.4717	14.325869

Fuente: MTFRL y CUNORI. *Variabilidad espacial y temporal de la calidad de agua de los afluentes de la cuenca alta del río lempa, en la región trifuio: periodo 2010-2018. p. 7.*

3.3.2. Información climática

Se identificó las entidades o instituciones gubernamentales encargadas de la meteorología de cada país: INSIVUMEH en Guatemala, CENAOS en Honduras y la Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales en El Salvador. A partir de la Base de Datos Climáticos de América Central (BDCA), se ubicaron las estaciones meteorológicas que están dentro o cercanas a CARL (ver tabla XIII y figura 4).

Tabla XIII. **Estaciones meteorológicas que influyen en CARL**

	Estación	Departamento	Longitud	Latitud	Altura (msnm)
INSIVUMEH	Esquipulas	Chiquimula	14°33'32"	89°20'31"	950
	Asunción Mita	Jutiapa	14°20'04"	89°42'21"	475
	La Ceibita	Jalapa	14°29'34"	89°52'32"	961
	Camotán	Chiquimula	14°49'14"	89°22'22"	450
COPECO	Ocatepeque	Ocatepeque	14°25'50"	89°11'3"	772
	La Labor	Ocatepeque	14°46'50'	88°48'48'	1067
	Santa Rosa	Copán	14°47'30"	88°48'00"	1083
MARN	Las Pilas	Chalatenango	14°21'54"	89°05'24"	1960
	Nueva Concepción	Chalatenango	14°7'3'	89°17'14'	320
	Güija	Santa Ana	14°13'42"	89°28'42"	485

Fuente: elaboración propia, con base en Chinchilla Arias (2017).

Ubicación regional

Escala: 1:479,834.180482

Legenda

- Ríos
- CARL
- Otros países
- Cuerpos de agua
- Estaciones meteorológicas

Datum: WGS84
Proyección: UTM

0 7.5 15 km

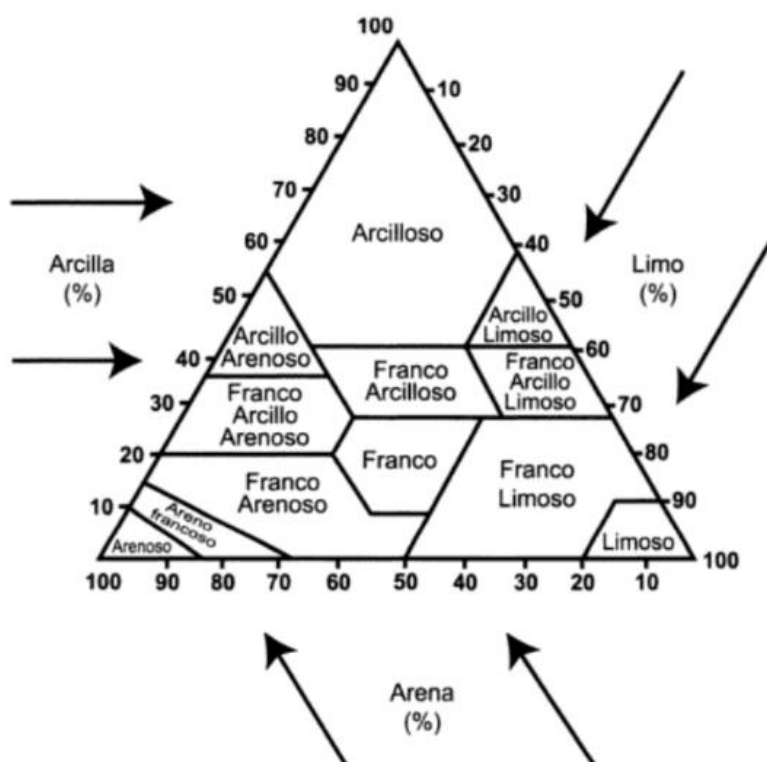
3.4. Fase de servicio técnico profesional

3.4.1. Determinación de la textura del suelo

⁴⁵ MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. Trabajo de titulación (magister scientiae en manejo integrado de cuencas hidrográficas). Costa Rica: CATIE, 2007. p. 153.*

laboratorio para determinar la textura del suelo, uno de los más comunes es la granulometría por hidrómetro, el cual está basado en las características de la sedimentación de las partículas del suelo en un medio acuoso. Los resultados obtenidos, se interpreta a partir del triángulo de textura (ver figura 5).

Figura 5. Triángulo de textura



Fuente: CASANOVA, Eduardo. *Introducción a la ciencia del suelo*. p. 82.

3.4.2. Pruebas de infiltración

Este elemento se obtuvo a partir del método de Porchet o cilindro invertido. Este método consiste en excavar un agujero cilíndrico de radio R , el cual se llena hasta una altura conocida h ; a continuación, se mide el cambio de altura en el

tiempo⁴⁶. En palabras simples, la tasa de infiltración se calcula midiendo pares de (h₁, t₁) (h₂, t₂), de forma que t₁ y t₂ no difieran demasiado. El cálculo de infiltración se hace mediante la siguiente ecuación:

$$Fc = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} * \ln \frac{(2h_1 + R)}{(2h_2 + R)}$$

Donde:

Fc = Infiltración (mm/h)

R= radio del cilindro

h₁= altura inicial

h₂= altura final

t₁= tiempo inicial

t₂= tiempo final

3.4.3. Análisis de la calidad de agua del río

A partir de la alianza que tiene la MTFRL con CUNORI, se realizó un monitoreo en el cual se tomaron muestras en los puntos definidos por CUNORI (ver figura 1). Para las muestras tomadas, se midió el oxígeno disuelto, el potencial de hidrogeno, la temperatura, la conductividad eléctrica, la turbidez, los sólidos totales y los sólidos disueltos totales.

3.4.4. Información climática

La recolección de la información climática se hizo a través de solicitudes de acceso a la información pública a las diferentes instituciones encargadas de la

⁴⁶ INAB. *Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica*. https://drive.google.com/file/d/143BCE7fSip0O7hSdc8ZFTUKygc0B_Qm_/view. Consulta: 14 de abril de 2021.

meteorología en los 3 países de estudio: INSIVUMEH en Guatemala, CENAOB en Honduras y la Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales en El Salvador.

Se solicitó la información para todos los meses del año 2020 de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro o cercanas a CARL (ver figura 1). Las variables recolectadas fueron: precipitación y temperatura.

4. FASE DE GABINETE FINAL

Los mapas se elaboraron a partir de los datos geospaciales disponibles de la región, los cuales se obtuvieron de geoportales, bases de datos, así como también en algunos casos bajo solicitud a las instituciones. Cabe destacar que también se hizo uso de imágenes satelitales Landsat 8, la cual se descargó del visor EarthExplorer, la escena utilizada fue del 16 de febrero de 2020 (está disponible en el sitio web <https://bit.ly/3jMhvmw>). La selección de esta escena en particular fue debido a que la imagen tiene un bajo porcentaje de nubes. A continuación, se describe el proceso de elaboración de cada una de las metodologías.

4.1. Metodología de Gunther Schosinsky N

Se calculó la precipitación media a través del cálculo de isoyetas, para ello se hizo uso de la información de las estaciones meteorológicas de la zona (ver tabla 13), asimismo se calcularon las isotermas. Este procedimiento se hizo para cada mes del año 2020.

Para la identificación de la profundidad de raíces, para el cálculo de la capacidad de campo del suelo, se reclasificó el valor del NDVI como lo muestra la tabla XIV. Con relación a la humedad inicial, en CARL el mes con humedad inicial igual a la capacidad de campo del suelo, varió entre septiembre y octubre, esto según el tipo de suelo.

Tabla XIV. **Reclasificación del NDVI para el cálculo de profundidad de raíces**

Caracterización del NDVI y rangos de densidad de cobertura vegetal	Cobertura vegetal	Profundidad de las raíces (mm)
Áreas donde la vegetación se encuentra en un estado de gran vigor y densidad. (NDVI > 0,3)	Bosques	3 000
Áreas con árboles y arbustos (NDVI 0,2 – 0,3)	Cobertura con zacate más del 50 %	1 300
Áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (NDVI 0,1 – 0,2)	pastizal	1 100
Cuerpos no vegetales (NDVI < 0,1)	Cuerpos de agua/ sin cobertura vegetal	0

Fuente: elaboración propia, utilizando de base Tafur (2017) Y Gunther Schosinsky (2006), empleando Word.

Para el cálculo de la precipitación que se infiltra se requiere de tres coeficientes, como lo indica la sección 3.2.1.2, dos de estos coeficientes se calcularon mediante la utilización de SIG: (1) el coeficiente de pendiente se obtuvo a través de la reclasificación del DEM, (2) el coeficiente de vegetación, se reclasifico los resultados obtenidos del NDVI (ver tabla XV).

Por otro lado, el coeficiente de la fracción que infiltra por textura del suelo se calculó según lo establecido en la sección indicada. Cabe destacar que estos 3 coeficientes se calcularon espacialmente, es decir que tienen una ubicación en el mapa de CARL lo que hace más fácil la ubicación de las zonas potenciales de recarga hídrica.

Tabla XV. **Reclasificación del NDVI para el cálculo de Kv**

Caracterización del NDVI y rangos de densidad de cobertura vegetal.	Cobertura vegetal	Kv
Áreas donde la vegetación se encuentra en un estado de gran vigor y densidad. (NDVI < 0)	Bosques	0,20
Áreas con árboles y arbustos (NDVI 0 – 0,1)	Cobertura con zacate más del 75 %	0,21
Áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (NDVI 0.1 – 0,2)	Cobertura con pastizales	0,18
Áreas rocosas, arenosas con mínima cobertura vegetal (NDVI 0,2 -0,3)	30 – 50 %	Baja
Cuerpos no vegetales (NDVI > 0,3)	< 30 %	Muy baja

Fuente: elaboración propia, utilizando de base Tafur (2017) Y Gunther Schosinsky (2006), empleando Word.

El resto de las variables se calculó según lo descrito en la subsección respectiva de la sección 3.2.1. Cabe destacar que el balance hídrico se hizo para cada textura del suelo definida a partir de los puntos de monitoreo (ver figura 1), por tal razón se elaboró una hoja de cálculo en el programa Excel (ver apéndice 1-10).

Finalmente, para la elaboración del mapa de zonas potenciales de recarga hídrica en CARL, se sumó la recarga mensual de cada punto evaluado, con el propósito de obtener resultados anuales, esta información se agregó a cada punto de monitoreo en la tabla de atributos del archivo vectorial, para ubicar la información espacial y posteriormente se realizó una interpolación IDW a través del software Qgis 3.20, lo que permitió identificar las zonas de interés.

A continuación, para clasificar los volúmenes de recarga anuales obtenidos, se utilizó como base los rangos de infiltración preestablecidos por Herrera (2005) citado por Mánzo Barrientos⁴⁷ (ver tabla XVI).

Tabla XVI. **Posibilidad de recarga según volumen de recarga anual por kilómetro cuadrado**

Recarga (m ³ /km ² /año)	Posibilidad de recarga
< 50 000	Baja
50 000 – 150 000	Media
150 000 – 300 000	Alta
< 300 000	Muy alta

Fuente: MÁNZO BARRIENTOS, Daniel Esteban. *Reconocimiento hidrológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala*. p. 90.

4.2. Metodología Matus Silva

Para la obtención del potencial de recarga hídrica por medio de esta metodología se debe hacer uso de los sistemas de información geográfica para realizar mapas, en las secciones siguientes se describen los pasos seguidos para realizar cada uno de los mapas.

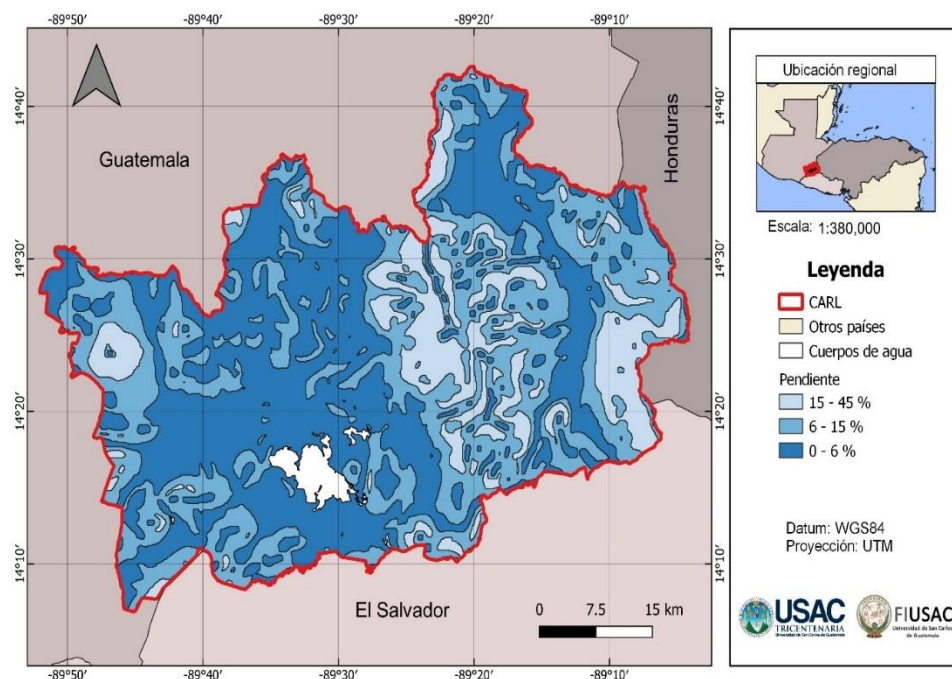
⁴⁷ MÁNZO BARRIENTOS, Daniel Esteban. *Reconocimiento hidrológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala*. Trabajo de titulación (Ingeniero Agrónomo). Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad San Carlos de Guatemala, 2008. p. 49.

