

Zonificación de recarga en agua subterránea para su protección en la microcuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

Groundwater recharge zoning for its protection in the Aguas Calientes micro-basin, Madriz, Nicaragua

Raquel Dolores Izabá Ruiz

César Jarquín Aguirre Jiménez

Luis Rodolfo Tercero Montenegro

Correspondencia:
raquel.izaba@ci.una.edu.ni
Profesor Asistente. Universidad
Nacional Agraria, Nicaragua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2884-1189>

aguirrejoaq@outlook.com
Profesor Titular en retiro.
Universidad Nacional Agraria,
Nicaragua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-6627>

terceromontenegro@gmail.com
Estudiante de Maestría Manejo
Integral del Suelo en Ambientes
Tropicales. Universidad Nacional
Agraria, Nicaragua.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2956-7241>

DOI: <https://doi.org/10.63042/7datct48>

Fecha de recepción:
20-diciembre-2024

Fecha de aceptación:
28-enero-2025

Resumen

El estudio se centró en la microcuenca Aguas Calientes, en Nicaragua, con el objetivo de identificar y delimitar las zonas de recarga de agua subterránea. Esto es crucial debido a que el 80% de la población nicaragüense depende de este recurso para consumo humano y actividades agrícolas. A través de un inventario de pozos, mediciones de niveles estáticos y análisis de uso del suelo, se determinó la capacidad de infiltración del suelo y se calculó la recarga potencial utilizando el Balance Hídrico del Suelo. Con esta información y datos geológicos, se elaboró un mapa de zonas de recarga, el cual reveló que el 57% del área presenta una recarga media, el 25% una recarga alta y el 18% una recarga baja. Los resultados sugieren que el cambio de uso del suelo, especialmente la conversión de bosques en cultivos o pastos, ha disminuido la capacidad de infiltración y, por ende, la recarga en ciertas áreas. Basándose en el mapa de zonas de recarga, se propusieron dos tipos de zonas de protección: 1) zonas de producción hídrica: áreas alrededor de nacientes de ríos con baja recarga y cantidad del agua; y 2) zonas de aprovechamiento: áreas donde se ubican los pozos, que se requieren medidas de protección para evitar la contaminación. En conclusión, este estudio proporciona información valiosa para desarrollar estrategias de gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos en la microcuenca Aguas Calientes, contribuyendo así a asegurar la disponibilidad de agua para la población.

Palabras clave: abastecimiento, agua subterránea, balance hídrico de suelo, consumo humano, protección de zonas de recarga.

Derechos de autor 2025 Los autores conservan el copyright de sus artículos publicados en Regiones y Desarrollo Sustentable, los cuales se distribuyen bajo la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Esto permite su uso, distribución y adaptación siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor original y se indique que el artículo fue publicado por primera vez en Regiones y Desarrollo Sustentable. Nuestra política cumple con los estándares del Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ), promoviendo el acceso abierto y derechos de uso claros.

Abstract

The study focused on the Aguas Calientes micro-basin in Nicaragua, with the aim of identifying and delimiting groundwater recharge zones. This is crucial because 80% of the Nicaraguan population depends on this resource for human consumption and agricultural activities. Through an inventory of wells, static level measurements and land use analysis, the soil infiltration capacity was determined, and the potential recharge was calculated using the Soil Water Balance. With this information and geological data, a recharge zone map was created, which revealed that 57% of the area has a medium recharge, 25% a high recharge and 18% a low recharge. The results suggest that the change in land use, especially the conversion of forests into crops or pastures, has decreased the infiltration capacity and, therefore, the recharge in certain areas. Based on the recharge zone map, two types of protection zones were proposed: water production zones: Areas around river sources with low recharge and water quantity; and water use zones: Areas where wells are located, which require protection measures to prevent contamination. In conclusion, this study provides valuable information to develop management and protection strategies for groundwater resources in the Aguas Calientes micro-basin, thus contributing to ensuring the availability of water for the population.

Keywords: supply, groundwater, soil water balance, human consumption, protection of recharge zones.

Introducción

El agua subterránea es un recurso hídrico importante en Nicaragua. El 80% de la población se abastece del recurso, utilizado principalmente para consumo humano y actividades agropecuarias; por lo cual, la recarga de agua subterránea es fundamental en la disponibilidad hídrica del país (Vega et al., 2019).

El efecto del cambio climático ha incrementado las temperaturas globales, generando cambios significativos en los regímenes de precipitación, principalmente por el aumento en la intensidad y frecuencia de lluvias extremas, así como sequías prolongadas (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2018).

El Corredor Seco de Nicaragua se encuentra en la región noroeste del país, abarcando 33 de los 153 municipios ubicados en la zona del Pacífico. Se caracteriza por su baja precipitación anual, llegando incluso a niveles tan bajos como 800 mm. Este fenómeno es acentuado durante el evento climático de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que provoca una disminución significativa de las precipitaciones entre 30%-40% (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARENA], Autoridad Nacional del Agua [ANA], & Global Water Partnership Centroamérica [GWP], 2022). Estos cambios climáticos tienen un impacto significativo en la disponibilidad de agua en la región, afectando la recarga de los acuíferos locales.

Sumado a la problemática climática, el cambio del uso de los suelos de vocación forestal a uso agropecuario en pendientes escarpadas es otro factor que ha contribuido a reducir la recarga de agua subterránea y menor disponibilidad del recurso hídrico (Graterol et al., 2019).

El presente estudio se realizó en la microcuenca de Aguas Calientes, ubicada en la parte suroeste del municipio de Somoto, Madriz, que forma parte del corredor seco de Nicaragua. Los pobladores de las comunidades asentadas en la zona de interés, se abastecen de agua mediante pozos excavados y perforados. Los niveles estáticos en los pozos se encuentran entre 0.28 y 28.9 m en pozos excavados, y hasta 63.8 m en los perforados. En algunos casos se encontraron pozos secos, condición que trae como consecuencia un consumo de agua deficiente en las viviendas, que es de 100 litros/día. Según la Organización Mundial de la Salud (ONU, 2010), el consumo de agua por persona al día para cubrir sus necesidades básicas son necesarias entre 50-100 litros; es decir, la población de esta zona tiene poca disponibilidad de agua.

En este contexto, bajo la línea de extensión universitaria y en el marco de convenio de colaboración entre la Universidad Nacional Agraria (UNA) y la Agencia Católica Irlandesa para el Desarrollo (Trocaire), ejecutó el proyecto “Fortalecimiento de capacidades de entidades socias Trocaire para el desarrollo de medios de vida sostenibles y recipientes”, en el cual se tomó la iniciativa de realizar el estudio para la identificación de las zonas de recarga, con el objetivo de generar información que contribuya a desarrollar estrategias de protección, tanto en las zonas de recarga como en las fuentes de agua para consumo humano, que aseguren la sostenibilidad de estas fuentes que abastecen a la población en el área de intervención.

Marco conceptual

La recarga de agua subterránea se define como el proceso por el cual el agua fluye hacia abajo hasta alcanzar el nivel estático en el acuífero, contribuyendo así al almacenamiento de agua subterránea (Healy y Scanlon, 2010).

Existen dos formas principales en las que puede presentarse la recarga del agua subterránea: local y difusa. La recarga local se refiere al drenaje directo desde un cuerpo de agua superficial, como un lago, río o canal. Por otro lado, la recarga difusa se refiere al agua que drena después de los procesos de infiltración desde la superficie del suelo, así como la evapotranspiración. En otras palabras, es el agua que se mueve en la zona no saturada hasta que llega al nivel freático o zona saturada (Healy y Scanlon, 2010; Hiscoch, 2005; Fetter, 2004).

La recarga de agua subterránea se encuentra condicionada por factores como: clima, suelo y geología; uso del suelo y topografía. La variabilidad climática es un factor importante que influye en la recarga de agua subterránea, esencialmente el comportamiento de las precipitaciones, como frecuencia, duración e intensidad, debido a que esta es la principal fuente natural directa de recarga (Healy y Scanlon, 2010).

El suelo y las características geológicas son factores fundamentales de los procesos de recarga; dado que el primero facilita la infiltración del agua, es más probable que exista recarga en suelo porosidad gruesa, que en suelos con porosidad fina (Healy y Scanlon, 2010). El movimiento del agua en el estrato del suelo o zona no saturada, está condicionado por ciertas características hidrofísicas como: textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, que definirán el agua disponible hasta llegar a la zona saturada o acuífero (Izabá y Cruz, 2022). Una vez en el acuífero, las condiciones geológicas

indican la capacidad de la roca que fluya y que se almacene el agua en el mismo (Healy y Scanlon, 2010; Hiscock, 2005).

Otros factores esenciales en el proceso de recarga están vinculados con la cobertura vegetal y el uso del suelo. Los tipos y densidades de vegetación influyen en los patrones de evapotranspiración (Healy y Scanlon, 2010); a pesar de ello, un suelo desprovisto de vegetación no garantiza la recarga de agua subterránea, estos tienden a compactarse y erosionarse, reduciendo la capacidad de infiltración, por ejemplo, el cambio de uso de suelo de bosques a cultivos (Izabá y Cruz, 2022). Asimismo, la topografía es otro factor clave en el proceso de recarga, pues una pendiente pronunciada limita significativamente la infiltración del agua y tiende a generar altas tasa de escorrentía; en comparación con las pendientes planas que favorecen la infiltración, lo que resulta en una disminución de la escorrentía (Healy y Scanlon, 2010).