4.2.1. Mapa de pendientes

Para la elaboración de este mapa se utilizó el modelo de elevación digital - MDE- del satélite GTOPO30, (disponibles en el sitio web <https://bit.ly/3fUgveD>). Para el análisis y elaboración del mapa se utilizó el programa Qgis 3.20.

Tomando en cuenta, que la recarga hídrica debe evaluarse a través de dos metodologías, se elaboraron dos mapas de acuerdo con los lineamientos de cada metodología. El algoritmo utilizado fue pendiente (*Slope*), el cual permite el análisis de un archivo ráster según sus curvas de nivel. Posteriormente se ajustaron a las clases según lo requerido por la metodología, para el caso de la metodología Matus Silva, se utilizó de base la tabla VIII.

Figura 6. Mapa de pendientes de CARL, 2021



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 6 muestra las pendientes en la Cuenca Alta del Río Lempa; el 16,1 % (512,79 Ha) tiene pendientes entre 15 a 45 %, las cuales permiten una infiltración media; el 40,6 % (1,293.11 Ha) del territorio tiene pendientes entre 6 a 15 %, las cuales permiten una infiltración alta; el 43,3 % (1 379,10 Ha) tiene pendientes entre 0 a 6 %, permitiendo una alta tasa de infiltración. Por tanto, en función de la pendiente, la cuenca alta del Río Lempa tiene buena posibilidad de infiltración.

4.2.2. Mapa de tipo de suelos

Para la elaboración de este mapa se tomó como base dos variables: textura del suelo e infiltración, los cuales se analizaron a través de dos capas Raster de las cuales se derivó el mapa final, el proceso se describe a continuación:

- Mapa de textura de suelos: se tomó información de diferentes mapas de suelos de la región: para Guatemala de Simmons⁴⁸, para El Salvador de MAG⁴⁹ y para Honduras de FAO⁵⁰. Tomando en cuenta que esta bibliografía define la textura de los suelos; sin embargo, considerando la antigüedad de estos estudios, los mapas tuvieron que digitalizarse manualmente en el programa Qgis 3.8.1. Cabe destacar que la clasificación responde a la tabla VIII correspondiente a la metodología de Matus Silva⁵¹.

⁴⁸ SIMMONS, Charles. *Clasificación de reconocimiento de suelos de la República de Guatemala*. p. 522.

⁴⁹ MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). *Clasificación de suelos por división política de El Salvador*, C.A. <https://bit.ly/3zsCT62> Consulta: 24 de abril de 2021.

⁵⁰ FAO (Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo). Los suelos de Honduras: informe al gobierno de Honduras (No° 2630). <http://www.fao.org/3/ar884s/ar884s.pdf> Consulta: 24 de abril de 2021.

⁵¹ MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. Trabajo de titulación (magister scientiae en manejo integrado de cuencas hidrográficas). Costa Rica: CATIE, 2007. p. 188.

- Mapa de infiltración del suelo: para la elaboración de este mapa se tomó como base el mapa zonificación hídrica potencial de la Región Trifinio⁵²; sin embargo, se adecuó a la metodología de Matus Silva, tal como lo muestra la tabla XVII.

Tabla XVII. Reclasificación de zonificación hídrica potencial de la Región Trifinio según la metodología de Matus Silva

Equivalente del mapa zonificación hídrica de la Región Trifinio	Infiltración (Matus 2007)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Zonas de infiltración y área de recarga hídrica	> 25	Muy alta	5
	12,7-25,5	Alta	4
Zonas de infiltración media, propicia para actividades humanas y agrícolas	2,0-12,7	Moderada	3
Zonas de infiltración media, propicia para la localización de asentamientos humanos	0,13-2,0	Baja	2
Zonas de baja infiltración, para ubicación de sitios de disposición de desechos sólidos	< 0,13	Muy baja	1
Cuerpos de agua	-----	*Ninguna	0

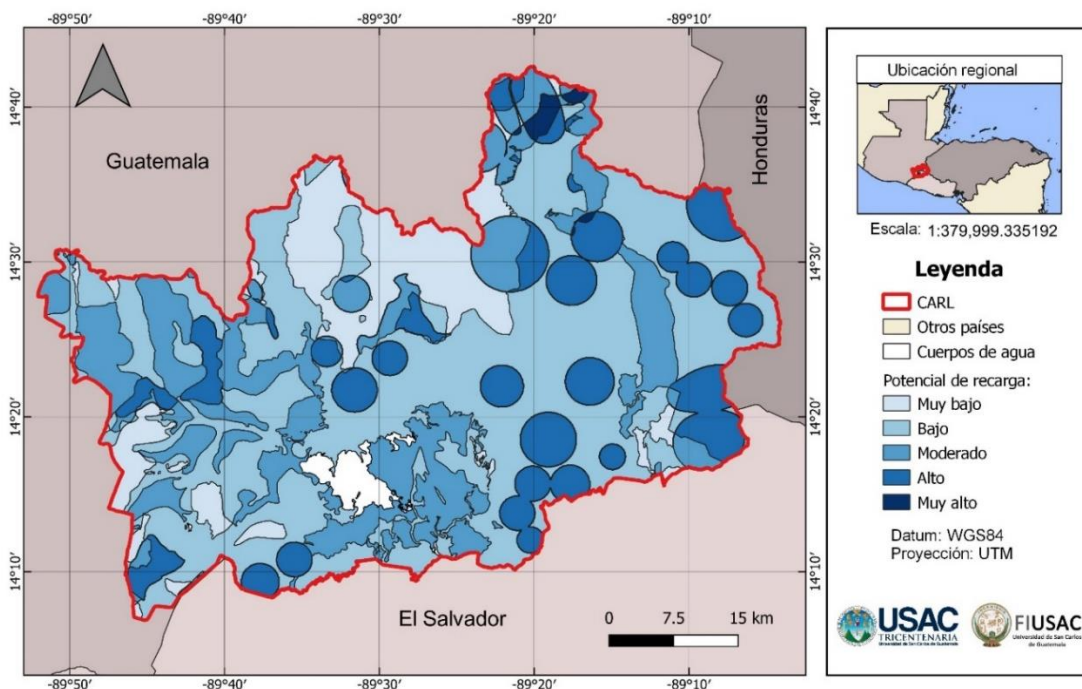
Fuente: elaboración propia con base en Matus Silva (2007) y Hernández Salinas (2017).

* Se agregó la clase ninguno debido a que no puntúan en la posibilidad de recarga hídrica.

⁵² HERNÁNDEZ SALINAS, Alberto. *Zonificación hídrica potencial de la región del Trifinio*. [capa vectorial]. <https://bit.ly/388Uzly>. Consulta: 22 de abril de 2021.

Finalmente, para obtener el de mapa de potencial de recarga hídrica según el tipo de suelo, se calculó el promedio de la ponderación según la textura del suelo y la velocidad de infiltración, para ello se utilizó la calculadora ráster.

Figura 7. Potencial de recarga hídrica según tipo de suelo, 2017



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 7 muestra el potencial de recarga hídrica según el tipo de suelo. El 12,7 % (398,13 Ha) tiene un potencial muy bajo; el 45,8 % (1 458,7 Ha) bajo; el 24,1 (767,59 Ha) moderado, el 16,8 % (535 Ha) alto y el 0,59 % (18,59 Ha) muy alto. Por tanto, el tipo de suelo de la CARL denota un potencial de recarga moderado bajo dado que más del 50 % de su territorio se encuentra en estas categorías.

4.2.3. Mapa geológico

Este mapa se elaboró a partir del mapa de unidades hidrogeológicas de la Región Trifinio⁵³; sin embargo, las clasificaciones se adecuaron a la metodología de Matus Silva, tal como muestra la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Reclasificación de unidades hidrogeológicas de la Región Trifinio según la metodología de Matus Silva**

Equivalente del mapa unidades hidrogeológicas de la Región Trifinio	Tipo de roca (Matus 2007)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Acuífero granular poroso de extensión limitada	Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macro poros interconectados;	Muy alta	5
Acuífero bajo capa de coberturas	Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados.	Alta	4
	Rocas moderadamente permeables, semi-suaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Acuíferos Kársticos Acuíferos volcánicos fisurados de gran extensión	Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas	Baja	2
Rocas no acuíferas	Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	Muy baja	1

⁵³ HERNÁNDEZ SALINAS, Alberto. *Zonificación hídrica potencial de la región del Trifinio*. [capa vectorial]. <https://bit.ly/388Uzly>. Consulta: 22 de abril de 2021.

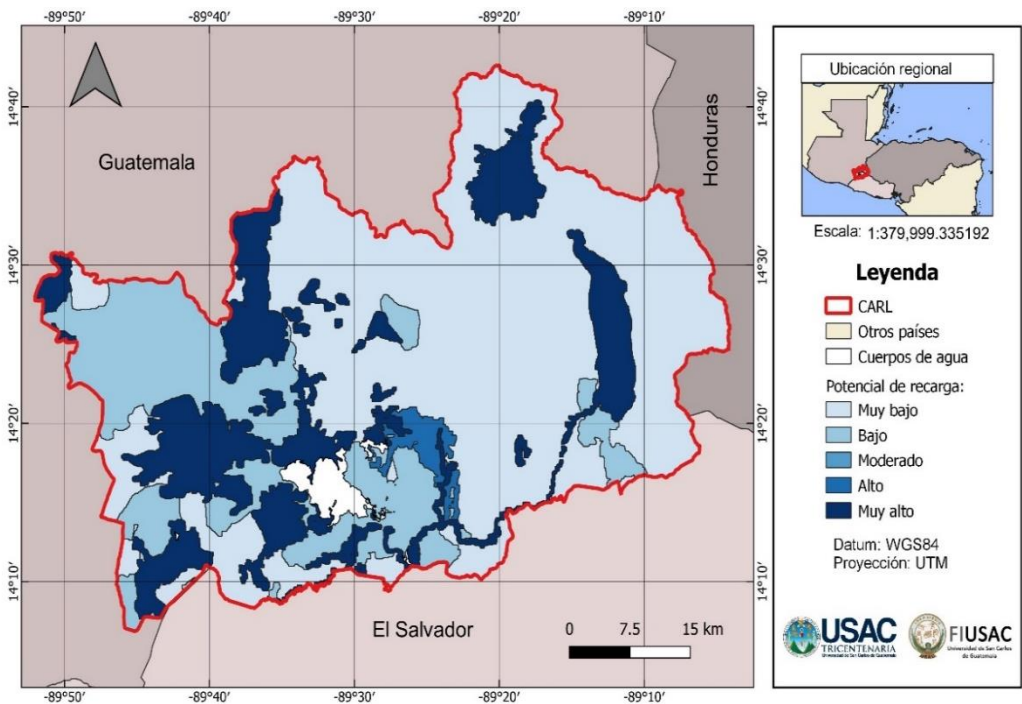
Continuación tabla XVIII.

Equivalente del mapa unidades hidrogeológicas de la Región Trifinio	Tipo de roca (Matus 2007)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Cuerpos de agua	-----	*Ninguna	0

Fuente: elaboración propia con base en Matus Silva (2007) y Hernández Salinas (2019).

* Categoría añadida considerando que no puntan en la posibilidad de recarga hídrica.

Figura 8. **Potencial de recarga hídrica según geología, 2019**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 8 muestra el potencial de recarga hídrica derivada del tipo de roca en CARL. El 60,7 % (1 933,30 Ha) son rocas no acuíferas, por lo que representan un potencial muy bajo de infiltración; el 20,9 % (665,67 Ha) son acuíferos volcánicos fisurados de gran extensión, los cuales permiten un potencial bajo de recarga; el 1,8 % (57,33 Ha) son acuíferos bajo capas de cobertura, los cuales permiten un potencial de recarga alta; por último, el 17,3 % (551 Ha) son acuíferos porosos de extensión limitada, los cuales permiten muy alto potencial de recarga. Por tanto, derivado de las rocas, CARL tiene un potencial de recarga bajo dado que alrededor del 60 % de sus rocas son no acuíferas.

4.2.4. Mapa de cobertura vegetal

Este mapa se obtuvo a partir del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI es uno de los múltiples índices que sirven para obtener información relacionada con la vegetación a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda⁵⁴. Para el cálculo de este índice se hizo uso de imágenes del satélite Landsat 8, como se mencionó anteriormente, la escena empleada fue del 16 de febrero de 2019, debido a que contenía pocas nubes lo que facilita su análisis.