Existen varias metodologías para la determinación de la recarga, esto depende en gran medida, según menciona Islam et al. (2015): “La selección de las metodologías depende de los datos disponibles, ubicación geográfica, condiciones topográficas y la viabilidad de los resultados obtenidos” (p. 6). Por otro lado, Barua et al. (2020) asevera: “Comprender qué métodos son adecuados para determinar la recarga, es fundamental para entender los efectos de los sucesivos cambios en el uso del suelo en la recarga de aguas subterráneas” (pp 4).

Para mencionar alguno de los métodos, el método del Balance Hídrico del Suelo (BHS), propuesto por Schosinsky (2006), es una metodología aplicada a la determinación de la recarga de los acuíferos de Costa Rica. Dentro de algunas ventajas, existen muchas variables que influyen en la recarga como: precipitación, retención del follaje, infiltración del suelo, cobertura vegetal, evapotranspiración, profundidad de las raíces, uso del suelo y pendiente del terreno (Schosinsky, 2006). Otra ventaja es la integración con el sistema de información geográfica (SIG); es decir, la aplicación de este balance hídrico se beneficia del uso de SIG, lo que permite una mejor cuantificación y modelado de las aguas subterráneas. “La inclusión de métodos de interpolación espacial y álgebra de mapas en el sistema de información geográfica permite una representación más precisa de las zonas de recarga acuífera potencial” (Ramírez, 2013).

En Centroamérica, se han realizado diversas investigaciones aplicando el BHS de Schosinsky (2006). Este método es ampliamente utilizado en la región y son de uso obligatorio en Costa Rica (Alvarado y Barahona-Palomo, 2017; Sánchez, 2021). Dentro de los estudios identificados en la región centroamericana se encontraron específicamente el

estudio realizado por Alvarado y Barahona-Palomo (2017) en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador, donde se compararon tres métodos de infiltración (Doble anillo, Porchet y Permeámetro de Guelph) para calcular el balance hídrico del suelo en esta cuenca. Los valores obtenidos se utilizaron para determinar la recarga potencial al acuífero.

También, la metodología fue utilizada por Sánchez (2021) en la Cuenca alta y media del Río Zapote, Alajuela, Costa Rica, donde se aplicó la metodología del BHS con el fin de generar información técnica base para la elaboración de instrumentos dirigidos a la gestión integral de la cuenca, como insumo técnico base para la gestión integral de esta cuenca, también se identificaron los principales usuarios vinculados al uso del agua.

En Nicaragua, se identificó el estudio realizado por Herrera y Moreno (2023) en las microcuencas Yakalwás y Los Bravos, Nicaragua. Se evaluó la incidencia del uso de suelo en el Balance Hídrico de Suelo propuesto por Schosinsky. El objetivo era brindar pautas de ordenamiento territorial. Asimismo, se identificó el estudio realizado por Morales (2021), donde se aplicó en BHS para determinar la recarga potencial con el fin de estimar la disponibilidad del agua subterránea para su uso en riego y comprender mejor las condiciones del recurso hídrico y su potencial para la agricultura.

Por otra parte, se considera que la recarga hídrica “es el proceso de incorporación de agua a los acuíferos. El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga” (Matus et al 2009).

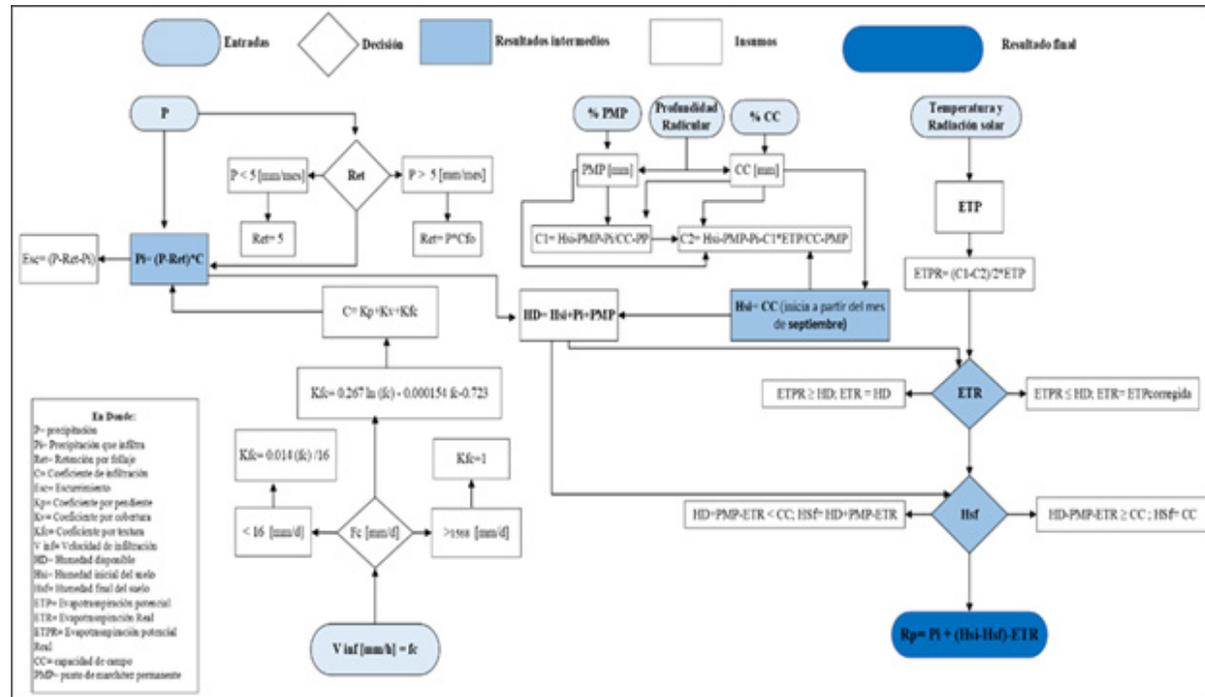
Métodos

Área de estudio

La presente investigación se realizó en la microcuenca Aguas Calientes, ubicada en los municipios de Somoto y San Lucas (departamento de Madriz), Nicaragua; en las coordenadas 541066 E y 1491866 N, con un área de 47.4 km². La precipitación media anual oscila entre 975 y 1,200 mm, con temperaturas en la época seca entre 22.5 y 25.2 °C (ver Figura 1). La geología presente en la microcuenca Aguas Calientes pertenece a las formaciones geológicas Grupo Coyol Superior e Inferior, y a la Formación Matagalpa (Fenzl, 1989).

Figura 2

Metodología BHS según Schosinsky (2006)



Fuente: Herrera y Moreno (2022).

Donde:

- P: precipitación
- Pi: precipitación que infiltra
- Ret: Retención por Follaje
- C: Coeficiente de infiltración
- ESC: escurrimiento
- Kp: Coeficiente por pendiente
- Kv: coeficiente por cobertura
- Kfc: Coeficiente por textura
- Vinf: velocidad de infiltración
- HD: Humedad Disponible
- HSi: Humedad inicial del suelo
- HSF: Humedad final del suelo
- ETP: Evapotranspiración Real
- ETR: Evapotranspiración Real

ETPR: Evapotranspiración Potencial Real

CC: Capacidad de Campo

PMP: Punto de Marchitez Permanente

Da: Densidad Aparente

Los datos de precipitación y temperatura para alimentar al método se obtuvieron de la plataforma de datos climáticos globalclimatemonitor.org, con un periodo de registro del 2007 al 2019. Los datos de precipitación entraron directo al método; mientras que los datos de temperatura se utilizaron para la determinación de la Evapotranspiración Potencial, aplicando el método de Thornthwaite (Montaner y Sánchez-Almohalla, 1988).

La velocidad de infiltración (f_c), se obtuvo de las pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio. En total se realizaron 26 pruebas con el método del anillo simple, implementado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2001) distribuidas por tipo de uso del suelo (ver Tabla 1).

Los valores de entrada al método para textura son: Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Densidad Aparente (Da), y se utilizaron de referencia valores propuesto por Schosinsky (2006) (ver Tabla 2).

Tabla 1*Coordenadas de pruebas de infiltración por cobertura o uso del suelo en la microcuenca**Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua*

N°	X	Y	Cobertura/uso
Prueba #1	540857	1490258	Bosque secundario
Prueba #2	540777	1490324	Bosque secundario
Prueba #3	540263	1489758	Cultivo de frijol
Prueba #4	540326	1489803	Cultivo de sorgo
Prueba #5	540271	1489565	Pasto
Prueba #6	540406	1488352	Cultivo de sorgo
Prueba #7	541034	1486984	Bosque secundario
Prueba #8	540741	1487537	Bosque secundario
Prueba #9	540939	1487406	Cultivo
Prueba #10	548836	1485365	Pasto
Prueba #11	548726	1484947	Café bajo sombra
Prueba #12	548681	1484671	Café bajo sombra
Prueba #13	547364	1485589	Maíz
Prueba #14	547454	1485661	Pasto
Prueba #15	546728	1487141	Agro forestal
Prueba #16	545498	1486117	Barbecho
Prueba #17	545341	1486052	Café bajo sombra
Prueba #18	545317	1486043	Maíz
Prueba #19	544318	1485944	Barbecho
Prueba #20	543257	1485080	Café bajo sombra
Prueba #21	543181	1485109	Barbecho
Prueba #22	543242	1485133	Maíz
Prueba #23	543975	1487054	Bosque secundario
Prueba #24	543644	1486929	Pasto
Prueba #25	543197	1487563	Bosque secundario
Prueba #26	543620	1486935	Maíz

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2

Características hidrofísicas por textura de suelo

Textura del suelo	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP %	CC %	Da (g/cm ³)
Arenoso	2 - 6	6 - 12	1.55 - 1.80
Arenoso	2 - 6	6 - 12	1.55 - 1.80
Franco-arenosos	4 - 8	10 - 18	1.40 - 1.60
Franco	8 - 12	18 - 26	1.35 - 1.50
Franco-arcillosos	11 - 15	23 - 31	1.30 - 1.40
Arcillo-arenosos	13 - 17	27 - 31	1.25 - 1.35
Arcillosos	15 - 19	31 - 39	1.20 - 1.30

Fuente: Schosinsky y Losilla (2000).

Se utilizó la hoja Excel del BHS donde se expresan las fórmulas y condiciones para realizar los cálculos de la recarga potencial en mm/anuales. Es fundamental señalar que la estimación de recarga potencial se calculó individualmente para cada ubicación, donde se llevó a cabo la prueba de infiltración. En el Anexo 1, se expresa el procedimiento del cálculo del BHS con las fórmulas aplicadas en la hoja de cálculos.

Zonificación de las áreas de recarga

Una vez determinada la recarga potencial de los 26 puntos georreferenciados a partir de las pruebas de infiltración, se realizó una clasificación de la misma, considerando los criterios establecidos en la Tabla 3, donde se contempla la recarga a partir del porcentaje de precipitación ocurrida en la cuenca hidrográfica.

Tabla 3

Clasificación de la recarga potencial a partir del porcentaje de precipitación

Clasificación de la recarga	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Recarga potencial	45-50 % P	30-35 % P	10-20 % P	5-10 % P	< 5 % P

Fuente: FAO (1967).

Las zonas de recarga se definieron con cuatro parámetros: la recarga potencial, geología, uso del suelo y pendiente. La información sobre geología, pendiente y uso del suelo fue adaptada a partir de la base cartográfica del Instituto Nicaragüense de Estudio Territoriales (INETER), donde se utilizaron los Ráster del Modelo Digital de Elevación (MDE) para la pendiente; datos vectoriales del mapa de uso del suelo INETER (2015) y en la geología, datos vectoriales del mapa geológico de Nicaragua elaborado por Catastro e Inventario de Recursos Naturales INETER (1972); clasificando cada una de los parámetros de acuerdo a la información de la Tabla 4. En el Anexo 2, se detallan los criterios a considerar.

Tabla 4

Clasificación de la zona de recarga en cada parámetro físico de la microcuenca

Parámetros	Descripción	Ponderación
Recarga potencial (mm/añual)	161 – 201:	1: Recarga baja
	202 – 226:	2: Recarga media
	> 226:	3 Recarga alta
Geología	Ignimbritas y dacitas:	1: Recarga baja
	Basaltos, andesitas y toba: Material coluvial y terrazas	2: Recarga media 3 : Recarga alta
Uso del suelo	Pastos y suelo sin vegetación:	1: Recarga baja
	Cultivos anuales y suelos en reposos.	2: Recarga media
	Bosque, vegetación arbustiva y cultivo permanente:	3, Recarga alta.
Pendiente	> 24:	> 24:
	12 - 24:	12 - 24:
	0 - 12:	0 - 12:

Fuente: elaboración propia.

En la elaboración de la cartografía de recarga, la capa de recarga potencial se creó a partir de la interpolación de los valores obtenidos en el BHS, utilizando la herramienta geoestadística Empirical Bayesian Kriging, la cual, a través de probabilidad de subconjuntos de datos tomados en campo, determina la predicción probabilística de las áreas no muestreadas.

La cartografía de los cuatro parámetros ponderados con los valores de la Tabla 4, se transformaron a formato ráster y se integraron con la herramienta Weighted Sum en el ArcGIS Pro (ID 8813694989), donde se interceptaron los ráster mencionados para obtener el ráster de zonas de recarga.

A partir del mapa de zonas de recarga, se determinaron las zonas de protección de las áreas de recarga y fuentes de agua; se tomaron como referencia para definir los criterios de la zonificación la guía de análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2013) y la legislación nicaragüense vinculada con la protección de los recursos hídricos. En la Tabla 5 se presentan las zonas y los criterios que se evaluaron.

Tabla 5

Criterios para la zonificación de áreas de protección de las áreas de recarga

Zonas	Criterios
Zona I (Zona de producción hídrica)	Parte alta de la cuenca con pendiente > 35 % Naciente de los ríos Zona de recarga potencial baja
Zona II (Zona de aprovechamiento)	Zona donde se ubican el mayor número de fuentes de agua.

Fuente: elaboración propia.

En el Anexo 3, se detalla la legislación nicaragüense, enfocada a la protección de los recursos hídricos. La fuente de agua principal está representada por los pozos identificados en el inventario de pozos, levantado durante la etapa de campo, con el fin de ubicarlos dentro de las áreas de protección. De los pozos se recopilaban las coordenadas, tipo de pozos, nombre de la comunidad, nivel estático y uso del agua. Los niveles estáticos del agua se midieron con un Medidor de nivel de agua Solinst modelo 101 de 300 pies.

Resultados y discusión

Geología

De acuerdo con el mapa geológico de Nicaragua INETER (1972) está dividida en estas, e incluyen aglomerado y andesita con un 62%, roca indiferenciada con un 12%, material coluvial y terraza con 11%, ignimbritas, dacitas y tobas con 9%, basaltos y andesitas con 7% del área. De acuerdo con la geología, la característica hidrogeológica que más destaca es la presencia en mayor extensión de acuíferos fracturados, acuífero con flujos de descarga en

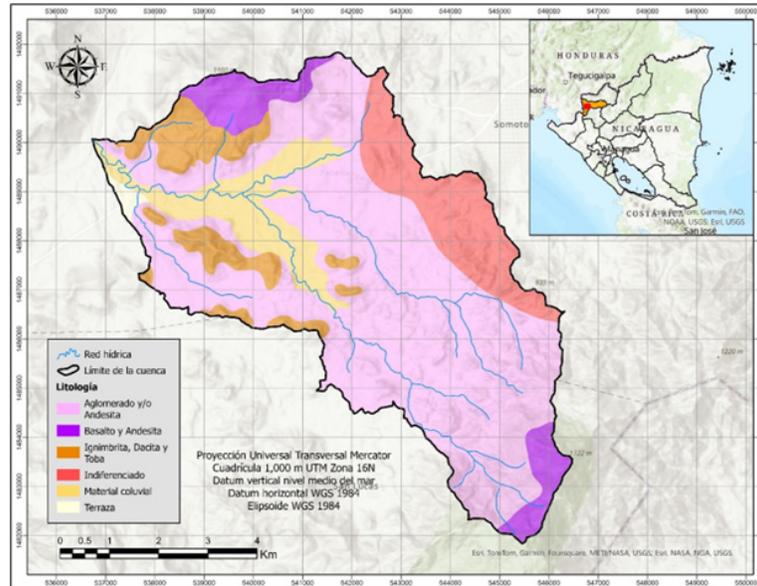
pequeños manantiales y permeabilidad de baja a media INETER (2004). Solo una pequeña extensión del área de estudio está representada por acuífero poroso, en áreas cercanas a la red hídrica, indicando formación de un pequeño acuífero local (ver Figura 3).

Uso del suelo

De acuerdo con el Mapa de Uso del Suelo de Nicaragua (2015), el uso del suelo predominante en la microcuenca está representado por pasto (44%), vegetación arbustiva (25%), cultivos anuales (19%) principalmente de granos básicos (ver Figura 4). Las áreas boscosas solamente comprenden el 7% del área, representadas principalmente por áreas de bosque secundario a las orillas de los ríos y de bosque latifoliados en las partes altas, y aquellas asociadas con el cultivo del café con árboles, que representa el 3% del área. El 2% restante corresponde a tacotal y centros poblados. Se puede observar que los usos de suelo predominantes son pasto y cultivos anuales; esto influye en la recarga en agua subterránea, puesto que en estos tipos de uso del suelo se presentaron tasas de infiltración baja (7-17 cm/h).

Figura 3

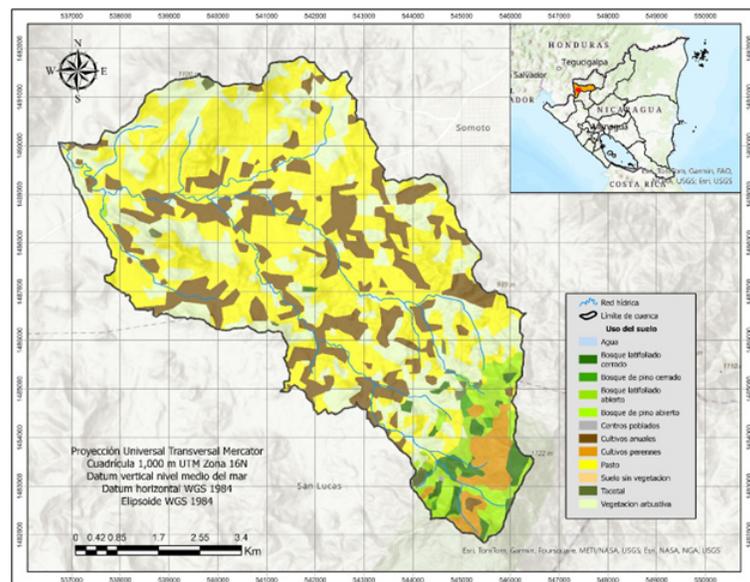
Mapa geológico de la microcuenca Aguas Calientes, Madriz Nicaragua



Fuente: elaboración propia, a partir del mapa geológico de Nicaragua elaborado por Catastro e Inventario de Recursos Naturales del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).