El satélite Landsat 8, transporta dos instrumentos OLI y TIRS, que corresponden a las siglas en inglés para la Operation Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).

El sensor OLI provee acceso a nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los 0,433 micrómetros a los

⁵⁴ PÉREZ GUTIÉRREZ, Carlos; MUÑOZ NIETO, Ángel. *Teledetección: nociones y aplicaciones*. <https://bit.ly/3hXCylL>. Consulta: 28 de marzo de 2021.

1,390 micrómetros, mientras que TIRS registra de 10,30 micrómetros a 12,50 micrómetros⁵⁵.

El NDVI es el índice más utilizado, para su cálculo se utiliza la banda infrarrojo cercano y roja, que en el caso de Landsat 8 corresponde a las bandas 4 y 3 respectivamente.⁵⁶ Quienes definieron la siguiente ecuación:

$$NIR = \frac{IR - R}{IR + R}$$

NIR= Índice de vegetación diferenciado

IR= banda de infrarrojo cercano

R= banda roja

Es importante mencionar que el NDVI, arroja valores de 0 a 1; por lo que tuvo que ajustarse a las clases indicadas en el método de Matus Silva, tal como lo muestra la tabla XIX.

⁵⁵ SÁNCHEZ-MÉNDEZ, Arely Guadalupe; ARGUIJO-HERNÁNDEZ, Simón Pedro. *Análisis de imágenes multiespectrales para la detección de cultivos y detección de plagas y enfermedades en la producción de café*. <https://bit.ly/3iGT8XX>. Consulta: 12 de mayo de 2021,

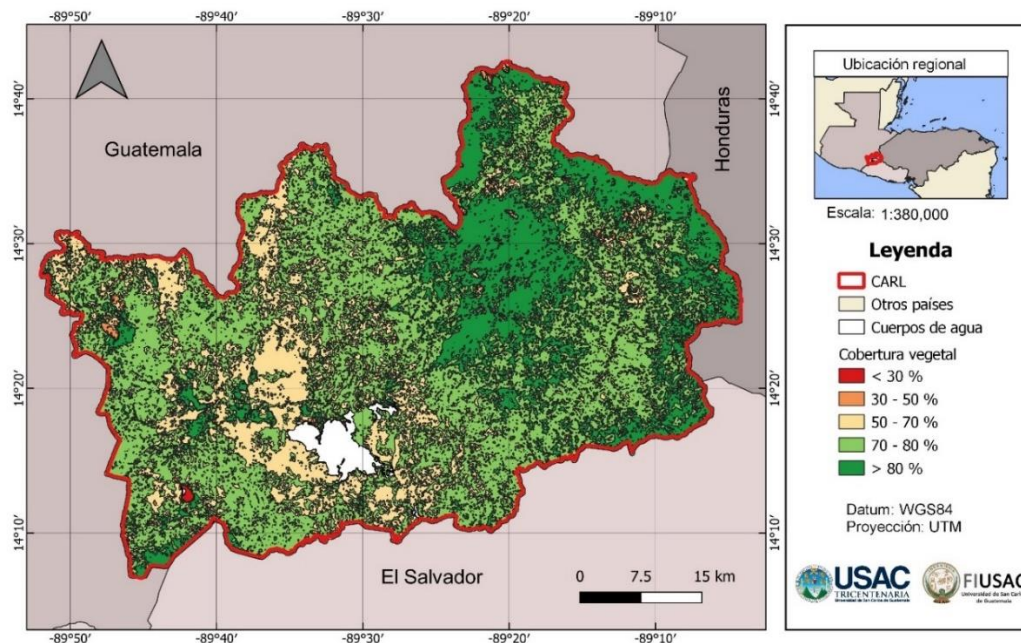
⁵⁶ *Ibíd.*

Tabla XIX. **Reclasificación del NDVI según la metodología de Matus Silva**

Caracterización del NDVI y rangos de densidad de cobertura vegetal	Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Áreas donde la vegetación se encuentra en un estado de gran vigor y densidad. (NDVI > 0,3)	> 80 %	Muy alta	5
Áreas con árboles y arbustos (NDVI 0,2 – 0,3)	70 – 80 %	Alta	4
Áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (NDVI 0,1 – 0,2)	50 – 70 %	Moderada	3
Áreas rocosas, arenosas con mínima cobertura vegetal (NDVI 0 -0,1)	30 – 50 %	Baja	2
Cuerpos no vegetales (NDVI < 0)	< 30 %	Muy baja	1

Fuente: elaboración propia, con base en Tafur Rojas (2017) y Matus Silva (2007).

Figura 9. **Cobertura vegetal CARL, 2020**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 9 muestra la densidad de la cobertura vegetal en CARL. El 0,82 % (26,12 Ha) son cuerpos no vegetales (cuerpos de agua) por lo que tiene una densidad menor al 30 % de cobertura vegetal, lo que denota un muy bajo potencial de recarga; el 0,52 % (16,56 Ha) de la cuenca concentra una cobertura vegetal entre 30 al 50 %, lo que permite un potencial de recarga baja; el 12,70 % del territorio (404,50 Ha) tiene arbustos pasturas vegetales por lo que concentran de un 50 al 70 % y representa un potencial de recarga moderado; el 26,55 % (845,62 Ha) concentra de un 70 a un 80 % de cobertura vegetal y representa un alto potencial de recarga; por último el 44,28 % (1410,32 Ha) del territorio concentra más del 80 % de cobertura vegetal y representa un potencial muy alto de recarga. Este alto porcentaje se debe a las áreas protegidas que hay dentro de la región triffinio y más específicamente en CARL.

4.2.5. Mapa del uso del suelo

Este mapa se realizó utilizando de base el estudio realizado por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe -CATHALAC⁵⁷ (2011); sin embargo, fue necesario adecuar las categorías a la Metodología de Matus Silva. En la tabla XX se resume la reclasificación.

⁵⁷ CATHALAC (Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y Caribe). *Cobertura y uso de la tierra de la región triffinio*. <https://bit.ly/3sKOrQk>. Consulta: 24 marzo 2021.

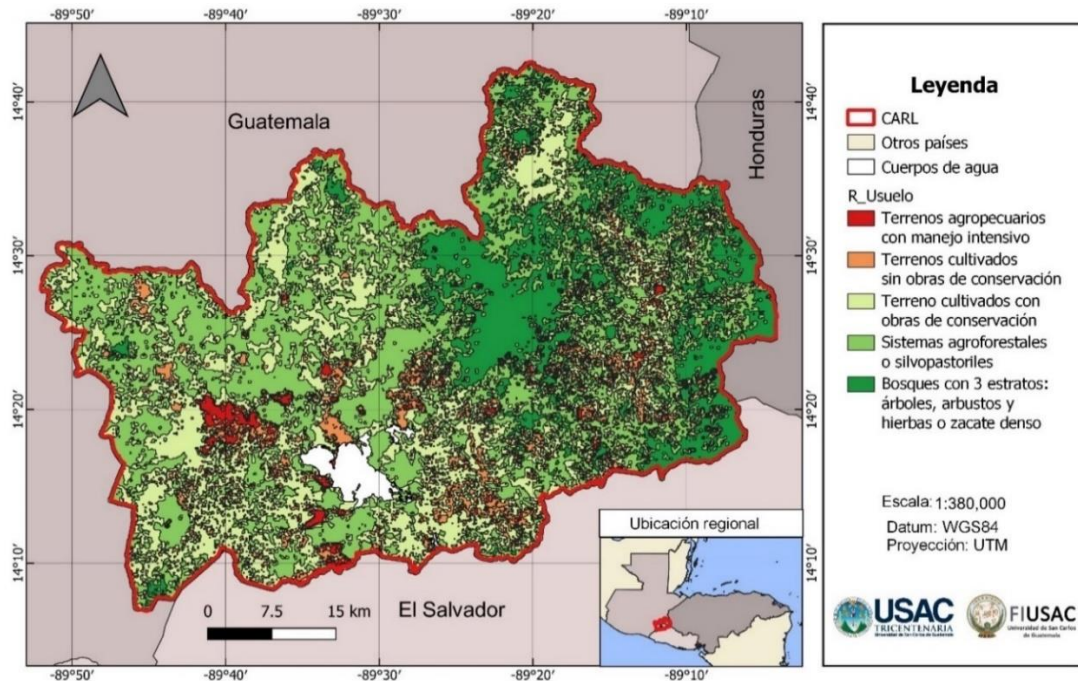
Tabla XX. **Reclasificación de cobertura y uso de la tierra según la metodología de Matus Silva**

Equivalente del sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra de la Región Trifinio	Uso del suelo (Matus 2007)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque latifoliado, bosque de coníferas, bosque mixto	Bosques con 3 estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Café, cultivos arbóreos, sistemas agroforestales, arbustos y matorrales.	Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Granos básicos (maíz, frijol, maicillo, trigo) –terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural- hortalizas y frutas anuales -cultivadas en condiciones naturales o en invernadero-	Terrenos cultivados con obras de conservación	Moderada	3
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes, mosaico de cultivos.	Terrenos cultivados sin obras de conservación	Baja	2
Cultivos permanentes herbáceos y plantas de tallo, pastos cultivados, pastos naturales o hierbazal.	Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1
centros poblados, complejo industrial, minas descubiertas y otras superficies de excavación, playas, dunas y arenales, roqueda, lavas, humedales y zonas pantanosas, ríos, lagos, lagunas y lagunetas.	-----	*Ninguna	0

Fuente: elaboración propia, con base en CATHALAC (2010) y Bueso (2010).

* Categoría añadida a la metodología Matus Silva para considerar estos tipos de suelo.

Figura 10. Uso del suelo CARL, 2011



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

La figura 10 muestra el uso del suelo de CARL. El 2,5 % del territorio (79,62 Ha) son cuerpos de agua, centros poblados, minerías a cielo abierto, arenales, playas, o lava, los cuales no fueron consideradas como zonas de recarga, por lo que no se les asignó ponderación. Por su parte, los terrenos agropecuarios, los cuales permiten un potencial muy bajo de recarga hídrica representan el 10,7 %; mientras que el 4,6 % de los terrenos (146,51 Ha) son cultivados sin obras de conservación, lo que permite un bajo potencial de recarga hídrica; el 15,8 % de los terrenos (503,23 Ha) son cultivados con obras de conservación, permitiendo un moderado potencial de recarga; el 45,7 % (1 455,55 Ha) son sistemas agroforestales o silvopastoriles; por último el 20,7 % de los terrenos (659,30 Ha) son bosques que incluyen arbustos y hierba o zacate denso, estos terrenos permiten un muy alto potencial de recarga hídrica.

4.2.6. Mapa de potencial de recarga hídrica por el método de Matus Silva

Para la elaboración de este mapa, haciendo uso de la calculadora ráster se cruzó la información de todos los mapas anteriores (pendientes, tipo de suelos, geológico, cobertura vegetal y uso del suelo) según lo definido en la sección 3.2.2.

5. RESULTADOS

5.1. Textura del suelo

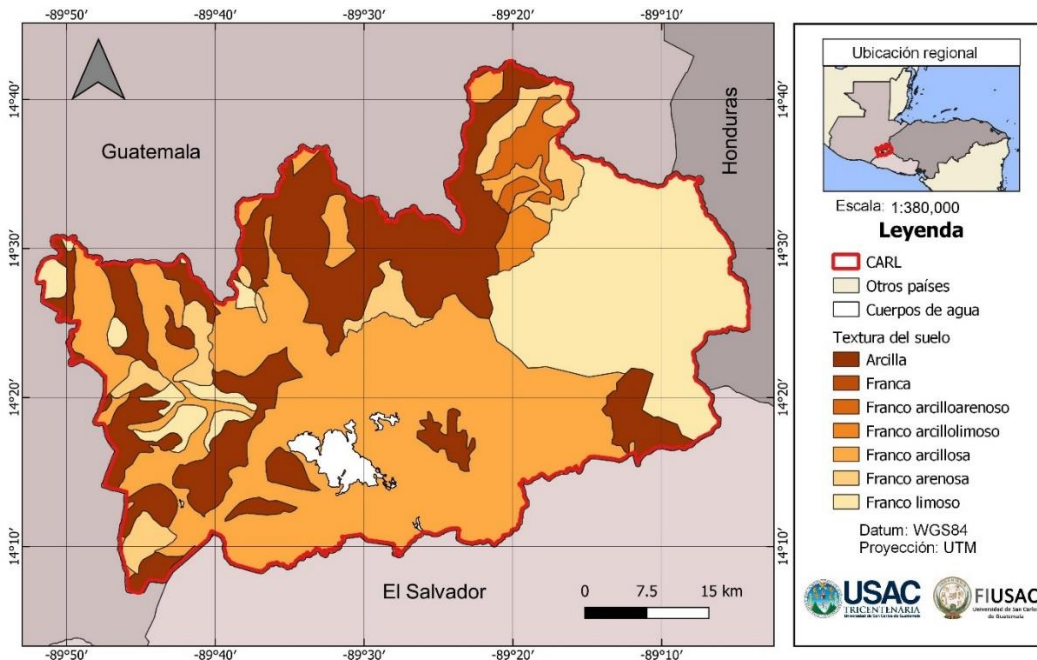
Para la identificación de la textura de suelos de CARL, se tomó información de diferentes mapas de suelos de la región: para el caso de Guatemala se tomó de Simmons⁵⁸, para El Salvador de MAG⁵⁹ y para Honduras de FAO⁶⁰; sin embargo, considerando la antigüedad de estos estudios, los mapas tuvieron que digitalizarse manualmente a partir del software Qgis 3.8.1.