Figura 4

Uso del suelo en la microcuenca Aguas Calientes, Madriz-Nicaragua.



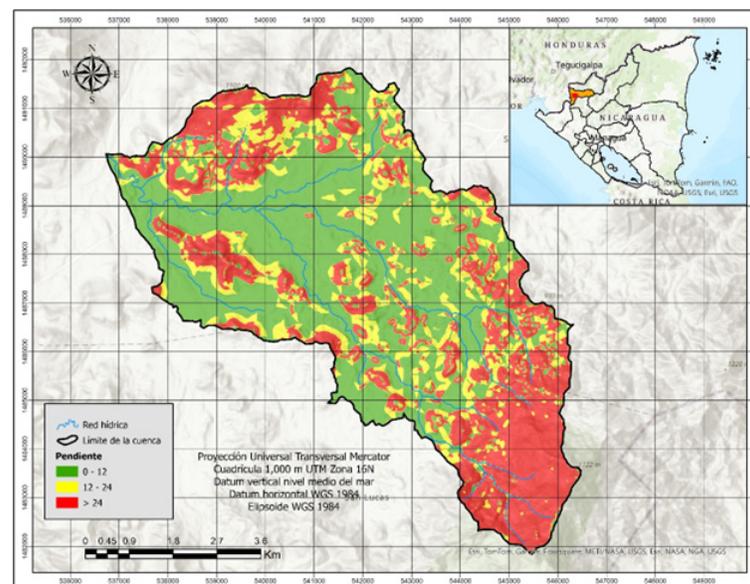
Fuente: elaboración propia, a partir del mapa de cobertura y uso actual de la tierra 2015 del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).

Pendiente

Las pendientes se clasifican como planas a inclinadas (0%-12%), que se encuentran en la parte media baja y cercana a los ríos; inclinadas a moderadamente escarpadas (12%-24%), en el noroeste y sureste de la microcuenca; escarpadas (mayores a 24%) en la parte alta al sureste y al noroeste de la microcuenca (ver Figura 5).

Figura 5

Mapa de pendiente en la microcuenca Aguas Calientes, Madriz-Nicaragua



Fuente: elaboración propia, a partir del Modelo Digital de Elevación 12.5 metros del INETER.

Zonas de recarga hídrica

Las zonas de recarga hídrica se distribuyen en las categorías baja, media y alta; el 57% del área corresponde a zona de recarga media (202-226 mm/año); el 25% a zona de recarga alta (> 226 mm/año); y el 18% a zona de recarga baja (161-201 mm/año). Las zonas de recarga baja incluyen áreas en pendiente escarpada, en las cuales los valores bajos de recarga podrían estar asociadas al cambio de uso del suelo de forestal a cultivos anuales y pastos; y por ende a la compactación del suelo, ya que en ellas es de donde se obtuvo una baja infiltración (7-17 cm/h), que es un factor determinante en la recarga. Según Matus et al. (2009):

hay que reconocer los cultivos que afectan las características de suelo, dificultan la infiltración y favorecen la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial del agua, como la agricultura intensiva sin obras de conservación, la ganadería extensiva, la labranza convencional ya que un uso inadecuado puede disminuir la recarga hasta en un 50% (pp. 16).

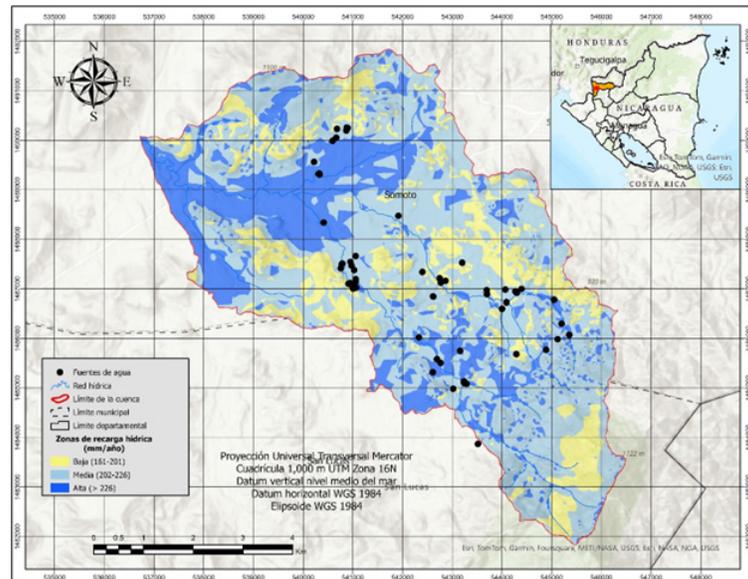
Tabla 6

Áreas y porcentaje de zonas de recarga microcuenca Aguas Calientes

Categoría	Recarga mm/año	Área km²	%
Baja	161 - 201	8.75	18
Media	202 - 226	26.90	57
Alta	> 226	11.79	25

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, las zonas de recarga alta se presentan en áreas con pendientes planas a inclinadas, donde predomina el material sedimentario más reciente y cercanas a los ríos. Estas condiciones coinciden con la ubicación de las fuentes de agua (pozos) de abastecimiento en las comunidades (ver Figura 6).

Figura 6*Zonas de recarga hídrica en la microcuenca Aguas Calientes*

Fuente: elaboración propia.

La delimitación precisa de las zonas de recarga hídrica adquiere una trascendencia significativa en garantizar disponibilidad hídrica suficiente y sostenible para las comunidades. Estas zonas de recarga no solo son puntos estratégicos, sino también lugares cruciales, ya que son núcleos donde el agua se infiltra en mayor medida, alimentando el acuífero. Este proceso, esencial para el equilibrio hidrológico regional, desempeña un papel insustituible al contribuir a la preservación de recursos hídricos subterráneos; en última instancia, fundamentales para el bienestar y desarrollo sostenible de las comunidades establecidas en el área de estudio.

- *Zonas de protección de las fuentes de abastecimiento y recarga de agua subterránea.* Las zonas de recarga son el punto de partida de definir la protección de las fuentes de agua y la recarga propiamente. En este sentido, en la microcuenca Aguas Calientes, se definieron dos zonas de protección descrita a continuación:
 - *Zona de protección I o zona de producción hídrica.* Incluye áreas de nacientes de los ríos y manantiales, ubicadas principalmente en pendientes escarpadas, así como las zonas de baja recarga obtenidas en el mapa de recarga.
 - *Zona de Protección II o Zona de Aprovechamiento.* Abarca aquellas áreas en donde se encuentran las fuentes de agua (pozos) utilizadas para consumo humano, tal como las zonas de alta a media recarga obtenida en el mapa de recarga.

De acuerdo con Matus et al. (2009), en la planificación e implementación de estrategias para el manejo de áreas de recarga hídrica bajo un enfoque integral, se debe tomar en cuenta el contexto físico, el uso y manejo del área, la tenencia de la tierra, así como el marco jurídico nacional referido a los recursos naturales.

En este sentido, es importante mencionar que en la legislación ambiental nacional se establece que, para el resguardo de las fuentes de agua, se deben establecer áreas de protección con un radio de 200 metros (Ley de conservación, fomento y desarrollo sostenible del sector forestal, 2003). Asimismo, se debe promover la reforestación, el establecimiento de sistemas agroforestales y prácticas de conservación de suelo y agua, con el propósito de mejorar las condiciones del suelo que permitan una mayor infiltración del agua.

La zona de producción hídrica donde se encuentran las nacientes de los ríos, representa un área crucial para la aplicación de estrategias de preservación. Estas zonas, caracterizadas por su baja recarga hídrica y predominantemente ocupadas por pastizales en pendientes pronunciadas, demandan una acción inmediata. Urge la implementación de prácticas de uso y manejo sostenible del suelo, como la agricultura de conservación, sistemas agroforestales y el manejo de la regeneración natural. Estas medidas son esenciales para mejorar la capacidad de infiltración del suelo y, por consiguiente, incrementar la recarga hídrica.

Conclusiones

Las zonas de recarga media y baja predominan en el área de estudio, ya que abarca el 75% del área de la microcuenca Aguas Calientes. Esto se evidencia en la notable reducción del nivel de agua en los pozos, llegando en varios casos a encontrarse completamente secos.

El cambio de uso del suelo, pasando de forestal a cultivos anuales y/o pasto, afecta diversas características del mismo. Este cambio, influenciado por prácticas inadecuadas de labranza y el pisoteo del ganado en algunos casos, tiene un impacto significativo en la capacidad de infiltración del suelo. Este efecto se manifiesta de manera más notoria en áreas de recarga baja, especialmente en pendientes escarpadas destinadas al cultivo de pasto y cultivos anuales. La disminución resultante en la capacidad de infiltración del agua compromete directamente la capacidad de recarga hídrica, esto destaca la urgencia de adoptar prácticas sostenibles que preserven la calidad del suelo.