⁵⁸ SIMMONS, Charles. *Clasificación de reconocimiento de suelos de la República de Guatemala*. p. 522.

⁵⁹ MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). *Clasificación de suelos por división política de El Salvador*, C.A. <https://bit.ly/3zsCT62>. Consulta: 24 de abril de 2021.

⁶⁰ FAO. *Los suelos de Honduras: informe al gobierno de Honduras* (No° 2630). <http://www.fao.org/3/ar884s/ar884s.pdf>. Consulta: 24 de abril de 2021.

Figura 11. Textura de suelos de CARL, 2021



Fuente: elaboración propia, con base en Simmons (1959) MAG (2012) y FAO (1969), empleando Qgis.

La figura 11 resume el comportamiento de la textura del suelo en la Cuenca Alta del Río Lempa. El 26,0 % del suelo (820 Ha) de CARL es de textura arcillosa, la cual se caracteriza por tener muy baja posibilidad de recarga; el 46,0 % del suelo (1 443,80 Ha) es de textura franco arcilloso o franco arcillo arenoso/limoso, texturas que permiten baja posibilidad de recarga; el 22,43 % del suelo (706,72 Ha) es franco limoso, lo que permite moderada posibilidad de recarga; el 0,05 % del suelo (1,47 Ha) es de textura franca, lo cual permite una alta posibilidad de recarga; por último, el 5,7 % del suelo (178,30 Ha) es de textura franco arenosa, textura que permite una muy alta posibilidad de recarga.

5.2. Pruebas de infiltración

La velocidad de infiltración del suelo se tomó según lo establecido en la tabla XXI, estos valores se le asignó espacialmente a la textura del suelo (ver figura 11).

Tabla XXI. **Velocidad del suelo según textura**

Muestra	Velocidad de infiltración (mm/día)
Arenoso grueso	1 020
Arenoso fino	516
Franco	360
Franco arenoso	384
Franco limoso	288
Franco arcilloso	180
Arcillo limoso	204
Arcillo compacto	132

Fuente: MARANO, Roberto. *Planificación y manejo del agua en la agricultura irrigada: relación suelo-agua*. p. 5.

5.3. Análisis de la calidad de agua del río

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la calidad de agua del río Lempa en los diferentes puntos de monitoreo establecidos.

Tabla XXII. Análisis de la calidad de la cuenca alta del río Lempa, febrero 2020

Río	Ph Unidades	Tempe- ratura °C	Conducti- vidad µS/cm	Oxígeno Disuelto mg/l	Oxígeno Disuelto % Sat	Turbidez NTU	Solidos Totales mg/l	Solidos Disueltos Totales mg/l
Río Olopita (puente)	8.26	21.6	261	6.8	103.4	2.3	254	133.80
Río Los Espinos	8.08	21.6	349	5.34	80.5	3.4	256	180.50
Río Atulapa (Puente)	7.88	19.9	64.3	6.71	101.1	1.3	105	33.60
Río Frío	7.75	19.4	71.3	6.75	101.8	0.9	120	37.80
Río Quilio 1	7.56	18.5	32.3	6.96	104.5	3.3	86	17.37
Río Quilio 2	7.59	18.3	35.1	6.89	103.2	6.5	99	18.99
Río Quilio 3	7.78	19.3	46.3	7.05	105.8	11.3	105	24.50
Río Tulas	7.7	19.6	47.5	6.81	101.6	6.5	75	25.00
Río Pomola	7.98	27.4	93.9	6.96	103	3.2	120	42.10
Río Nunuapa	8.1	23.2	96.8	6.86	101.8	1.3	123	47.40
Río Lempa (Citalá)	8.05	28.3	131.1	6.56	98	3.5	150	58.10
Río Angue	8.32	24.1	400	6.64	98.9	2.3	265	195.10
Río San José	8.17	22	991	2.34	35.5	5.14	780	519.00
Río Lempa Masahuat	8.1	25.5	151.4	6.88	102.9	2.14	225	71.00
Río Guajoyo	8.53	24.4	374	6.71	100.5	4.3	258	182.20
Río Ostua 1	8.26	29.2	390	5.81	87.1	3.8	280	172.40
Río ostua 2	8.43	27.7	464	6.01	90.2	5.3	354	216.40
Río Jupilingo	8.53	28.8	323	6.81	102.7	5.5	440	143.50

Fuente: laboratorio ambiental, CUNORI.

5.4. Información climática

En esta sección se presenta la información climática obtenida a partir de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de influencia de CARL, incluyendo la temperatura media y la precipitación media.

Tabla XXIII. **Temperatura media de las estaciones meteorológicas ubicadas cercanas o dentro de la cuenca alta del río Iempa, 2020**

Estación Meteorológica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Guija	27,8	29,0	30,0	31,3	28,9	27,2	27,2	27,4	27,6	27,1	26,0	25,5
Las Pilas	15,6	16,6	16,9	19,0	18,6	17,6	18,0	18,4	18,2	17,9	16,2	15,6
Nueva Concepción	27,0	28,0	30,0	30,0	28,0	27,5	27,2	27,4	28,0	27,5	26,8	25,2
Asunción Mita	27,3	28,5	30,0	31,9	29,1	27,8	28,1	27,8	27,2	26,8	25,9	25,9
Esquipulas	21,4	21,0	23,6	25,6	25,3	24,2	24,1	24,1	23,6	22,8	20,6	20,2
Camotán	20,9	26,0	27,6	32,3	29,4	27,0	26,8	27,1	26,8	26,2	24,6	23,5
Monjas	22,0	24,0	24,5	26,0	27,0	25,5	26,0	25,0	24,7	23,0	23,5	23,5
Ocatepeque	24,5	24,5	26,5	28,5	27,0	26,0	26,0	25,5	26,5	21,5	24,0	19,0
Santa Rosa	21,0	25,3	21,5	27,0	22,5	24,0	22,5	22,5	22,0	25,0	21,0	18,0

Fuente: elaboración propia, con base en INSIVUMEH, CENAOS y Centro de clima y agrometeorología.

Tabla XXIV. **Precipitación media de las estaciones meteorológicas
ubicadas cercanas o dentro de la cuenca alta del río
Lempa, 2020**

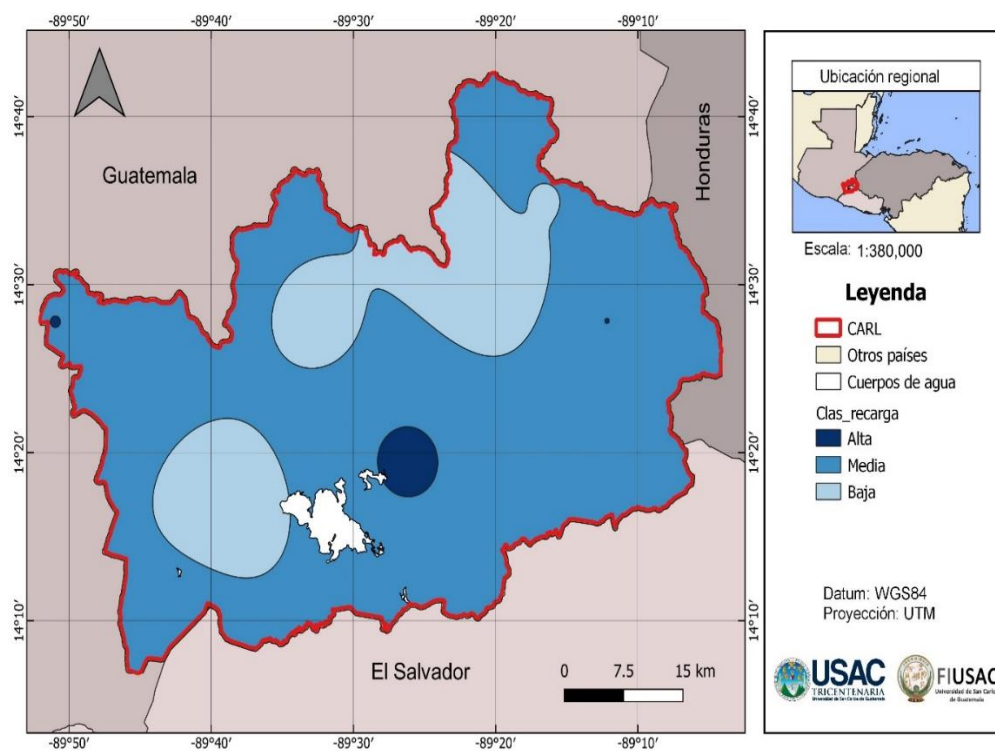
Estación Meteoro- lógica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Guija	1	2	8	56	190	222	234	228	265	160	24	2
Las Pilas	5	9	21	78	265	337	246	315	337	197	37	9
Nueva Concepción	8	9	24	52	225	300	260	330	280	260	12	3
Asunción Mita	0	5	7	30	199	269	213	220	296	152	20	3
Esquipulas	12	8	16	50	174	292	244	288	336	177	30	13
Camotán	5	2	8	32	157	247	134	179	250	140	22	8
Monjas	1	5	5	17	114	146	102	125	169	137	4	0
Ocatepeque	1	6	13	30	140	229	237	200	244	109	22	2
Santa Rosa	35	18	23	23	155	240	180	175	210	130	60	40

Fuente: elaboración propia, con base en INSIVUMEH, CENAOS y Centro de clima y agrometeorología.

5.5. Recarga hídrica con metodología Gunther Schosinsky

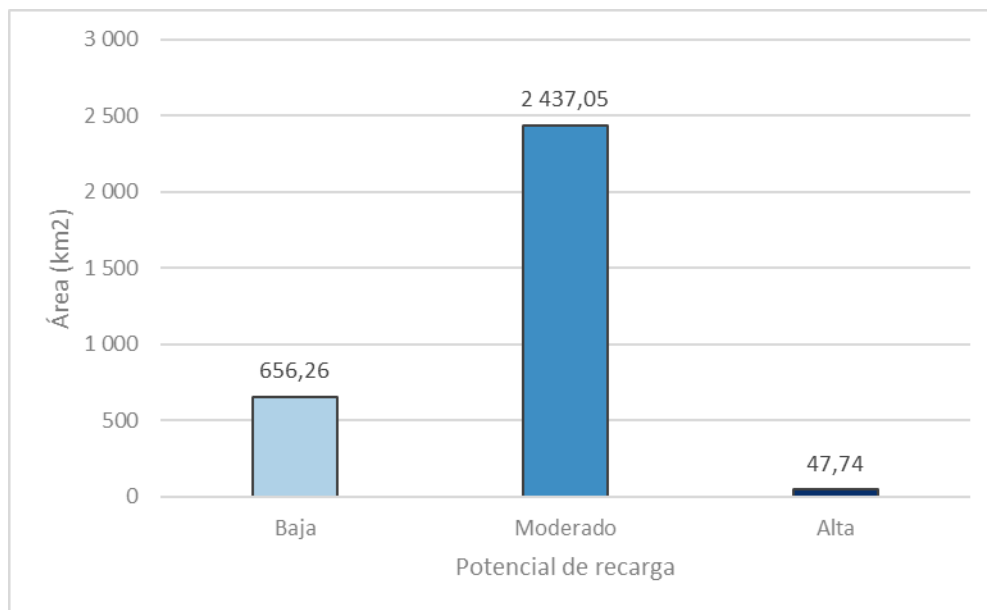
A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología de Gunther Schosinsky.

Figura 12. Posibilidad de recarga hídrica en CARL usando la metodología de Gunther Schosinsky, 2020



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

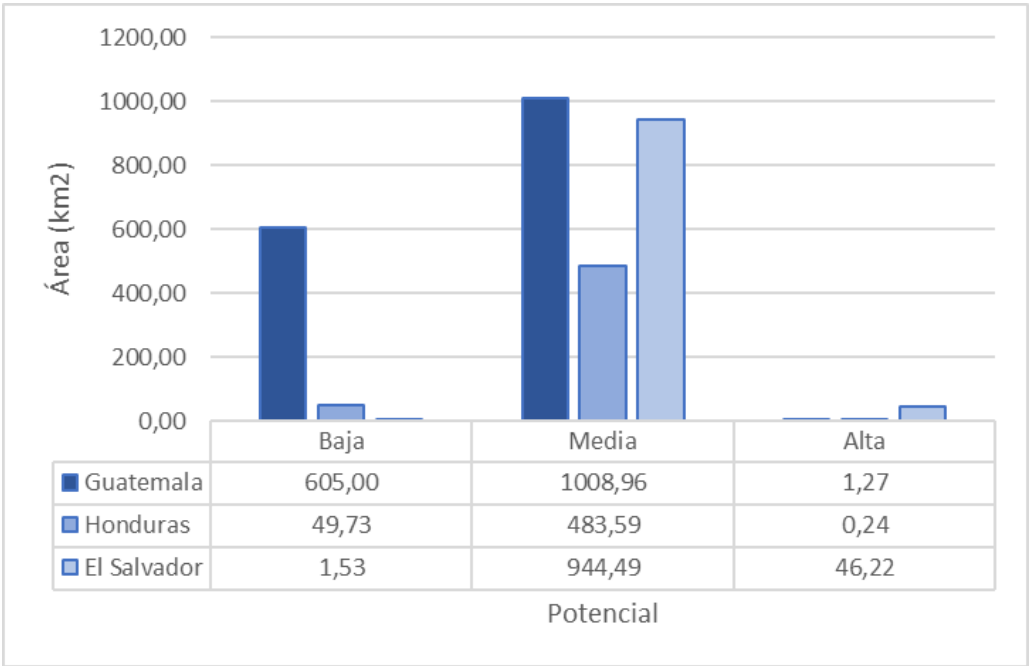
Figura 13. **Área en kilómetros de zonas potenciales de recarga hídrica de CARL según la metodología de Gunther Schokosinsky**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Las figuras 12 y 13 muestra el potencial de recarga hídrica de la Cuenca Alta del río Lempa, según la metodología de Gunther Schosinsky (2006). 656,26 km² del territorio tiene un potencial bajo de recarga hídrica; 2 437,05 km² del territorio tiene un potencial moderado de recarga hídrica, 47,74 km² del territorio tiene un potencial alto de recarga hídrica; por tanto, CARL es un territorio con potencial moderado de recarga hídrica.

Figura 14. **Área de potencial de recarga hídrica por país en kilómetros cuadrados según la Metodología de Gunther Schosinsky**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

La figura 14 muestra que, según la metodología de Gunther Schosinsky, las áreas de CARL se concentran en potenciales medios para los tres países y bajo en el caso de Guatemala. Es importante recordar que más del 50 % de CARL está ubicada en Guatemala; por tal motivo la tabla XXV muestra la proporción de áreas con potencial alto, medio y bajo, en cada país.

Tabla XXV. **Porcentaje de potencial de recarga hídrica por país según la metodología Gunther Schosinsky**

País	Área de CARL [km ²]	Potencial de recarga	Área [km ²]	% de área
Guatemala	1 614	Baja	605,00	37,48
		Moderada	1 008,96	62,51
		Alta	1,27	0,08
Honduras	534	Baja	49,73	9,31
		Moderada	483,59	90,56
		Alta	0,24	0,05
El Salvador	993	Baja	1,53	0,15
		Moderada	944,49	95,11
		Alta	46,22	4,66

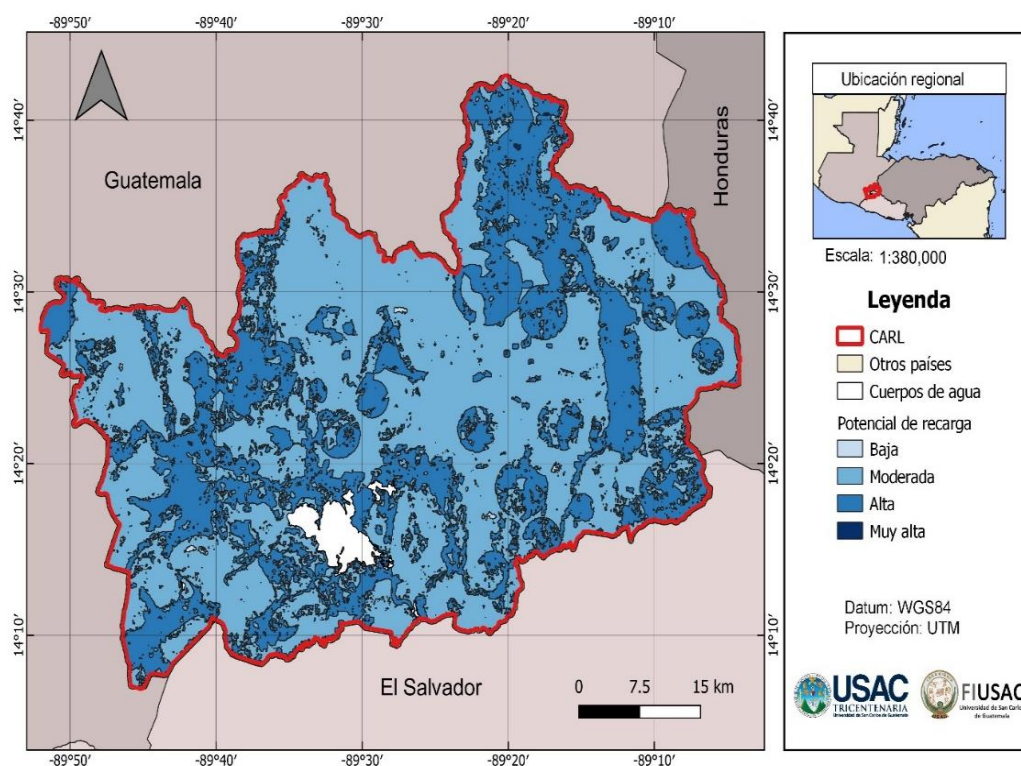
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

A partir de los datos mostrados en la tabla XXV, se obtuvo que, en Honduras y El Salvador, el potencial de recarga hídrica es en su mayoría de tipo moderado, puesto que más del 90 % del territorio responde a esta clase, a diferencia de Guatemala, en donde si bien más del 60 % del territorio tiene una recarga moderada, el 37 % tiene potencial bajo de recarga hídrica. De los tres países, El Salvador es el que mayor territorio con potencial de recarga hídrica alto; sin embargo, son 46,22 km², lo que representa el 5 % de CARL en El Salvador.

5.6. Recarga hídrica con la metodología Matus Silva

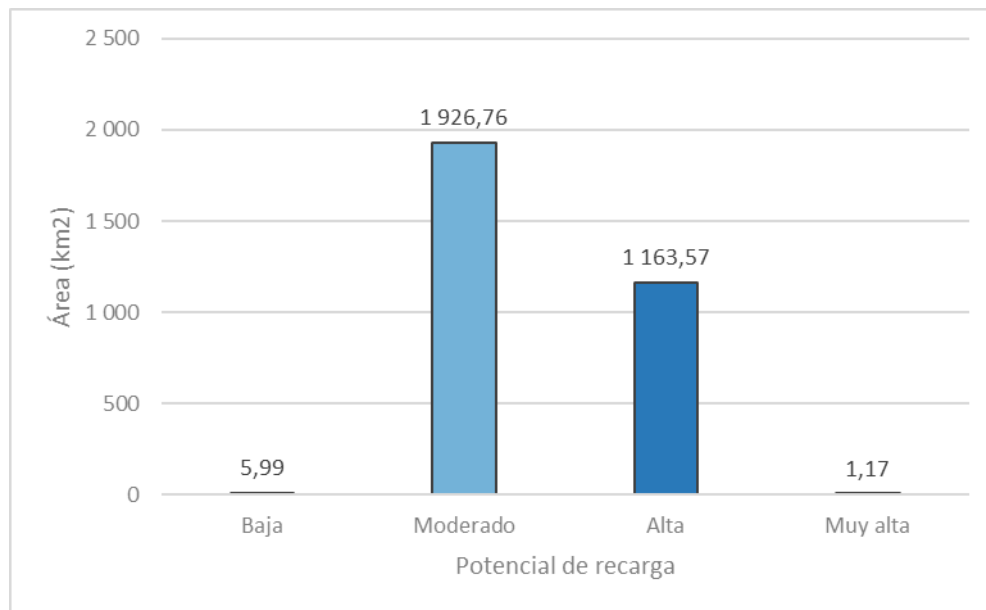
A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología de Matus Silva.

Figura 15. Posibilidad de recarga hídrica en CARL usando la metodología de Matus Silva



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

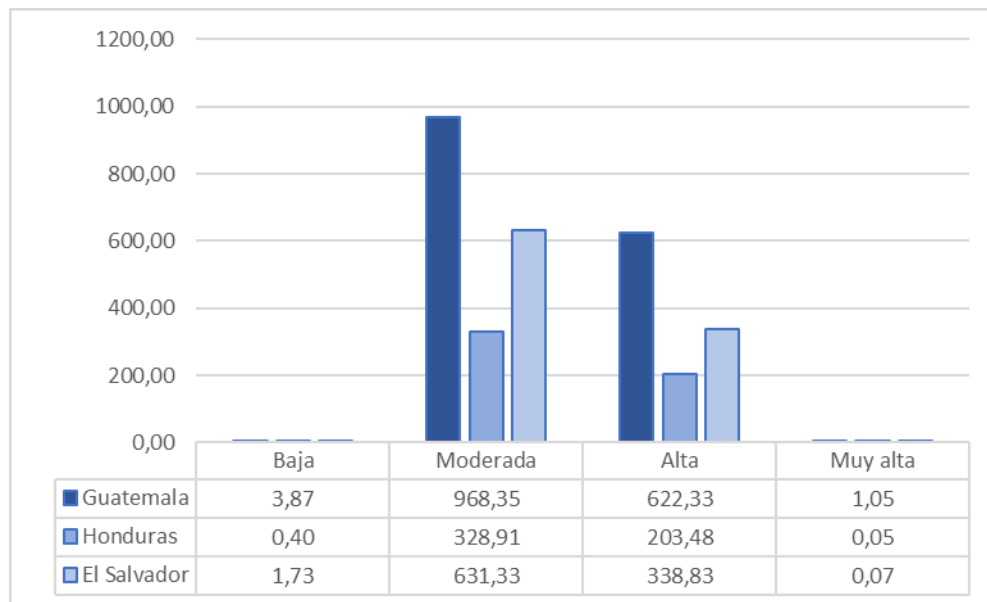
Figura 16. **Área en kilómetros de zonas potenciales de recarga hídrica de CARL según la metodología de Matus Silva**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Las figuras 15 y 16 muestra el potencial de recarga hídrica de la Cuenca Alta del río Lempa, utilizando como base el método de Matus Silva (2007). 5,99 km² del territorio tiene un potencial bajo de recarga hídrica; 1 926,76 km² del territorio tiene un potencial moderado de recarga hídrica, 1 163,57 km² del territorio tiene un potencial muy alto de recarga hídrica y 1,17 km² tiene un potencial muy alto; por tanto, CARL es un territorio con potencial moderadamente alto de recarga hídrica.

Figura 17. Área de potencial de recarga hídrica por país en kilómetros cuadrados según la Metodología de Matus Silva



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

La figura 17, indica el área de zonas potenciales de recarga hídrica en cada país, cabe destacar que el área se concentra principalmente en potencial moderado y alto, puesto que el área de bajo y muy alto son mínimos en los tres países. En Guatemala el 31 % del área tiene potencial de recarga hídrica moderada y un 20 % de recarga alta. Por su parte Honduras, concentra un 10 % de potencial moderado y un 7 % de alto. En El Salvador se el 20 % del área tiene potencial moderado y el 11 % alto.

Es importante recordar, que el 51,38 % de la cuenca está ubicada en Guatemala, es por ello que los porcentajes más altos se ubican, en este país. Por tal razón, es importante analizar la proporción de áreas potencial de recarga, según el área de CARL en cada país.

Tabla XXVI. **Porcentaje de potencial de recarga hídrica por país según la Metodología de Matus Silva**

País	Área de CARL [km2]	Potencial de recarga	Área [km2]	% de área
Guatemala	1 614	Baja	3,87	0,24
		Moderada	968,35	60,00
		Alta	622,33	38,56
		Muy alta	1,05	0,07
Honduras	534	Baja	0,40	0,08
		Moderada	328,91	61,59
		Alta	203,48	38,10
		Muy alta	0,05	0,01
El Salvador	993	Baja	1,73	0,17
		Moderada	631,33	63,58
		Alta	338,83	34,12
		Muy alta	0,07	0,01

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

A partir de los datos mostrados en la tabla XXVI, se evidencia que la proporción de zonas potenciales de recarga hídrica según la metodología de Matus Silva es equivalente, puesto que se obtienen porcentajes similares para cada potencial en los tres países.

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los datos geoespaciales disponibles para la región de estudio y los datos tomados en campo se generaron los productos requeridos para determinar el potencial de recarga hídrica de CARL. Se utilizó de base los puntos de monitoreo establecidos por CUNORI, en estas ubicaciones se tomaron las muestras para medir la calidad del agua; estos puntos, también se utilizaron de base para hacer el balance hídrico en la cuenca.

Los mapas utilizados para generar la textura del suelo, permitió identificar que cerca del 72 % del suelo de CARL es arcilla o franco arcilloso, los cuales se caracterizan por permitir una baja capacidad de infiltración.