La planificación e implementación de estrategias y acciones destinadas a la protección de las zonas de recarga hídrica y fuentes de agua, requiere la adopción de prácticas sostenibles en el uso y manejo del suelo. Este enfoque integral debe considerar el contexto físico, así como aspectos clave como el uso y manejo del suelo, la tenencia de la tierra y el marco jurídico nacional relacionado con los recursos naturales.

Referencias

- Alvarado Batres, C. y Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para el cálculo del balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23-33. <https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674>
- Barua1, S., Cartwright, I., Dresel, P. E. y Daly, E. (2020). Using multiple methods to understand groundwater recharge in a semi-arid area. *Hidrology and Earth System Sciences*, 1-40. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-143>.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2013). *Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE).
- FAO. (1967). Carte hydrogeologique du Liban au 1/100000ème. UN.
- Fenzl, N. (1989). *Nicaragua: Geografía, clima, geología e hidrogeología*. UFPA/INETER/INAN.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology.pdf*. (I. Prentice-Hall, Ed.) (4th ed).
- Graterol Matute, E. J., Pulver, E., Jaramillo Cardona, S., Urioste Daza, S. A., Labarta, R. A., Arana Salazar, J. A., Reyes, B., Obando, M., Moreno, C. y Saini, E. (2019). *Estrategia de diversificación y aumento de la productividad agropecuaria en el corredor seco de Nicaragua con base en la gestión integral del recurso hídrico*. BID.
- Healy, R. y Scanlon, B. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9780511780745.
- Herrera, K. y Moreno, D. (2023). *Incidencia del uso de suelo en el Balance Hídrico de Suelo propuesto por Schosinsky*. [Tesis]. Universidad Nacional Agraria. https://www.academia.edu/44710769/Hidrologia_William_R_Gámez_1ra_Edición

- Hiscock, K. (2005). *Hydrogeology principles and practices*. Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing company.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (2018). *2018-2022 Medium-Term Plan*. IICA.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) (2004). *Estudio Hidrogeológico e hidrogeoquímico de la Zona Central de Nicaragua*. Agencia Suiza para el desarrollo y la Cooperación (COSUDE)/ENACAL.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (1972). Mapa geológico de Nicaragua [Mapa]. Catastro e Inventario de Recursos Naturales. INETER. Managua, Nicaragua.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2015). Mapa interactivo de cobertura y uso de la tierra de Nicaragua [Archivo Shapefile]. <https://www.ineter.gob.ni/geoportales/atlasnacionalsuelo/index.html>
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, Autoridad Nacional del Agua, & Global Water Partnership Centroamérica. (2022). Plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos de Nicaragua (2022–2026). Nicaragua.
- Islam, S., Karan Singh, R. y Abad Khan, R. (2015). Methods of Estimating Ground Water Recharge. *International Journal of Engineering Associates*, 6(5).
- Izabá, R. y Cruz, J. (2022). *Guía técnica N°38: zonificación y estrategias para la protección de zonas de recarga en agua subterránea*. Universidad Nacional Agraria.
- Ley de conservación, fomento y desarrollo sostenible del sector forestal* (26 de junio del 2003). Publicada en La Gaceta, Diario Oficial N°. 168 del 4 de septiembre del 2003.
- Matus, O., Faustino, J. y Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. *Serie técnica, Boletín técnico*, 38. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN10M433.pdf>
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, Autoridad Nacional del Agua, & Global Water Partnership Centroamérica. (2022). Plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos de Nicaragua (2022–2026). Nicaragua.
- Montaner Salas, M. E. y Sánchez-Almohalla Serrano, E. (1988). Aproximación, Por Le Método De Thornthwaite, Al Cálculo De La Infiltración De La Lluvia Útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223-235.

- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, Autoridad Nacional del Agua, & Global Water Partnership Centroamérica. (2022). Plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos de Nicaragua (2022–2026). Nicaragua.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2010). *El derecho humano al agua y al saneamiento*. http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_spa.pdf
- Plataforma de datos climáticos. <https://www.globalclimatemonitor.org/>
- Ramírez Granado, P. (2013). Determinación de la recarga acuífera potencial mediante un sistema de información geográfica para la cuenca del Río Frío, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 15-35.
- Sánchez Jiménez, K. J. (2021). *Determinación del balance hídrico del suelo como insumo técnico base para la gestión integral de la cuenca alta y media del río zapote, Alajuela, Costa Rica*. [Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Hidrológica Sustentante]. Universidad Nacional de Costa Rica. <https://www.ksi-indonesia.org/assets/uploads/original/2020/03/ksi-1585501090.pdf><https://www.unhi.ac.id/id/berita/detail-berita/UNHI-Launching-Sistem-Sruti>https://kepuustakaan-presiden.perpusnas.go.id/uploaded_files/pdf/article_clipping/normal/BUNG_KA
- Schosinsky, G. (2006). *Cálculo de la Recarga Potencial del Acuífero Mediante el Balance Hídrico de Suelo*. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Schosinsky, G. y Losilla, M. (2000). Modelo Analítico para determinar la infiltración en base a la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 43-55.
- USDA (2001). *Soil Quality Test Kit Guide*. The U.S. Department of Agriculture (USDA).
- Vega, A., Guerra, P., Pizarro, J. y Lizama Katherine, P. P. (2019). Calidad del Agua en las Américas Riesgos y Oportunidades. *IANAS La Red Interamericana de Academias de Ciencias*, 0(February).

Anexos

Anexo 1. Procedimientos, criterios y ecuaciones del BHS propuesto por Schosinsky (2006)

• Retención de lluvia interceptada por el follaje (Ret)

El primer paso en la metodología es estimar la retención de la lluvia interceptada por el follaje (Ret) a partir de los datos de precipitación mensual. Los criterios utilizados para determinar la retención son: 20% de la precipitación se retiene en cobertura boscosa y el 12% de la precipitación se retiene en otras coberturas. La ecuación 1 muestra los criterios a considerar:

1. Si $P \leq 5$ mm/mes; $Ret = P$ (Ec.1a)
2. Si $P * Cfo \geq 5$ mm/mes; $Ret = P * Cfo$ (Ec.1b)
3. Si $P > 5$ mm/mes y $P * Cfo < 5$ mm/mes; $Ret = 5$ mm/mes (Ec.1c)

Donde:

P: precipitación

Cfo: coeficiente de retención por el follaje

• Coeficiente de infiltración (C)

El siguiente paso es, calcular la fracción de infiltración por textura de suelo (Kfc), a través de la ecuación propuesta por Shosinsky y Losilla (2000). Este cálculo se obtiene a partir de la infiltración básica obtenida en campo por medio de las pruebas de infiltración. Kfc se calcula como indica la ecuación 2 si la infiltración básica se encuentra entre los valores 16-1568 mm/día:

$$Kfc = 0.267 \ln(fc) - 0.000154(fc) - 0.723 \text{ (Ec.2)}$$

Donde:

fc: es la infiltración básica expresada en mm/día.

Si la fc, tiene valor menor que 16 mm/día, Kfc es igual a: $Kfc = 0.014(fc)/16$ y si fc es mayor que 1568 mm/día, $Kfc = 1$.

A partir de esta información se calcula el coeficiente de infiltración (C) considerando la fracción que infiltra por efecto de pendiente K_p y la fracción que infiltra por efecto de cobertura K_v . El cálculo de C es a través de la ecuación 3:

$$C = K_p + K_v + K_{fc} \text{ (Ec.3)}$$

donde:

K_p : fracción que infiltra por efecto de pendiente.

K_v : fracción que infiltra por efecto de cobertura.

K_{fc} : Fracción que infiltra por textura del suelo (Ec.2)

Los valores K_v y K_p se indican en el Tabla 1:

Cuadro 1.

Componentes del coeficiente de infiltración

Factor por pendiente (K_p)		
Descripción	Pendiente	K_p
Mu plano	0,02%-0,06%	0,30
Plana	0,3%-0,4%	0,20
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2%-7%	0,10
Fuerte	Mayor de 7%	0,06
Factor por cobertura vegetal (k_v)		
Descripción	K_v	
Cobertura con zacate menor del 50%	0,09	
Terreno cultivado	0,10	
Cobertura con paptizal	0,18	
Bosque	0,20	
Cobertura con zacate más del 75%	0,21	

Fuente: Schosinsky y Losilla, 2000

• **Precipitación que infiltra (P_i)**

Una vez obtenida el coeficiente de infiltración se calcula la precipitación de infiltra (P_i), que es una variable importante en el balance, ya que a partir de este momento se considera la porción de la precipitación que infiltra al suelo, que se calcula con la ecuación 4:

$$P_i(\text{mm})=C*(P-\text{Ret}) \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

P_i: precipitación que infiltra en mm

C: coeficiente de infiltración

Ret: retención de la precipitación por el follaje

A continuación, se calcula la escorrentía a partir de la precipitación, retención en el follaje y la precipitación que infiltra con la ecuación 5:

$$ESC= P-\text{Ret}-P_i \quad (\text{Ec.5})$$

• Evapotranspiración

“La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo” (Schosinsky, 2006, pág. 18).