6.1. Calidad de agua

A partir del monitoreo de la calidad de agua de CARL, se identificó que el Ph de la mayoría de los puntos se encontraba dentro del rango de 6,5 a 8,5 que es el LMP en la norma guatemalteca NTG 29001, que además es el rango aceptable para potabilizar el agua; cabe destacar que Guatemala es el único país que tiene establecido un rango de este parámetro.

Con relación a la temperatura, ninguna de las muestras tomadas superó el LMP y los valores obtenidos fueron similares a los de monitoreos realizados en el pasado. La conductividad eléctrica de todos los puntos de monitoreo está por debajo del LMP; el punto con mayor valor es el Río San José con 991 $\mu\text{s}/\text{cm}$, al

compararlo con el monitoreo realizado en 2018⁶¹, se identificó un incremento de casi 450 unidades, esta situación puede deberse al incremento de sólidos disueltos y sales minerales provocadas por la escorrentía, así como también por la descarga de aguas residuales por afluentes.

Los valores obtenidos de oxígeno disuelto obtenidos en el monitoreo se encuentran dentro de los límites establecidos en la normativa de los tres países (4 a 8 mg/L) con excepción del punto 13 ubicado en el Río San José cuyo valor fue de 2,34 mg/L, esto indica la presencia de contaminación por el vertido constante de aguas residuales.

Con relación a la turbidez, Guatemala establece como LMP 15 NTU, mientras que El Salvador 5 NTU, Honduras no tiene límite establecido. Ninguno de los puntos supera el LMP de Guatemala, pero 6 ríos superan al de El Salvador; sin embargo, de estos 6 solamente 1, el punto 13 ubicado en el Río San José, se encuentra en el Salvador y supera ligeramente el LMP. Cabe destacar que esta propiedad se debe a la contaminación provocada por las partículas de suelo y materia orgánica, que surgen principalmente en época lluviosa⁶².

Los sólidos disueltos totales de los puntos monitoreados, se encuentra debajo del LMP (500 mg/L) con excepción del punto 13 ubicado en el Río San José el cual supera el límite indicando la existencia de contaminación provocada por las partículas de suelo y materia orgánica, especialmente en época lluviosa. Con relación a los sólidos totales, ninguno de los puntos monitoreados supera el LMP (100 mg/L), el punto con mayor valor es el 13 y concuerda con lo explicado anteriormente.

⁶¹ MTFRL y CUNORI. *Vulnerabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la Región Trifinio: período 2010-2018*. <https://bit.ly/3m4dWJB>. Consulta: 22 de febrero de 2021.

⁶² *Ibíd.*

6.2. Análisis de la metodología Gunther Schosinsky

A partir de esta metodología se clasificó CARL en tres clases según el volumen anual de recarga hídrica: baja, moderada y alta. El 77,6 % de la cuenca presentó un potencial de recarga hídrico moderado, el 20 % bajo y el área restante (2,4 %) un potencial alto. Esto implica que, según la metodología Gunther Schosinsky, CARL tiene un potencial de recarga de moderada; es importante mencionar que el área cubierta por cuerpos de agua no se tomó en cuenta.

Al analizar el potencial de recarga hídrica por país, se obtuvo que en Guatemala el 66 % del territorio tiene un potencial moderado, un 37 % bajo y un porcentaje mínimo un potencial alto; en el caso de Honduras y El Salvador, coincide en que ambos países tienen más del 90 % de su territorio con potencial moderado de recarga, y, al igual que en Guatemala un porcentaje mínimo de potencial alto. Aunque cabe destacar que el 5 % de CARL en El Salvador, tiene un potencial alto, el cual es a su vez el más alto en los tres países.

Esta metodología se basa en un modelo matemático, que ha demostrado un error de cálculo menor al ochenta por ciento; sin embargo, tiene la debilidad de la ubicación geoespacial. En este trabajo se utilizó la interpolación IDW, por lo que se observa que las zonas con mayor potencial de recarga circulan a los puntos de muestreo, esto puede provocar variaciones y así también, refleja la necesidad de incrementar los puntos de muestreo.

6.3. Análisis de la metodología Matus Silva

La metodología Matus Silva, permite la clasificación de zonas potenciales de recarga hídrica en 4 clases: baja, moderada, alta y muy alta. Para llegar a este

resultado fue necesaria la realización de cinco mapas considerando los factores que afectan a la recarga hídrica: tipo de suelo, pendiente del terreno, uso del suelo, cobertura vegetal y la geología. La información de estos mapas se combina y se obtiene el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica.

Los resultados obtenidos indican que el 0,19 % (5,99 km²) tienen un potencial bajo, 61,34 % (1 926,8 km²) tiene un potencial moderado, el 37,04 % (1 163,6 km²) tiene un potencial alto y el 0,037 % (1,17 km²) tiene un potencial muy alto; el área cubierta por cuerpos de agua no se tomó en cuenta; por tanto, esta metodología permite clasificar a CARL como una cuenca con potencial moderadamente alto de recarga hídrica.

Al evaluar los resultados por país, a diferencia de la metodología de Gunther Schosinsky, los porcentajes de área con determinado potencial de recarga hídrica coinciden en los tres países, puesto que más del 60 % de CARL en cada territorio tiene potencial moderado, más del 30 % con potencial alto y un porcentaje mínimo con potencial muy alto.

Cabe destacar que esta metodología se trabajó a través de la utilización de sistemas de información geográfica, por lo que tiene la ventaja de asignarle ubicación espacial a cada uno de los atributos.

6.4. Comparación de metodologías

Las metodologías se basan en aspectos diferentes puesto que la de Gunther Schosinsky se basa en un modelo matemático, es decir tiene un enfoque cuantitativo; por otro lado, la metodología de Matus Silva se basa en la mezcla de conocimiento técnico-científico lo que le da un enfoque cualitativo. La diferencia de enfoques implica, entonces, la obtención de resultados distintos.

Agregada a esta diferencia, la ubicación geoespacial también representa un aspecto importante. En el caso de la metodología de Matus Silva, todas las variables analizadas tienen una ubicación espacial, lo que representa mayor facilidad al momento hacer el mapa de zonas potenciales de recarga hídrica.

Para el caso de la metodología de Gunther Schosinsky, los resultados se obtuvieron a partir de una media cualitativa la cual posteriormente fue ubicada espacialmente mediante la utilización de interpolación IDW. La utilización de esta herramienta disminuyó el nivel de detalle mostrando el potencial de recarga en grandes áreas, a diferencia de la metodología de Matus Silva, en donde el nivel de detalle es mayor.

Esta diferencia de detalle, dificulta la comparación entre los resultados obtenidos a partir de cada metodología; sin embargo, al combinar los resultados de ambas metodologías, se obtuvo que al menos el 28 % de la cuenca tiene un potencial alto de recarga hídrica; cabe destacar que debido a que Gunther Schosinsky clasifica al territorio con potencial bajo, moderado y alto, y Matus Silva como muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto; para Gunther Shosinsky se tomó desde moderado hasta alto y para Matus Silva las zonas altas y muy altas.

CONCLUSIONES

1. A partir de mapas generados en la Región Trifinio, se identificaron 7 clases texturales en la Cuenca Alta del Río Lempa: arcilloso, franco, francoarcillo-arenos, francoarcillo-limoso, franco arcilloso, franco arenoso y franco limoso. La textura más frecuente es la franco-arcillosa (1 443,80 Ha). Este tipo de suelo se caracteriza por permitir una baja posibilidad de recarga, debido a su composición.
2. Se identificó que más del 60,7 % de las rocas de la Cuenca Alta del Río Lempa, son de tipo no acuífera; sin embargo, dentro de la región hay una significativa presencia de acuíferos, los cuales representan zonas de recarga hídrica.
3. Se determinó que, en la Cuenca Alta del Río Lempa, la pendiente varía entre 0 a 45 %; así también, más del 80 % del territorio tiene una pendiente de entre 0 a 15 %, lo cual es beneficioso para la recarga hídrica puesto que provoca que el agua permanezca más tiempo en el suelo permitiendo que exista una mayor tasa de infiltración.
4. Se calculó la precipitación media anual del año 2020 de la Cuenca Alta del Río Lempa, mediante el uso de isoyetas, obteniendo como resultado 1 422 mm de lluvia anual; asimismo a través de isotermas se obtuvo la temperatura media anual la cual tuvo un valor de 25,5 °.

5. El monitoreo de la calidad de agua del Río Lempa, realizado en conjunto con CUNORI en febrero de 2020, indicó que los parámetros de potencial de hidrógeno (pH), temperatura, conductividad eléctrica, turbidez (si se usa la norma guatemalteca, COGUANOR NTG 29001), oxígeno disuelto y sólidos disueltos se encuentran dentro de los parámetros establecidos en la normativa de los tres países. Lo que implica que en general el agua de la cuenca del río lempa puede clasificarse como apta para consumo humano; es importante resaltar que el punto de monitoreo ubicado en el Río San José, Metapán El Salvador, se encuentra por debajo de los límites mínimos permitidos en los parámetros de oxígeno disuelto, turbidez y sólidos disueltos, lo cual se debe a la alta concentración de contaminación que hay en el cuerpo de agua, en este caso el agua no es apta para el consumo humano.
6. Los resultados de ambas metodologías indican que la cuenca alta del Río Lempa se clasifica mayormente con un potencial medio o moderado de recarga; puesto que según la metodología de Gunther Schosinsky el 77,6 % del área de estudio tiene potencial medio y según la metodología de Matus Silva, un 61,34 % de la cuenca.
7. Al combinar los resultados de ambas metodologías, se concluye que al menos el 28 % de la cuenca tiene potencial alto de recarga hídrica. Cabe destacar, que ambos datos forman parte de un modelo estimado, el cual es necesario validar para garantizar la ubicación y límites de las zonas identificadas.
8. La distribución espacial de las zonas potenciales de recarga hídrica por país en proporción con el área indica que, según la metodología de Gunther Schosinsky la porción de CARL en Guatemala un 62,5 %

presenta potencial muy bajo, mientras que un 37,5 % un potencial muy bajo y un valor mínimo presenta un potencial alto; para el caso de El Salvador y Honduras, más del 90 % de la porción de CARL en cada país presenta un potencial moderado de recarga. El Salvador es el único país que presenta un valor significativo de territorio con potencial alto de recarga hídrica, con un 5 %. Para el caso de la metodología de Matus Silva, la distribución de zonas potenciales de recarga, bajas, moderadas, altas y muy altas es similar en la porción de CARL de cada país con valores aproximados de 0,25 %, 60 %, 35 % y 0,05.

9. La diferencia entre los resultados obtenidos a partir de las dos metodologías, radica, además del enfoque (cuantitativo, cualitativo), en la ubicación espacial de las zonas potenciales de recarga hídrica, para el caso de la metodología de Matus Silva se utilizaron sistemas de información geográfica, lo que facilitó la ubicación de las zonas potenciales de recarga hídrica, mientras que la metodología de Gunther Schosinsky requiere de la generación de polígonos según la geología del suelo, tasa de infiltración y estación meteorológica, o bien como se hizo en este trabajo mediante la utilización de interpolación IDW.
10. La disponibilidad de información facilitó la aplicación de la metodología de Matus Silva. En cuanto a la metodología de Gunther Schosinsky, se demostró que es necesario incrementar la cantidad de puntos de muestreo para obtener resultados más certeros.

Según los resultados de las metodologías aplicadas se evidencio que hay varios factores que influyen en la recarga hídrica y que al combinarlos se pueden clasificar según el potencial de recarga hídrica, dando valores entre muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto, según cada metodología.

RECOMENDACIONES

1. Validar mediante inspecciones de campo las zonas identificadas en este estudio a través de la metodología de Gunther Schosinsky, así como también con la metodología de Matus Silva.
2. Incluir las zonas potenciales de recarga hídrica dentro de planes de ordenamiento territorial, así como también en proyectos de desarrollo regional promocionados tanto por los gobiernos municipales como por instituciones públicas y privadas.
3. Actualizar los mapas de parámetros que influyen en la recarga hídrica, considerando las variaciones del entorno por los diferentes factores, que permita contar con información para la toma de decisiones acertadas y la protección de las zonas de recarga hídrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO ROJAS, Harold. *Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica*. [en línea]. <<https://bit.ly/3s6Jd0X>>. [Consulta: marzo de 2021].
2. BREÑA PUYOL, Agustín Felipe; JACOBO VILA, Marco Antonio. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. [en línea]. <<https://bit.ly/3xBuzzT>>. [Consulta: 22 de marzo de 2021].
3. BUESO, Marlon Leonel. *Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Susho, Municipio de Chiquimula*. [en línea]. <<https://bit.ly/3mrAS7f>>. [Consulta: 24 de abril de 2021].
4. CATHALAC. *Cobertura y uso de la tierra de la región triffinio*. [en línea]. <<https://bit.ly/3sKOrQk>>. [Consulta: 24 marzo 2021]
5. CHAVARRÍA VIDAL, Adrián Enrique. *Prácticas relación suelo-agua-plantas en cultivos dendroenergicos*. [en línea]. <<https://bit.ly/3s2084M>>. [Consulta: 18 abril 2021].
6. Comisión Trinacional del Plan Triffinio. *Triffinio: los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca alta del río Iempa*. Guatemala. Programa para la promoción de la administración del agua como bien público

regional de la cuenca alta del río lempa en la región Trifinio. 2009. 108 p.

7. FAO. *Los suelos de Honduras: informe al gobierno de Honduras (No° 2630)*. [en línea]. <<http://www.fao.org/3/ar884s/ar884s.pdf>>. [Consulta: 24 de abril de 2021].
8. FAUSTINO, Jorge. *Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica* [notas de clase]. CATIE. 2006, 113 p.
9. HERNÁNDEZ SALINAS, Alberto. *Zonificación hídrica potencial de la región del Trifinio* [capa vectorial]. [en línea]. <<https://bit.ly/388Uzly>>. [Consulta: 22 de abril de 2021].
10. _____. *Unidades hidrogeológicas de la Región trifinio* [capa vectorial]. [en línea]. <<https://bit.ly/3gylrWW>>. [Consulta: 22 de abril de 2021].
11. INAB. *Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica*. [en línea]. <https://drive.google.com/file/d/143BCE7fSip0O7hSdc8ZFTUKygc0B_Qm_/view>. [Consulta: 14 de abril de 2021].
12. LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULUS, Joseph. *Hidrología para Ingenieros*. 2a. ed. Colombia. McGraw-Hill, 1977. 350 p.
13. MAGA. *Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A.* [en línea]. <<https://bit.ly/3zsCT62>>. [Consulta: 24 de abril de 2021].

14. MÁNZO BARRIENTOS, Daniel Esteban. *Reconocimiento hidrológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Agronomo. Facultad de Agronomía, Universidad San Carlos de Guatemala, 2008. 101 p.
15. MTFRL y CUNORI. *Vulnerabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río Lempa, en la Región Trifinio: período 2010-2018*. [en línea]. <<https://bit.ly/3m4dWJB>>. [Consulta: 22 de febrero de 2021].
16. MTFRL; CUNORI y CATIE. *Análisis de la calidad del agua de los afluentes de la cuenca alta del río lempa y residuos de plaguicidas en la producción hortícola: región trifinio: 2010-2012*. 2013. 78 p.
17. MATUS, Oscar; FAUSTINO, Jorge; JIMÉNEZ, Francisco. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica de la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua (boletín técnico no. 38)*. [en línea] <<https://bit.ly/3CuNyzR>>. [Consulta: 24 de enero de 2021].
18. MATUS SILVA, Oscar Danilo. *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicadas a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. Trabajo de titulación. (Magister scientiae en Manejo integrado de cuencas hidrográficas). Escuela de Postgrado, CATIE, 2007. 186 p.

19. MURILLO DÍAZ, José Manuel. *Recarga de acuíferos, evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero Aluvial del bajo Guadalquivir*. Tesis doctoral, departamento de ingeniería geológica, Universidad Politécnica de Madrid, 2004. 749 p.
20. ORDOÑEZ GÁLVEZ, Juan Julio. *¿Qué es una cuenca Hidrológica?*. Sociedad Geográfica de Lima y Global Partnership South America. [en línea]. <<https://bit.ly/3AvK1Q1>>. [Consulta: 22 abril de 2021].
21. PÉREZ GUTIÉRREZ, Carlos; MUÑOZ NIETO, Ángel. *Teledetección: nociones y aplicaciones*. [en línea]. <<https://bit.ly/3hXCylL>>. [consulta: 28 de marzo de 2021].
22. SÁNCHEZ-MÉNDEZ, Arely Guadalupe; ARGUIJO-HERNÁNDEZ, Simón Pedro. *Análisis de imágenes multiespectrales para la detección de cultivos y detección de plagas y enfermedades en la producción de café*. [en línea]. <<https://bit.ly/3iGT8XX>>. [Consulta: 12 de mayo de 2021].
23. SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. [en línea]. <<https://bit.ly/37BXI3h>>. [Consulta 18 de marzo 2021].
24. SCHONSINSKY, Gunther. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos*. [en línea]. <<https://bit.ly/3yCT9l6>>. [Consulta 24 de marzo 2021].
25. SIMMONS, Charles. *Clasificación de reconocimiento de suelos de la República de Guatemala*. Guatemala. Ministerio de Agricultura,

Servicio cooperativo interamericano de agricultura (SCIDA),
Instituto Agropecuario Nacional (IAN). 1959. 1 000 p.

26. TICSE OTÁROLA, Ginette Vilma. *Correlación de la cobertura vegetal de pastos naturales con la recarga hídrica de la cuenca alta del río Shullcas como medida de adaptación al cambio climático en el periodo julio -2013 hasta junio 2014*. Trabajo de graduación de Ing. ambiental. Facultad de ingeniería, Universidad continental, 2018. 115 p.
27. World Vision. *Manual de manejo de cuencas*. [en línea]. <<https://bit.ly/3CuGaV9>>. [Consultado 24 abril de 2021.]

APÉNDICES

Apéndice 1. Balance hídrico de suelos para muestra 1

Muestra	1	Clase textural	Arcilla	Kp (pendiente)	0,1	Profundidad de raíz	1300	Densidad aparente (g/cm3)	1,25				
Punto de Marchitez permanente (PMP)	276,25 mm	mm	17 %	Kv (cobertura vegetal)	0,21	Coefficiente de infiltración	0,87	Infiltración	132				
Capacidad de campo (CC)	568,75 mm	mm	35 %	Kfc (fracción que se infiltra)	0,5604	Coefficiente de follaje	0,12	Humedad inicial	568,75				
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total	
No. días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365,00
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46
Precipitación efectiva (Pi)	0,23	0,00	7,47	33,60	138,42	195,13	169,41	182,44	204,55	125,80	16,42	0,23	1073,69
Escorrentía superficial	0,03	0,00	1,11	5,00	20,61	29,06	25,23	27,17	30,46	18,73	2,45	0,03	159,90
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26	
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07	
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59	
Radiación solar extraterrestre (RMIM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00	
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00	
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67	
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20	
C1	0,52	0,36	0,27	0,28	0,64	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73	
C2	0,32	0,22	0,14	0,13	0,30	0,54	0,70	0,87	1,00	0,98	0,66	0,47	
Humedad inicial	426,83	380,74	347,79	325,72	326,25	391,44	468,63	504,01	540,99	568,75	564,50	488,16	
Humedad disponible	150,81	104,49	79,01	83,07	188,41	310,32	361,80	410,20	469,28	418,30	304,67	212,14	
Humedad final	380,74	347,79	325,72	326,25	391,44	468,63	504,01	540,99	568,75	564,50	488,16	426,83	
Evapotranspiración Real (ETPR)	46,32	32,95	29,54	33,08	73,23	117,94	134,04	145,46	143,23	130,05	92,76	61,56	1040,14
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,55	0,00	0,00	0,00	33,55

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 2.

Balance de suelos para muestra 2

Muestra	2	Clase textural	Franco arenosa	Kp (pendiente)	0,1	Profundidad de raíz	3000	Densidad aparente (g/cm3)	1,5				
Punto de Marchitez permanente (PMP)	270 mm	6 %	Kv (cobertura vegetal)	0,21	Coeficiente de infiltración	1	Infiltración	384					
Capacidad de campo (CC)	630 mm	14 %	Kfc (fracción que se infiltra)	0,8067	Coeficiente de follaje	0,2	Humedad inicial	630					
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
No. días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365,00
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	8,77	36,14	50,95	44,24	47,64	53,41	32,85	5,00	5,00	298,06
Precipitación efectiva (Pi)	0,26	0,00	8,58	35,09	144,57	203,81	176,95	190,55	213,64	131,39	18,87	0,26	1123,99
Escorrentía superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26	
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07	
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59	
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00	
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00	
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67	
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20	
C1	0,59	0,44	0,34	0,33	0,62	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	
C2	0,41	0,30	0,20	0,18	0,35	0,56	0,70	0,86	1,00	1,00	0,74	0,56	
Humedad inicial	482,67	427,47	385,28	353,90	347,77	417,41	503,35	545,94	591,57	630,00	630,00	551,50	
Humedad disponible	212,93	157,47	123,86	118,99	222,34	351,22	410,30	466,50	535,21	491,39	378,87	281,76	
Humedad final	427,47	385,28	353,90	347,77	417,41	503,35	545,94	591,57	630,00	630,00	551,50	482,67	
Evapotranspiración Real (ETPR)	55,46	42,19	39,96	41,22	74,93	117,87	134,36	144,93	143,23	131,28	97,37	69,09	1091,90
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,98	0,11	0,00	0,00	32,09

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 3. Balance de suelos para muestra 3

Muestra	3	Clase textural	Franco limoso	Kp (pendiente)			0,1	Profundidad de raíz			1300	Densidad aparente (g/cm3)		
Punto de Marchitez permanente (PMP)	198,77	mm	11 %	Kv (cobertura vegetal)			0,21	Coeficiente de infiltración			1	Infiltración		
Capacidad de campo (CC)	578,24	mm	32 %	Kfc (fracción que se infiltra)			0,7447	Coeficiente de follaje			0,12	Humedad inicial		
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total	
No. días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365,00	
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05	
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46	
Precipitación efectiva (Pi)	0,26	0,00	8,58	38,60	159,03	224,19	194,64	209,61	235,01	144,53	18,87	0,26	1233,59	
Escorrentía superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50	
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26		
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07		
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59		
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00		
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00		
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67		
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20		
C1	0,61	0,46	0,36	0,35	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,79		
C2	0,43	0,32	0,22	0,20	0,39	0,63	0,80	0,98	1,00	1,00	0,76	0,58		
Humedad inicial	428,76	371,59	327,24	293,32	287,52	366,22	465,45	517,96	573,32	578,24	578,24	499,00		
Humedad disponible	230,25	172,82	137,04	133,16	247,78	391,64	461,33	528,80	609,56	524,00	398,34	300,49		
Humedad final	371,59	327,24	293,32	287,52	366,22	465,45	517,96	573,32	578,24	578,24	499,00	428,76		
Evapotranspiración Real (ETPR)	57,43	44,36	42,49	44,41	80,33	124,96	142,14	154,25	143,23	131,28	98,11	70,50	1133,48	
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,85	13,25	0,00	0,00	100,11	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 4.

Balance de suelos para muestra 4

Muestra	4	Clase textural	Franco limoso	Kp (pendiente)	0,1	Profundidad de raíz	1300	Densidad aparente (g/cm3)	1,39				
Punto de Marchitez permanente (PMP)	198,77	mm	11 %	Kv (cobertura vegetal)	0,21	Coefficiente de infiltración	1	Infiltración	288				
Capacidad de campo (CC)	578,24	mm	32 %	Kfc (fracción que se infiltra)	0,7447	Coefficiente de follaje	0,12	Humedad inicial	578,24				
Descripción/mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
No. días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365,00
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46
Precipitación efectiva (Pi)	0,26	0,00	8,58	38,60	159,03	224,19	194,64	209,61	235,01	144,53	18,87	0,26	1233,59
Escorrentía superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26	
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07	
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59	
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00	
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00	
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67	
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20	
C1	0,61	0,46	0,36	0,35	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,79	
C2	0,43	0,32	0,22	0,20	0,39	0,63	0,80	0,98	1,00	1,00	0,76	0,58	
Humedad inicial	428,76	371,59	327,24	293,32	287,52	366,22	465,45	517,96	573,32	578,24	578,24	499,00	
Humedad disponible	230,25	172,82	137,04	133,16	247,78	391,64	461,33	528,80	609,56	524,00	398,34	300,49	
Humedad final	371,59	327,24	293,32	287,52	366,22	465,45	517,96	573,32	578,24	578,24	499,00	428,76	
Evapotranspiración Real (ETPR)	57,43	44,36	42,49	44,41	80,33	124,96	142,14	154,25	143,23	131,28	98,11	70,50	1133,48
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,85	13,25	0,00	0,00	100,11

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 5. Balance de suelos para muestra 5

Muestra	5	Clase textural	Franco arcillosa		Kp (pendiente)		0,1	Profundidad de raíz		1300	Densidad aparente (g/cm3)		1,35		
Punto de Marchitez permanente (PMP)	228,15	mm	13 %		Kv (cobertura vegetal)		0,1	Coeficiente de infiltración		0,836	Infiltración		180		
Capacidad de campo (CC)	508,95	mm	29 %		Kfc (fracción que se infiltra)		0,6358	Coeficiente de follaje		0,12	Humedad inicial		508,95		
Descripción/mes			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
No. días			31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365,00
Precipitación mensual			5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05
Retención de lluvia			5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46
Precipitación efectiva (Pi)			0,22	0,00	7,17	32,26	132,92	187,38	162,68	175,19	196,42	120,80	15,77	0,22	1031,03
Escorrentía superficial			0,04	0,00	1,41	6,34	26,11	36,81	31,96	34,42	38,59	23,73	3,10	0,04	202,56
Evapotranspiración Potencial (ETP)			110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50
Temperatura media mensual [°C]			24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26	
Temperatura media mensual [°F]			75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07	
Radiación solar incidente RSM			194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59	
Radiación solar extraterrestre (RMM)			378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00	
Brillo solar (RS)			12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00	
Brillo solar (S) %			47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67	
Número de horas de brillo (N)			11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20	
C1			0,49	0,34	0,25	0,27	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	
C2			0,30	0,20	0,12	0,12	0,29	0,50	0,65	0,82	1,00	0,96	0,63	0,45	
Humedad inicial			366,61	322,89	292,09	271,95	273,16	335,13	407,22	439,21	472,75	508,95	500,92	425,61	
Humedad disponible			138,68	94,74	71,11	76,06	177,93	294,36	341,75	386,25	441,02	401,60	288,54	197,67	
Humedad final			322,89	292,09	271,95	273,16	335,13	407,22	439,21	472,75	508,95	500,92	425,61	366,61	
Evapotranspiración Real (ETPR)			43,93	30,80	27,31	31,05	70,96	115,29	130,69	141,65	143,23	128,83	91,08	59,22	1014,04
Recarga hídrica potencial			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,99	0,00	0,00	0,00	16,99

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 6.