Según Schosinsky (2006), en la metodología, la evapotranspiración potencial real (ETPR), va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (ver ecuación 6).

$$ETPR(\text{mm}) = \frac{(HS-PMP)*ETP}{(CC-PMP)} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración real en mm

HS: Humedad del suelo en mm

CC: capacidad de campo en %

PMP: Punto de marchitez permanente en %

Es importante mencionar que los estudios están aplicados a nivel de cuenca hidrográfica; por lo tanto, Schosinsky (2006) considera “En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca,

es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma". Por lo anterior, es conveniente asumir un promedio de la evapotranspiración en toda la cuenca. En esta metodología el promedio de evapotranspiración de la cuenca se asume que es igual a la evapotranspiración potencial (ETP), aplicando el método de Thornthwaite (Montaner Salas & Sánchez-Almohalla Serrano, 1988). (ecuación 7).

$$TP = 1.6 * \left(\frac{10*t}{I}\right)^a \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

i = intensidad térmica mensual

I = Intensidad térmica anual

t = temperatura mensual

a = parámetro en función de la expresión:

$$a = 0.000\ 000\ 675 \times I^3 - 0.0000\ 771 \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.49239$$

Humedad disponible

Para determinar la humedad disponible, se establece la CC y PMP en mm de agua, con el fin de definir la Humedad del suelo inicial(HSi).

$$\% \text{ vol} = \left(\% \frac{CC}{100}\right) * Da \quad (\text{Ec. 8})$$

$$CC \text{ en mm de agua} = \% \text{ vol } CC * \text{prof. raduclar(mm)} \quad (\text{Ec.9a})$$

$$\% \text{ vol} = \left(\% \frac{PMP}{100}\right) * Da \quad (\text{Ec.8})$$

$$PMP \text{ en mm de agua} = \% \text{ vol } PMP * \text{Prof. Rad(mm)} \quad (\text{Ec.9b})$$

Donde:

Cc: capacidad de campo en mm

PMP: Punto de marchitez permanente en mm

Da: densidad aparente gr/cm³

Prof. Rad: profundidad radicular en mm

“Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (HSi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes es (C1)” (Schosinsky, 2006, pág. 20).

$$C_1 = \frac{HSi - PMP - Pi}{CC - PMP} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

HSi: humedad del suelo inicial en mm

Si consideramos que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería C², coeficiente de humedad después de la evapotranspiración:

$$C_2 = \frac{HSi - PMP - Pi - (C_1 * ETP)}{CC - PMP} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

C²: coeficiente de humedad después de la Evapotranspiración

ETP: evapotranspiración real en mm

Como la infiltración y evapotranspiración ocurren durante el mes, se estima que la humedad del suelo en el mes corresponde al promedio de C₁ y C₂; esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real (ETPR) ocurrida en un mes es igual a:

$$ETPR(mm) = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) * ETP \quad (\text{Ec.12})$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración potencial real en mm

C₁: coeficiente de humedad antes de la evapotranspiración

C₂: coeficiente de humedad después de la evapotranspiración

ETP: evapotranspiración potencial en mm

Se toma en cuenta los siguientes criterios para el cálculo de C_1 y C_2 :

Los Coeficientes de humedad C_1 y C_2 no pueden ser superiores a 1, ni menores a 0.

Si C_1 y $C_2 > 1$; C_1 y $C_2 = 1$.

Si C_1 y C_2 son negativos; C_1 y $C_2 = 0$

“La humedad disponible (HD), aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar” (Schosinsky, 2006, pág. 20). La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

$$HD(mm) = HSi - Pi - PMP \quad (Ec.13)$$

Donde: HSi: humedad inicial del suelo en mm.

“Para determinar la recarga potencial anual de los acuíferos, es necesario conocer la humedad inicial del suelo en un mes determinado. Dentro de las humedades conocidas, que se pueden encontrar en un suelo, están la capacidad de campo o el punto de marchitez. En el caso de Costa Rica, generalmente al final de la época de mayor precipitación, el suelo se encuentra a capacidad de campo” (Schosinsky, 2006, pág. 24).

“Uno de los criterios para seleccionar el mes, en el que vamos a considerar que el suelo se encuentra a capacidad de campo, es seleccionar meses consecutivos, en que la precipitación que infiltra mensualmente supere la evapotranspiración potencial mensual, asignando al mes siguiente, de los meses consecutivos seleccionados, una humedad inicial igual a la capacidad de campo” (Schosinsky, 2006, pág. 24).

Evapotranspiración Real (ETR)

Para el cálculo de la ETR, se considera la humedad disponible (HD) y la evapotranspiración potencial real (ETPR) considerando los siguientes criterios:

$$\begin{aligned} 1. \text{ Si } ETPR \leq HD; ETR &= ETPR \\ 2. \text{ Si } ETPR \geq HD; ETR &= HD \end{aligned} \quad (Ec.14)$$

Humedad final (HSf)

Para el cálculo de la humedad final se considera las condiciones expresados en la ecuación 15:

$$\begin{aligned} 1. \text{ Si } HD+PMP-ETR < CC; HSf &= HD+PMP-ETR \\ 2. \text{ Si } HD-PMP-ETR \geq CC; HSf &= CC \end{aligned} \quad (Ec.15)$$

Es importante mencionar que el BHS es mensual; por lo tanto, HSf del mes anterior es igual a la HSi del mes actual.

$$HSi(mm) = HSf \text{ del mes anterior} \quad (Ec.16)$$

Recarga Potencial (Rp)

Para determinar la recarga potencial se considera la precipitación que infiltra (Pi); la humedad de suelo inicial (HSi), la humedad de suelo final (HSf) y la evapotranspiración real (ETR).

$$Rp(mm) = Pi + HSi - HSf - ETR \quad (Ec.17)$$

La metodología utiliza una hoja de cálculo excel donde se expresan las variables de entrada y cálculos de las variables de salidas para determinar la recarga potencial (anexo).

Limitaciones de la metodología:

1. Está diseñado para condiciones climáticas de Costa Rica.
2. Aplica condicionantes muy específicas y restringidas.
3. Tiene un margen de error menor del 80% en caso de ser probado (Schosinsky, 2006).

Hoja de cálculo Balance Hídrico del Suelo para estimación de la recarga potencial.

BALANCE HIDRICO DE SUELO														
Zona de estudio	Grecia													
Fecha	12 de diciembre 2006													
Textura del suelo	Franco arenoso													
Fc (mm/día)	84.02	%	mm	Datos Página 26, artículo Schosinsky (2006)										
Kp	0.09 cuadro 1	CC	20	146	Ecuación 8 y 9									
Kv	0.3 cuadro 1	PMP	13	94.90	Ecuación 8 y 9									
Kfc	0.4471 Ec.2	CC-PMP	7	51.10										
C	0.8371 Ec.3													
DA(gr/m ³)	1.46													
Prof radicular(mm)	500													
Hsi(mm)	Valor CC al iniciar	146												
Coefficiente de retención(Cfo)	Bosque	0.20												
	Otra cobertura	0.12												
Mes de inicio	Septiembre													
Variables	Ecuación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
P (mm)		0	0	0	2.5	137	113	24	250	207	128	55	4	921
Ret(mm)	Ec.1	0	0	0	2.50	16	14	3	30	25	15	7	4	116
C	Ec.3	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	
Pi(mm)	Ec.4	0	0	0	0	101	83	18	184	152	94	41	0	673
Esc(mm)	Ec.5	0	0	0	0	20	16	3	36	30	18	8	0	131
ETP(mm)	Ec.7	82	161	197	197	182	159	162	164	82	77	142	151	1756
HSi(mm)	Ec.16	95	95	95	95	95	105	109	95	146	146	146	116	
C1	Ec.10	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	
C2	Ec.11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
ETPR(mm)	Ec.12	0	0	0	0	91	80	32	82	82	77	71	45	560.2
HD(mm)	Ec.13	0	0	0	0	101	93	31	184	204	145	92	21	
ETR(mm)	Ec.14	0	0	0	0	91	80	31	82	82	77	71	21	534
HF _s (mm)	Ec.15	95	95	95	95	105	109	95	146	146	146	116	95	
Rp(mm)	Ec.17	0	0	0	0	0	0	0	51	70	17	0	0	138.84
DCC(mm)	Ec.18	51	51	51	51	41	37	51	0	0	0	30	51	
NR(mm)	Ec.19	133	212	248	248	132	117	182	82	0	0	101	181	

Fuente: Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial a un acuífero mediante un balance hídrico de suelos.

Anexo 2: Metodología para la zonificación de área de recarga utilizando sistema de información geográfica

Para estimar la zonificación de áreas de recarga consideramos las características físicas de la cuenca tales como: geología, uso de suelo, pendiente y la recarga potencial utilizando el sistema de información geográfica.

Geología: se utiliza la capa del mapa geológico nacional establecido por el Instituto de estudios territoriales de Nicaragua, INETER (1972). Se extrae el área de estudio de la capa nacional.

Pendiente: utilizamos el Modelo de Elevación Digital de 12 metros, donde se determinan las pendientes del área de interés a través de las herramientas de ArcGis.

Uso actual del suelo: en esta capa se utiliza el mapa de uso actual del suelo generado por INETER (2015). Extraemos el área de interés del mapa nacional.

Recarga potencial: se determina a través del BHS de Schosinsky (2006), después se genera una capa de puntos en ArcGis de la recarga potencial obtenida, utilizando la georreferenciación de las pruebas de infiltración realizadas en campo. La capa de recarga potencial se obtiene a partir de la interpolación utilizando la herramienta geoestadística Empirical Bayesian Kriging en el ArcGis. Una vez alcanzada la capa de recarga, se realiza una clasificación por intervalo de la recarga potencial para la categorización, utilizando la siguiente clasificación propuesta por FAO (1967) expuesta en el Tabla 2.