Balance de suelos para muestra 6

Muestra	6	Clase textural	Franco arcillo limoso	Kp (pendiente)		0,1128		Profundidad de raíz				3000		Densidad aparente (g/cm3)		1,2
Punto de Marchitez permanente (PMP)	648	mm	18 %	Kv (cobertura vegetal)	Kfc (fracción que se infiltra)	0,2	Coeficiente de infiltración		0,948599		Infiltración		204			
							Coeficiente de follaje		0,6358		Humedad inicial		1368			
Capacidad de campo (CC)	1368	mm	38 %													
Descripción/mes																
No. días	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.		May.	Jun.	Jul.	Agó.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total		
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05			
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46			
Precipitación efectiva (Pi)	0,25	0,00	8,14	36,62	150,86	212,67	184,64	198,83	222,93	137,10	17,90	0,25	1170,18			
Escorrentía superficial	0,01	0,00	0,44	1,98	8,17	11,52	10,00	10,77	12,08	7,43	0,97	0,01	63,41			
Evapotranspiración potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50			
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26				
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07				
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59				
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00				
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00				
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67				
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20				
C1	0,76	0,66	0,57	0,52	0,62	0,80	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88				
C2	0,65	0,55	0,45	0,40	0,49	0,63	0,71	0,79	0,92	1,00	0,87	0,75				
Humedad inicial	1197,46	1119,61	1050,44	983,96	946,78	1011,53	1114,40	1171,86	1231,68	1368,00	1368,00	1281,39				
Humedad disponible	549,71	471,61	410,58	372,57	449,64	576,19	651,04	722,69	806,61	857,10	737,90	633,64				
Humedad final	1119,61	1050,44	983,96	946,78	1011,53	1114,40	1171,86	1231,68	1317,01	1368,00	1281,39	1197,46				
Evapotranspiración Real (ETPR)	78,11	69,17	74,62	73,79	86,11	109,79	127,18	139,01	137,60	131,28	104,51	84,18	1215,35			
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,82	0,00	5,82	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 7. Balance de suelos para muestra 7

Muestra	7	Clase textural	Arcilla	Kp (pendiente)			0,1	Profundidad de raíz			1100	Densidad aparente (g/cm3)			1,25
Punto de Marchitez permanente (PMP)	233,75	mm	17 %	Kv (cobertura vegetal)			0,15	Coeficiente de infiltración			0,81038	Infiltración			132
Capacidad de campo (CC)	481,25	mm	35 %	Kfc (fracción que se infiltra)			0,56038	Coeficiente de follaje			0,12	Humedad inicial			481,25
Descripción/mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total		
No. días	31	28	31	30	31	31	31	31	30	31	30	31	365,00		
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05		
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46		
Precipitación efectiva (Pi)	0,21	0,00	6,95	31,28	128,88	181,68	157,74	169,86	190,44	117,13	15,29	0,21	999,68		
Escorrentía superficial	0,05	0,00	1,63	7,32	30,16	42,51	36,91	39,75	44,56	27,41	3,58	0,05	233,91		
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50		
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26			
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07			
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59			
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00			
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00			
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67			
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20			
C1	0,45	0,29	0,22	0,25	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,67			
C2	0,25	0,16	0,09	0,09	0,25	0,49	0,65	0,82	1,00	0,94	0,57	0,39			
Humedad inicial	344,33	306,04	280,29	265,03	268,90	327,35	394,49	422,01	450,46	481,25	470,85	398,49			
Humedad disponible	110,79	72,29	53,50	62,57	164,03	275,28	318,47	358,12	407,15	364,63	252,39	164,95			
Humedad final	306,04	280,29	265,03	268,90	327,35	394,49	422,01	450,46	481,25	470,85	398,49	344,33			
Evapotranspiración Real (ETPR)	38,51	25,74	22,21	27,42	70,42	114,55	130,21	141,41	143,23	127,53	87,65	54,37	983,25		
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,42	0,00	0,00	0,00	16,42		

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 8.

Balance de suelos para muestra 8

Muestra	8	Clase textural	Franco		Kp (pendiente)		0,06	Profundidad de raíz			3000	Densidad aparente (g/cm3)		1,4
Punto de Marchitez permanente (PMP)	420	mm	10	%	Kv (cobertura vegetal)		0,2	Coeficiente de infiltración			1	Infiltración		360
Capacidad de campo (CC)	924	mm	22	%	Kfc (fracción que se infiltra)		0,79315	Coeficiente de follaje			0,12	Humedad inicial		924
Descripción/mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total	
No. días	31	28	31	30	31	31	30	31	31	30	31	30	365,00	
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05	
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46	
Precipitación efectiva (Pi)	0,26	0,00	8,58	38,60	159,03	224,19	194,64	209,61	235,01	144,53	18,87	0,26	1233,59	
Escorrentía superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Evapotranspiración Potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50	
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26		
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07		
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59		
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00		
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00		
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67		
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20		
C1	0,68	0,55	0,46	0,42	0,62	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84		
C2	0,53	0,42	0,32	0,29	0,43	0,63	0,74	0,89	1,00	1,00	0,82	0,67		
Humedad inicial	764,26	697,09	641,19	592,99	574,94	652,49	758,73	815,55	878,03	924,00	924,00	841,38		
Humedad disponible	344,53	277,09	229,77	211,59	313,97	456,69	533,38	605,15	693,03	648,53	522,87	421,64		
Humedad final	697,09	641,19	592,99	574,94	652,49	758,73	815,55	878,03	924,00	924,00	841,38	764,26		
Evapotranspiración Real (ETPR)	67,43	55,90	56,78	56,65	81,48	117,96	137,83	147,13	143,23	131,28	101,49	77,38	1174,54	
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,80	13,25	0,00	0,00	59,05	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 9. Balance de suelos para muestra 9

Muestra	9	Clase textural	Franco arcillo arenoso			Kp (pendiente)		0,06	Profundidad de raíz			1300	Densidad aparente (g/cm3)		1,3
Punto de Marchitez permanente (PMP)	253,5	mm	15	%		Kv (cobertura vegetal)	0,21		Coeficiente de infiltración			0,905799	Infiltración		180
Capacidad de campo (CC)	490,1	mm	29	%		Kfc (fracción que se infiltra)	0,6358		Coeficiente de follaje			0,12	Humedad inicial		490,1
Descripción/mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total		
No. días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	365,00	
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05		
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46		
Precipitación efectiva (Pi)	0,24	0,00	7,77	34,97	144,05	203,07	176,31	189,86	212,87	130,92	17,09	0,23	1117,38		
Escorrentía superficial	0,02	0,00	0,81	3,64	14,98	21,12	18,34	19,75	22,14	13,62	1,78	0,02	116,21		
Evapotranspiración potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50		
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26			
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07			
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59			
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00			
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00			
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67			
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20			
C1	0,46	0,29	0,22	0,27	0,76	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70			
C2	0,24	0,15	0,08	0,09	0,26	0,63	0,83	1,00	1,00	1,00	0,60	0,39			
Humedad inicial	361,97	323,21	297,60	283,28	289,22	354,22	431,75	463,44	490,10	490,10	490,10	417,77			
Humedad disponible	108,71	69,71	51,87	64,74	179,77	303,79	354,56	399,80	449,47	367,52	253,69	164,50			
Humedad final	323,21	297,60	283,28	289,22	354,22	431,75	463,44	490,10	490,10	489,84	417,77	361,97			
Evapotranspiración Real (ETPR)	39,00	25,61	22,10	29,02	79,05	125,54	144,62	155,51	143,23	131,18	89,42	56,03	1040,32		
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,69	69,64	0,00	0,00	0,00	77,32		

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 10.

Balance de suelos para muestra 10

Muestra	10	Clase textural	Franco arcilloso			Kp (pendiente)			0,1	Profundidad de raíz			1100	Densidad aparente (g/cm3)			1,35
Punto de Marchitez permanente (PMP)	193,05	mm	13 %			Kv (cobertura vegetal)			0,21	Coeficiente de infiltración			0,945799	Infiltración			180
Capacidad de campo (CC)	430,65	mm	29 %			Kfc (fracción que se infiltra)			0,6358	Coeficiente de follaje			0,12	Humedad inicial			430,65
Descripción/mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total				
No. días	31	28	31	30	31	31	31	31	31	30	31	31	365,00				
Precipitación mensual	5,26	4,06	13,58	43,87	180,72	254,76	221,19	238,19	267,05	164,24	23,87	5,26	1422,05				
Retención de lluvia	5,00	4,06	5,00	5,26	21,69	30,57	26,54	28,58	32,05	19,71	5,00	5,00	188,46				
Precipitación efectiva (Pi)	0,25	0,00	8,11	36,51	150,41	212,04	184,09	198,25	222,27	136,70	17,85	0,24	1166,73				
Escorrentía superficial	0,01	0,00	0,46	2,09	8,62	12,15	10,55	11,36	12,74	7,83	1,02	0,01	66,86				
Evapotranspiración potencial (ETP)	110,83	114,74	145,58	160,49	154,46	153,57	157,99	155,51	143,23	131,28	111,80	103,02	1642,50				
Temperatura media mensual [°C]	24,40	25,03	26,24	28,85	27,15	25,98	25,95	25,78	26,02	24,53	23,94	22,26					
Temperatura media mensual [°F]	75,93	77,05	79,24	83,94	80,86	78,76	78,71	78,40	78,84	76,15	75,10	72,07					
Radiación solar incidente RSM	194,63	198,56	244,96	254,94	254,69	259,98	267,62	264,49	242,23	229,87	198,49	190,59					
Radiación solar extraterrestre (RMM)	378,20	380,80	461,90	471,00	465,00	471,00	486,70	486,70	453,00	437,10	384,00	372,00					
Brillo solar (RS)	12,20	13,60	14,90	15,70	15,00	15,70	15,70	15,70	15,10	14,10	12,80	12,00					
Brillo solar (S) %	47,08	48,33	50,00	52,08	53,33	54,17	53,75	52,50	50,83	49,17	47,50	46,67					
Número de horas de brillo (N)	11,30	11,60	12,00	12,50	12,80	13,00	12,90	12,60	12,20	11,80	11,40	11,20					
C1	0,46	0,30	0,22	0,28	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70					
C2	0,25	0,15	0,09	0,09	0,28	0,69	0,90	1,00	1,00	1,00	0,60	0,40					
Humedad inicial	302,68	263,63	237,77	223,43	230,02	298,21	380,58	414,66	430,65	430,65	430,65	358,80					
Humedad disponible	109,88	70,58	52,84	66,89	187,38	317,20	371,63	419,85	459,87	374,30	255,45	166,00					
Humedad final	263,63	237,77	223,43	230,02	298,21	380,58	414,66	430,65	430,65	430,65	358,80	302,68					
Evapotranspiración Real (ETPR)	39,30	25,85	22,46	29,92	82,22	129,67	150,02	155,51	143,23	131,28	89,69	56,37	1055,53				
Recarga hídrica potencial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,74	79,04	5,42	0,00	0,00	111,19				

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

ANEXOS

Anexo 1. Duración máxima de horas diarias de brillo solar para diferentes meses y latitudes

Latitud	Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	10	11,6	11,8	12	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
	15	11,3	11,6	12	12,5	12,8	13	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
	20	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,8	11,7	11,2	10,9

Fuente: OROZCO, Eugenio; PADILLA, Tomás; SALGUERO, Mario. *Manual técnico para la determinación de las áreas potenciales de recarga hídrica*. p. 67.

Anexo 2. Radiación solar (mm/día)

Latitud	Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	10	12	12,8	15	15,7	15,7	15,5	15,5	15,6	15,2	14,4	13,3	12,5
	15	14	12,4	15	15,7	15	15,7	15,9	15,7	15,1	14,1	12,8	12
	20	16	12	15	15,6	16	15,9	15,9	15,7	15	13,6	12,4	11,6

Fuente: OROZCO, Eugenio; PADILLA, Tomás; SALGUERO, Mario. *Manual técnico para la determinación de las áreas potenciales de recarga hídrica*. p. 67.