Tabla 2.

Criterios de clasificación de la Recarga potencial a partir del porcentaje de precipitación

	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Recarga potencial	45-50% P	30-35% P	10-20% P	5-10% P	< 5% P

Fuente: FAO, 1967.

A partir de esta clasificación, se categoriza la recarga potencial del área de estudio. En el Tabla 3, se presenta la categorización de la recarga en la microcuenca río Aguas Calientes, en el municipio de Somoto, departamento de Madriz.

Tabla 3.*Clasificación de la recarga potencial en la microcuenca Aguas Calientes, Somoto*

Recarga mm/año	Ponderación	Significado
161-201	1	Recarga baja
202-226	2	Recarga media
>226	3	Recarga alta

Fuente: Elaboración propia

De la misma manera se le asigna una categoría a la capa de uso de suelo, pendiente y geología especificados en el Tabla 4, 5 y 6.

Para la pendiente se establecieron las categorías expresadas en la Tabla 3, indicando que las pendientes entre 0-12% se calificaron como recarga alta, pendientes entre 12-24% se clasificaron como recarga media y pendientes mayores de 24% se clasificaron como recargas bajas (Tabla 4).

Tabla 4.*Clasificación de las pendientes en la microcuenca Aguas Calientes, Somoto.*

Pendiente %	Ponderación	Clasificación de la recarga
0-12	3	Recarga alta
12-24	2	Recarga media
>24	1	Recarga baja

Fuente: elaboración propia

Para la clasificación de la geología, se valoraron las características hidráulicas de las rocas. En el material coluvial y terrazas, se clasifican como acuíferos porosos con transmisividad de alta a muy alta (Krásný y Hecht, 1989); por lo tanto, se toman como zona de recarga alta. En el caso del basalto andesita y toba se identifican como acuíferos fracturados, con transmisividad de media a bajas (Krásný y Hecht, 1989), se toman como zona de recarga media. Las ignibritas y dacitas, se consideran como acuíferos pocos productivos con transmisividad de baja a nula (Krásný y Hecht, 1989); de modo que, se clasificó como zona de recarga baja. La clasificación de la recarga se expresa en la Tabla 5.

Tabla 5.

Clasificación de la recarga por litología microcuenca Aguas Calientes, Somoto

Litología	Ponderación	Clasificación
Material coluvial y terrazas	3	Recarga alta
Basaltos, andesitas y toba	2	Recarga media
Ignimbritas y dacitas	1	Recarga baja

Fuente: elaboración propia.

La clasificación de la recarga por uso de suelo se expresa en la Tabla 6. Los bosques, vegetación arbustiva y cultivo permanente (café con sombra) se clasificaron como recarga alta. Los cultivos anuales y tacotales como recarga media. Los pastos y suelos sin vegetación como recarga baja.

Tabla 6.

Clasificación de la recarga por uso de suelo en la microcuenca Aguas Calientes, Somoto

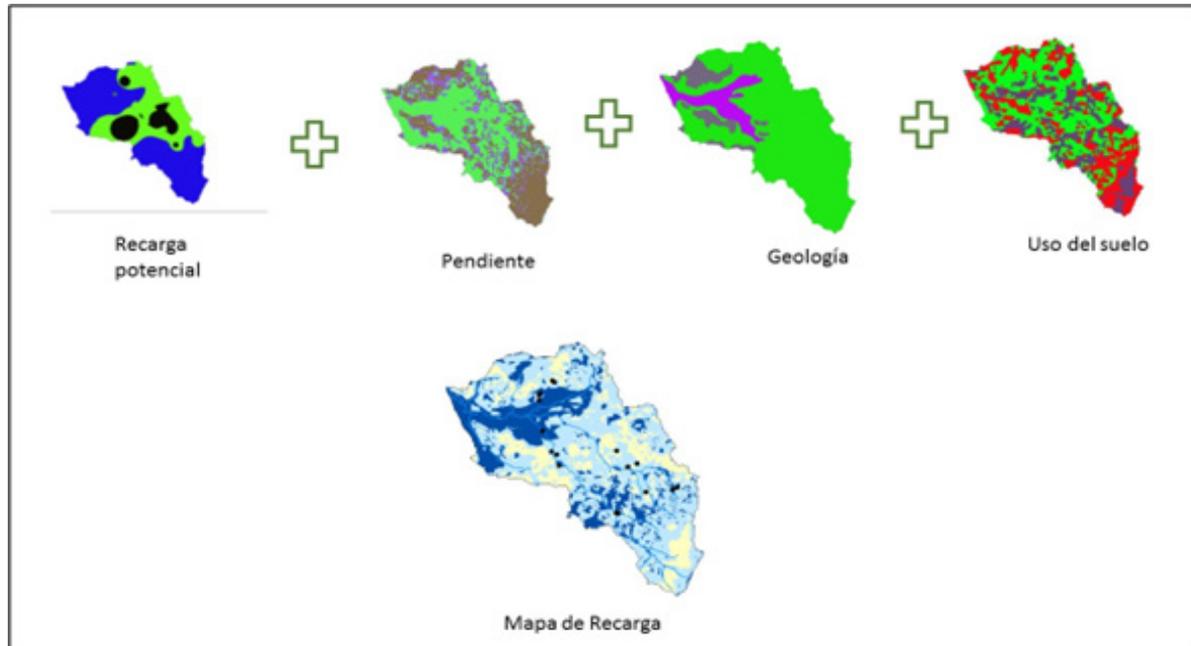
Uso de suelo	Ponderación	Clasificación de la recarga
Bosque, vegetación arbustiva y cultivo permanente	3	Recarga alta
Cultivos anuales y tacotales	2	Recarga media
Pastos y suelo sin vegetación	1	Recarga baja

Fuente: elaboración propia

Elaboración del mapa de zonificación: Se seleccionaron las capas de geología, pendiente, uso del suelo y recarga potencial para aplicar la herramienta Weighted Sum en ArcGis interceptando las capas antes mencionadas para obtener el mapa de zonificación de la recarga en el área de estudio (Figura 3).

Figura 3.

Esquema de la intercepción de capas con la Herramienta Weighted Sum en ArcGIS pro para definir la zonificación de recarga de agua subterránea en un área de interés.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Resumen de la legislación de Nicaragua a considerar para establecimiento de criterios sobre la protección de áreas de recarga y fuentes de agua.

NOMBRE DE LA LEY	CAPÍTULOS, SESIÓN Y TÍTULOS	ARTÍCULOS
<p>Ley N°217: Ley general del medio ambiente y los recursos naturales</p>	<p>Capítulo 2, Sesión I: de las aguas.</p>	<p>Artículo 74. El uso, manejo, aprovechamiento de los ecosistemas acuáticos, costeros, y los recursos hidrobiológicos contenidos en ellos, deberá realizarse con base sostenible y de acuerdo a planes de manejo que garanticen la conservación de los mismos.</p>
		<p>Artículo 75. Los usos del agua gozaran de prioridad las necesidades de consumo humano y los servicios públicos.</p>
		<p>Artículo 78. Para autorizar el uso del agua, las instituciones con mandatos deberán de tomar en cuenta las siguientes disposiciones: 1) considerar la interacción equilibrada con los demás recursos y el funcionamiento del ciclo hidrológico, con especial protección de los suelos, áreas boscosas, formaciones geológicas, y de las áreas de recarga de los acuíferos. 2) Promover el manejo integrado de las cuencas hidrográficas. 3) Proteger las especies del ecosistema del sistema acuático y costero terrestre especialmente las endémicas, amenazadas o en peligro de extinción.</p> <p>Artículo 83. La autoridad competente de acuerdo atendiendo al uso que le den al agua, disponibilidad de la misma y características especiales del manto freático, podrán establecer patrones de volúmenes anuales de extracción máximas, cuyo controles y aplicación será competencia de los gobiernos regionales autónomos y las municipalidades.</p>

	<p>Capítulo 2, sesión II: de las aguas continentales</p>	<p>Artículo 84. Las aguas continentales superficiales, así como las subterráneas integradas en el ciclo hidrológico, constituye un recurso unitario subordinado al interés general que forma parte del dominio público, su propiedad, uso y limitaciones deben ser normado. Artículo 85. En ningún caso los particulares sin autorización expresa de autoridad competente, podrán modificar artificialmente la fase atmosférica del ciclo hidrológico. Artículo 86. El cumplimiento de las normas, recomendaciones y demás medidas que el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales dicten serán de obligatorio cumplimiento para los propietarios tenedores o administradores del uso del agua. Artículo 87. Las aguas térmicas, medicinales y con otras propiedades especiales, serán aprovechadas por el Estado a través de entidades propias o por medio de concesiones.</p>
<p>Ley n° 462: Ley de conservación, fomento y desarrollo sostenible del sector forestal</p>	<p>Capítulo III: Manejo y aprovechamiento forestal, Sesión 5: Área forestal de protección municipal.</p>	<p>Artículo 27. Son áreas forestales de protección municipal, bajo la responsabilidad y el cuidado de las municipalidades las ubicadas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. En una distancia de 200 m medidas horizontalmente de la marca máxima de marea o fluctuación del cuerpo de agua, a partir de la cota de los lagos, embalses naturales, embalses artificiales y fuentes de agua. 2. En una distancia de 50 metros medidos horizontalmente a cada lado de los cauces y de los ríos. 3. En un área con pendiente mayores a 75%. <p>En estas áreas se prohíbe el corte de árboles en cualquiera de sus modalidades y se prohíbe el aprovechamiento forestal de la tala rasa, el uso de plaguicidas y la remoción total de la vegetación herbácea.</p>

<p>Ley N°620: Ley general de aguas nacionales y reglamento de la ley general de aguas nacionales. Decreto N°44-2010</p>	<p>Título VI: Del régimen económico del agua. Capítulo III: de los servicios ambientales hidrológicos.</p>	<p>Artículo 94 Los servicios ambientales de carácter hídrico deberán estar dirigidos a garantizar el buen desempeño de las cuencas y acuíferos, para lo cual se podrán establecer pagos por estos servicios en: a) Zonas de recarga, incluyendo bosques y selvas; b) Nacimientos de manantiales; c) Cuerpos receptores contaminados; d) Acuíferos sobreexplotados; e) Humedales; f) Embalses naturales, artificiales y estuarios; g) Algunos lagos, lagunas, esteros, ríos de uso turístico, recreativo y productivo, con problemas de cantidad y calidad.</p>
	<p>Capítulo VII De la Producción de Aguas</p>	<p>Artículo 114. El Consejo Nacional de los Recursos Hídricos (CNRH), en su primera reunión deberá crear un Comité Técnico de entre sus miembros para que formule y elabore una planificación nacional de recursos hídricos con criterios de ordenamiento territorial y enfoque de cuenca para el uso adecuado del suelo, asegurar la producción y protección de agua a mediano y largo plazo. Artículo 115. El Plan deberá contemplar todas las acciones posibles encaminadas a proteger y recuperar las áreas vitales para la existencia del agua, como zonas de infiltración, áreas de recarga, de cuerpos de agua superficial y subterránea. Siendo de carácter prioritario los programas o iniciativas de información y educación dirigida a los usuarios en general, que conlleve a acciones concretas como señalización, amojonamiento, cercado, limpieza, descontaminación y reforestación de las cuencas, subcuencas y microcuencas. Artículo 116. La planificación de la restauración hidrológica para mejorar la producción del agua, deberá obligar a la protección de los bosques o áreas de montañas en nacientes y de recarga acuífera, que constituyen zonas vitales para su producción. Artículo 117. El Plan Nacional para la producción de agua, una vez aprobado por el Consejo Nacional de los Recursos Hídricos (CNRH), pasará a formar parte de la Política Nacional de los Recursos Hídricos.</p>

	<p>Título X disposiciones transitorias y finales, Capítulo II Disposiciones Finales</p>	<p>Artículo 139. Se podrán imponer servidumbre, conforme el marco legal vigente, sobre bienes de propiedad pública o privada en aquellas áreas que sean indispensables para el aprovechamiento, uso, reuso, conservación, y preservación del agua, los ecosistemas vitales, las obras de defensa y protección de riberas, caminos y sendas, áreas de inundación y embalse, trasvases, acueductos y en general las obras hidráulicas que las requieran. En el caso de las Regiones Autónomas se establecerán previo acuerdo con las comunidades afectadas.</p>
	<p>Reglamento de la Ley 620, Ley general de aguas nacionales, Capítulo XXV, disposiciones finales.</p>	<p>Artículo 111. Zonas de Recarga. A efectos del Artículo 147 de la Ley, el ANA definirá técnicamente las zonas de recarga de los acuíferos, una vez concluidos los estudios correspondientes serán presentados al Consejo Nacional de Recursos Hídricos para su aprobación.</p> <p>Artículo 147. Toda persona natural o jurídica que posea propiedades registradas a su nombre, en áreas definidas como de recargas acuíferas o para producción de agua, están obligadas a destinar un 25% de dichas propiedades para proyectos de reforestación, a efecto de garantizar la conservación del recurso hídrico.</p> <p>El cumplimiento de lo dispuesto en el párrafo anterior, deberá ser tomado en consideración a efecto del otorgamiento de los incentivos previstos en la ley de la materia y su reglamento.</p> <p>Los productores que cumplan con el 25% establecido en el párrafo primero, tendrán como incentivo el derecho al uso del agua para áreas de riego en sus propiedades, quedando eximidos del pago del canon.</p>

Anexo 4. Inventario de pozos de la microcuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua.

Cód	Fecha	Tipo	Comunidad	Nombre	X	Y	Elevación msnm	NEA (m)	Uso del pozo
#1	21/9/2020	PE	Aguas Calientes	Comunitario	540871	1490267	716	4.77	Uso doméstico
#2	21/9/2020	PE	Aguas Calientes	Sector privado Peñas Rivas	540288	1489756	703	10.21	Uso doméstico
#3	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo privado, sector escuela	540404	1488350	685	10.95	Uso doméstico
#4	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo escuela	540448	1488178	691		
#5	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo comunal	540999	1487025	710		
#6	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo comunal	540777	1487502	589		
#7	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo comunal sector escuela	540784	1487507	687	5.38	Consumo humano y doméstico
#8	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Sector La ermita	540953	1487412	705	12.69	Consumo humano y doméstico
#9	21/9/2020	PE	Santa Rosa	Pozo Privado	540868	148735	693	10.87	Consumo humano y doméstico
#10	22/9/2020	PE	La Cruz	Pozo comunal	548818	1485356	1166	10.48	Consumo humano y doméstico
#11	22/9/2020	PE	El Zapote 2	Pozo comunal	547394	1485639	985	0.82	Consumo humano y doméstico
#12	22/9/2020	PE	El Rodeo 2	Pozo comunal	546390	1486391	906	10.41	Consumo humano y doméstico
#13	22/9/2020	PP	El Rodeo, sector Escuelas	Pozo comunal	546243	1426494	914		Consumo humano y doméstico
#14	22/9/2020	PP	Santa Teresa	Pozo comunal	546726	1487570	840		Consumo humano y doméstico
#15	22/9/2020	PE	Santa Teresa	Pozo comunal	546811	1487942	785	2.73	Consumo humano y doméstico

#16	22/9/2020	PE	Quebrada de Agua	Pozo comunal	545491	1486146	872	28.92	Consumo humano y doméstico
#17	22/9/2020	PE	Quebrada de Agua	Pozo comunal	545352	1486052	856		Uso doméstico
#18	22/9/2020	PE	Quebrada de Agua	Pozo comunal	545853	1486039	858	1.34	Uso doméstico
#19	22/9/2020	PE	Mancico	Pozo comunal	545129	1485988	870	2.41	Uso doméstico
#20	22/9/2020	PP	Mancico	Pozo comunal	544280	1486045	802	15.15	Uso doméstico
#21	22/9/2020	PP	Unile	Pozo comunal	544032	1485159	810		
#22	22/9/2020	PE	Unile Centro	Pozo comunal	543242	1485133	773	2.41	Uso doméstico
#23	22/9/2020	PP	Unile Centro	Pozo comunal	542604	1485314	767	17.00	Uso doméstico
#24	22/9/2020	PE	Unile Suyapa	Pozo comunal	542840	1485630	772	14.88	Uso doméstico
#25	22/9/2020	PE	Unile Suyapa	Pozo comunal	542326	1486019	741	8.29	Uso doméstico
#26	22/9/2020	PP	Unile Centro	Pozo comunal	543162	1485743	765	36.36	Uso doméstico
#27	23/9/2020	PE	Motuse	Pozo comunal	536390	1494608	661	9.90	Uso doméstico
#28	23/9/2020	PP	Motuse	Pozo cooperativa	536739	1493995	661	4.64	Se utilizaba para riego
#29	23/9/2020	PE	Motuse	Pozo privado	536750	1493911	663	4.50	Se utiliza para riego y uso doméstico
#30	23/9/2020	PP	Motuse	Pozo Cooperativa	536700	1494224	660	3.24	Anteriormente se utilizaba para riego
#31	23/9/2020	PE	Santa Isabel	Pozo comunal	544091	1486128	754	13.57	Uso doméstico
#32	23/9/2020	PP	Santa Isabel	Pozo comunal	543942	1487053	765	57.41	Uso doméstico
#33	23/9/2020	PP	Santa Isabel	Pozo comunal	543742	1486890	742	63.89	Uso doméstico
#34	23/9/2020	PP	Apatule	Pozo comunal de Santa Isabel	543194	1487590	727	61.07	Consumo humano
#35	23/9/2020	PP	Apatule	Pozo comunal	542748	1487223	727	7.42	Consumo humano

Bibliografía

- Climate Engine. (2021, agosto 15). *Datos climáticos globales del período 2000-2020*. <https://app.climateengine.com/climateEngine>
- Global Climate Monitor. (2020, octubre 20). *Datos climáticos globales del período 2000-2019*. <https://www.globalclimatemonitor.org/>
- Graterol Matute, E. J., Pulver, E., Jaramillo Cardona, S., Urioste Daza, S. A., Labarta, R. A., Arana Salazar, J. A., Reyes, B., Obando, M., Moreno, C., y Saini, E. (2019). Estrategia de diversificación y aumento de la productividad agropecuaria en el corredor seco de Nicaragua con base en la gestión integral del recurso hídrico. BID.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2018). 2018–2022 Medium-Term Plan. IICA.
- Krásný, J., y Hecht, G. (1989). Estudios hidrogeológicos e hidroquímicos de la Región del Pacífico de Nicaragua. (G. COSUDE, INETER, Ed.). Managua, Nicaragua.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial a un acuífero mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 13–30.
- United States Department of Agriculture. (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf.