



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Documento a acceso inmediato

Metodología de elaboración de los mapas temáticos del Yaque del Sur

Informe final

BRGM/RC-75188-FR

Versión 1 del 18 février 2026

Choisissez un élément ou adaptez:

**Brugeron A., Gutierrez A., Delaunay M., Gourcy L., Surdyk N., Y. Caballero,
Lanini S., Wieskotten M., K. Leroy**

Este informe fue verificado el 18 de febrero y aprobado el 18 de febrero 2026 de acuerdo con el procedimiento interno vigente del BRGM, que garantiza el cumplimiento de sus compromisos contractuales, la integridad e imparcialidad del contenido científico y técnico de este informe, la ética y deontología del BRGM y las disposiciones reglamentarias y legislativas a las que está sujeta en el ejercicio de su actividad.

El sistema de gestión de la calidad y de gestión ambiental del BRGM
esta certificado según las normas ISO 9001 e ISO 14001.

Contacto: qualite@brgm.fr

Advertencia

Este informe se envía exclusivamente al solicitante.

La comunicabilidad y reutilización de este informe se rigen por la normativa vigente, así como por los términos del contrato.

Las pruebas del control de calidad de este informe (autor, verificador, aprobador) podrán comunicarse de forma confidencial al destinatario del informe, a petición suya y en estricto cumplimiento de la normativa aplicable al tratamiento de datos personales.

BRGM no se hace responsable de la divulgación total o parcial del contenido de este informe a un tercero no autorizado, del que no es responsable, ni de las consecuencias que de ello pudieran derivarse.

Su opinión es importante para nosotros

Como parte de nuestro enfoque de calidad y de la mejora continua de nuestras prácticas, nos gustaría medir la eficacia de nuestro trabajo.

Por ello, le agradeceríamos que nos diera su opinión sobre este informe cumplimentando el formulario disponible en <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> o introduciendo este código:



Palabras claves : hidrogeología, República dominicana, Yaque del Sur, hidrogeoquímica

En bibliografía, este informe se refiere como:

Brugeron A., Gutierrez A., Delaunay M., Gourcy L., Surdyk N., Y. Caballero, Lanini S., Wieskotten M., K. Leroy 2026. Metodología de elaboración de los mapas temáticos del Yaque del Sur. Informe final V1. BRGM/RC-75188-FR, 134 p.

© BRGM, 2026, este documento no puede ser reproducido en totalidad o en parte sin autorización expresa del BRGM.
M-P2-12 – 13/01/2026

Resumen

La República Dominicana es un territorio especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático que se manifiestan, entre otras cosas, por una disminución de las precipitaciones y un aumento de la frecuencia de los episodios de sequía. En este contexto, la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) a nivel de una cuenca hidrográfica es un enfoque fundamental para desarrollar una estrategia de adaptación.

El proyecto “Mejora de la gestión de las aguas subterráneas en la República Dominicana en contexto de cambio climático” elaborado entre el BRGM (Servicio Geológico Francés), la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), el Ministerio de la Presidencia (MINPRE) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MIMARENA) de República Dominicana se realizó entre 2023 y 2026.

Parte del proyecto fue dedicada a recopilar los datos existentes en varios institutos dominicanos, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MIMARENA), el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), el Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA), el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Servicio Geológico Nacional (SGN) y la Fundación Sur Futuro. La constitución de una base de datos constituye el eje 1 del proyecto.

El segundo eje del proyecto permitió la adquisición de nuevos datos en la cuenca del Yaque del Sur. Con este fin se realizaron varias campañas de mediciones y un seguimiento regular de la calidad del agua de algunos puntos de aguas y la medición en continuo del nivel del agua subterránea en un punto de cada zona hidrogeológica de la cuenca del Yaque del Sur. Los resultados están presentados en el informe BRGM/RC-74947-FR.

A partir de los datos de campo y de la información disponible en el país se creó una base de datos que permitió preparar una serie de mapas que corresponden a las necesidades de los actores del sector del agua en el país. El presente informe presenta de forma sintética la metodología elaborada y aplicada a la cuenca del Yaque del Sur para elaborar los mapas temáticos del proyecto.

Los datos sobre el monitoreo de la lluvia, de los ríos y de las aguas subterráneas varían con el tiempo, por eso se decidió no editar un mapa en papel con esta información. El servicio web que prepara el IGN permitirá la selección individualizada de cada capa de información sobre el monitoreo.

Tres mapas relativos a la calidad del agua subterránea completan el conjunto de documentos sobre la cuenca del Yaque del Sur. El primero delimita las zonas que podrían tener aguas subterráneas con alto contenido en flúor de origen natural, es decir, proveniente de las rocas. El segundo mapa presenta las zonas con aportes significativos en nitratos de origen agrícola sobre el recurso hídrico subterráneo. El mapa contiene los valores más altos de concentraciones en nitratos medidos entre 2024 y 2025. El último mapa de calidad de las aguas presenta las zonas con aportes significativos en pesticidas de origen agrícola. En los sectores con mayor flujo de contaminantes hacia el recurso hídrico es necesario elaborar programas de acción para evitar la contaminación de las aguas que puedan limitar su uso.

El mapa sobre el potencial hidrogeológico de la cuenca del Yaque del Sur se presenta en dos formatos, A0 y A1. El mapa considera las características hidrogeológicas, la capacidad de infiltración y los parámetros hidrodinámicos. En el mapa en formato A0, tres cartuchos contienen

en formato reducido, i) la lluvia efectiva, ii) la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia y iii) el índice de desarrollo y infiltración de la Red hidrográfica (IDPR). El mapa en formato A1 muestra las series temporales de la piezometría de tres puntos de agua localizados en tres zonas hidrogeológicas. El mapa incluye también el mapa piezométrico del valle de San Juan.

El mapa de recarga potencial al horizonte 2055 (estimaciones 2041-2070) está elaborado a partir de dos modelos climáticos globales seleccionados para este estudio, el MPI-ESM-LR y HadGEM2-ES. Los mapas muestran la diferencia absoluta (para la temperatura) y relativa (para la evapotranspiración potencial, las precipitaciones y la recarga potencial) entre los valores futuros (2041-2070) y los valores de referencia (1976-2005). Los dos modelos predicen un aumento medio de la temperatura media anual entre 2°C y 3°C en la cuenca del Yaque del Sur y una disminución de la recarga potencial entre -8% y -44%, según los modelos utilizados.

La base de datos, como los mapas elaborados, están disponible en la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Dominicana.

índice

1. Introducción.....	10
2. Presentación de la hidrogeología de la cuenca del Yaque del Sur	11
2.1. Situación geográfica.....	11
2.2. Contexto geológico e hidrogeológico.....	12
2.3. Monitoreo de la cuenca del Yaque del Sur	14
3. Calidad natural (geogénica) del agua	16
3.1. Metodología	16
3.2. Sulfatos	19
3.3. Fluor.....	20
3.4. Límites del método	22
3.5. Presentación del mapa sobre fluoruros	22
4. Vulnerabilidad del recurso a la contaminación antrópica	24
4.1. Metodología	24
4.2. Precisar la presión	25
4.3. Caracterizar la movilidad del contaminante.....	28
4.4. Mapas de presión significativas sobre el recurso hídrico subterráneo	29
5. Potencial hidrogeológico	33
5.1. Construcción del mapa del potencial hidrogeológico.....	33
<i>Elaboración del mapa.....</i>	33
<i>Uso y limitaciones del mapa de potencial acuífero</i>	34
5.2. Mapas que acompañan el mapa de potencial hidrogeológico en formato A0	36
<i>Principio de la estimación de la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia</i>	36
<i>Mapa de la lluvia efectiva</i>	37
<i>Mapa de la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia.....</i>	37
<i>Índice de Desarrollo y Persistencia de la Red hidrográfica (IDPR)</i>	45
6. Recarga potencial de los acuíferos al horizonte 2055.....	50
7. Conclusiones.....	53
8. Referencias	54

Lista de las ilustraciones

Ilustración 1: Mapa de ubicación de la cuenca del Yaque del Sur (contorno rojo).....	11
Ilustración 2: Mapa geológico de la cuenca del Yaque del Sur al 1:250000 (@SGN) – leyenda disponible en el informe BRGM/RC-74947-FR.....	12
Ilustración 3: Unidades hidrogeológicas	13
Ilustración 4: Puntos de monitoreo en la cuenca del Yaque del Sur	15
Ilustración 5: Ejemplo de mallado (o cuadrículado) utilizado para los mapas de fondo hidrogeoquímico en el Yaque del Sur.....	17

Ilustración 6: Tabla que resume el conjunto de litologías encontradas para el mapa de la cuenca	18
Ilustración 7: ejemplo de tabla de puntuaciones para cada litología	19
Ilustración 8: Ejemplo del cálculo de la puntuación para las mallas que se van a predecir.....	19
Ilustración 9: Vista sintética de los sectores que tienen una puntuación más alta para el SO ₄ en las aguas subterráneas de la cueca.....	20
Ilustración 10: Vista sintética de los sectores con mayores puntuaciones para el flúor en las aguas subterráneas de la cuenca (y concentraciones de F medidas en 2024-2025)	21
Ilustración 11: Vista preliminar del mapa de la calidad predictiva del agua respecto al fluoruro	22
Ilustración 12: Valores máximo de F (en mg.l ⁻¹) medido en las aguas subterráneas en 2024-2025	23
Ilustración 13: Esquema de la metodología aplicada para evaluar la presión significativa sobre el recurso hídrico subterráneo	24
Ilustración 14: Mapa de Uso y Cobertura del suelo (@MIMARENA, 2022)	25
Ilustración 15: Notas de presión para el nitrato y los pesticidas	28
Ilustración 16: Combinación entre el índice IDPR (capacidad del suelo a infiltrar) y la presión en nitratos y pesticidas	29
Ilustración 17: Vista preliminar del mapa de presión significativa en nitrato de origen agrícola en las aguas subterráneas.....	30
Ilustración 18: Concentraciones máximas en nitrato (en mg.l ⁻¹) medidas en las aguas subterráneas de la cuenca del Yaque del Sud en 2024-2025	31
Ilustración 19: Vista preliminar de la presión significativa en pesticidas de origen agrícola en las aguas subterráneas.	32
Ilustración 20: Observaciones de campo (@Delaunay).....	33
Ilustración 21 : Clasificación de los acuíferos.....	34
Ilustración 22: Vision preliminar del mapa de potencial hidrogeológico	35
Ilustración 23: Principio del cálculo de la lluvia efectiva.....	36
Ilustración 24: Principio de los cálculos necesarios para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos.	36
Ilustración 25: Evolución estacional de los Kc en la republica dominicana.....	37
Ilustración 26: Construcción del mapa de la recarga potencial.....	39
Ilustración 27: Coeficiente de infiltración de la lluvia efectiva que participa a la recarga de los acuíferos	39
Ilustración 28: Valores de recarga según INDRHI/Aquater (2001)	40
Ilustración 29: Valores de recarga según el estudio de Tahal (1978)	40
Ilustración 30: método WTF aplicado al acuífero de Constanza.....	41
Ilustración 31: método WTF aplicado al acuífero de Valle de San Juan.....	42
Ilustración 32: método WTF aplicado al acuífero de Valle de Neiba.....	43
Ilustración 33: Computación de la recarga potencial por unidad hidrogeológica en la cuenca de Yaque del Sur	44

Ilustración 34: Vision preliminar del mapa de la recarga potencial (en mm) en la cuenca de Yaque del Sur.....	45
Ilustración 35: Red de talwegs, red hidrográfica natural, y IDPR correspondiente (tomado de Mardhel et al., 2021)	46
Ilustración 36: Principio de cálculo de la dirección del flujo, cálculo de la acumulación del flujo de muestra y ejemplo de definición de la red de drenaje (tomado de Mardhel et al., 2021).....	47
Ilustración 37: Método IDPR de tratamiento de cursos de agua y lagos (tomado de Mardhel et al., 2021).....	48
Ilustración 38: Cartografía del IDPR para la cuenca hidrográfica del Yaque del Sur.....	49
Ilustración 39: Cambios de valores medios de evapotranspiración potencial y de precipitaciones anuales calculados entre el periodo actual (1976-2005) y el horizonte 2055 (2041-2070), según las proyecciones de los modelos de clima globales MPI y HadGEM.	51
Ilustración 40: Cambios de valores medios de recarga potencial anual calculados entre el periodo actual (1976-2005) y el horizonte 2055 (2041-2070), según las proyecciones de los modelos de clima globales MPI y HadGEM.	52

1. Introducción

La República Dominicana es un territorio especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático que se manifiestan, entre otras cosas, por una disminución de las precipitaciones y un aumento de la frecuencia de los episodios de sequía. En este contexto, la gestión integrada de los recursos hídricos a nivel de una cuenca hidrográfica es un enfoque fundamental para desarrollar una estrategia de adaptación.

El proyecto “Mejora de la gestión de las aguas subterráneas en la República Dominicana en contexto de cambio climático” fue elaborado en 2021-2022 entre el BRGM (Servicio Geológico Francés), la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), el Ministerio de la Presidencia (MINPRE) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MIMARENA) de República Dominicana.

Desde el principio del proyecto, en junio 2023, el equipo se dedicó a recopilar los datos existentes en varios institutos dominicanos, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MIMARENA), el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), el Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA), el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Servicio Geológico Nacional (SGN) y la Fundación Sur Futuro. La constitución de esta base de datos constituye el eje 1 del proyecto.

El segundo eje del proyecto contempla la adquisición de nuevos datos en la cuenca del Yaque del Sur. Con este fin se realizaron varias campañas de mediciones después de la recopilación de los datos existentes. La elaboración del plan de trabajo, muestreo y mediciones fue basada en el análisis de los datos existentes y las primeras visitas de campo sintetizadas en el informe BRGM/RC-73615-FR. Los resultados están presentados en el informe BRGM/RC-74947-FR.

A partir de los datos de campo, de la información disponible y de la totalidad de los datos recopilados en la base de datos del proyecto se pudo preparar una serie de mapas que corresponden a las necesidades de los actores del sector del agua en el país, como discutido en una reunión organizada en Santo Domingo en septiembre de 2024.

La base de datos asociada a los mapas está a disposición de los participantes del proyecto y es utilizada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la república dominicana para la preparación del proyecto SIG puesto en línea y mantenido por este instituto.

El presente informe presenta de forma sintética la metodología de elaboración de los mapas temáticos de la cuenca del Yaque del Sur y la estructura del proyecto SIG, ambos productos puestos a disposición del público por el IGN.

2. Presentación de la hidrogeología de la cuenca del Yaque del Sur

2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Yaque del Sur está ubicada en la parte suroccidental de la República Dominicana y abarca una superficie de 5060 km² (Ilustración 1). En cuanto a la división administrativa, la zona se extiende mayoritariamente por cinco provincias: San Juan, Azua, Bahoruco, La Vega y Barahona.

Dos cadenas de montaña caracterizan los paisajes de la cuenca:

- La cordillera central al norte de la cuenca, con alturas de más de 2000 m (donde se ubica el Pico Duarte con sus 3098 m de altura).
- La sierra de Neiba en el centro de la cuenca, menos alta que la cordillera central (2279 m en Monte Neiba)

La presencia de la sierra de Neiba en el centro de la cuenca constituye una barrera natural que afecta la circulación de los recursos hídricos y genera dos llanuras principales:

- La llanura del río San Juan y sus afluentes, en la zona de San Juan de la Maguana;
- La zona lacustre, localizada en la parte baja de la cuenca, en donde se encuentran pantanos y manglares. Fuera de la zona de estudio, pero no muy lejos de esta zona se encuentra el lago Enriquillo, que es la mayor reserva de agua (hipersalina) de las Antillas y que se encuentra 40 metros por debajo del nivel del mar.



Ilustración 1: Mapa de ubicación de la cuenca del Yaque del Sur (contorno rojo).

2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLOGICO

La geología de la cuenca del río Yaque del Sur (Ilustración 2) presenta una alta diversidad de rocas y de contextos geológicos descritos en el informe BRGM/RP-74947-FR.

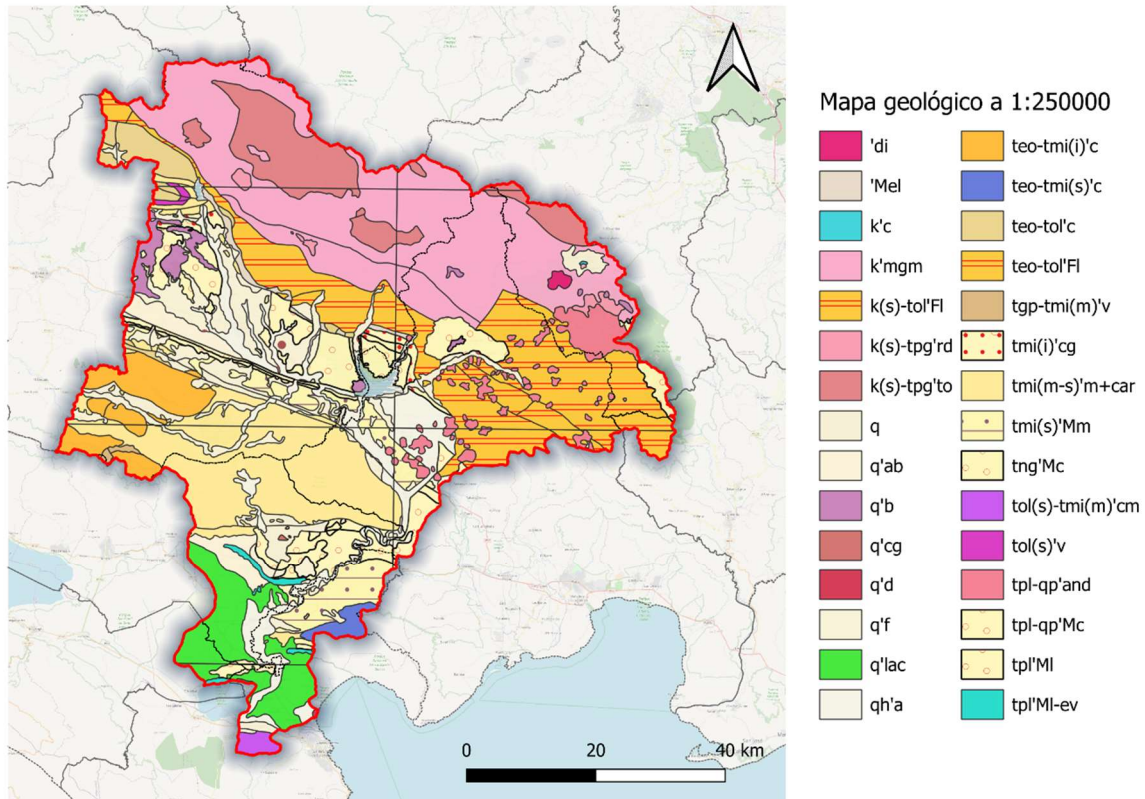


Ilustración 2: Mapa geológico de la cuenca del Yaque del Sur al 1:250000 (@SGN) – leyenda disponible en el informe BRGM/RC-74947-FR

En la isla de La Española, se pueden distinguir 14 unidades hidrogeológicas, entre las cuales, principalmente 4 se encuentran en la cuenca del río Yaque del Sur (Ilustración 3).

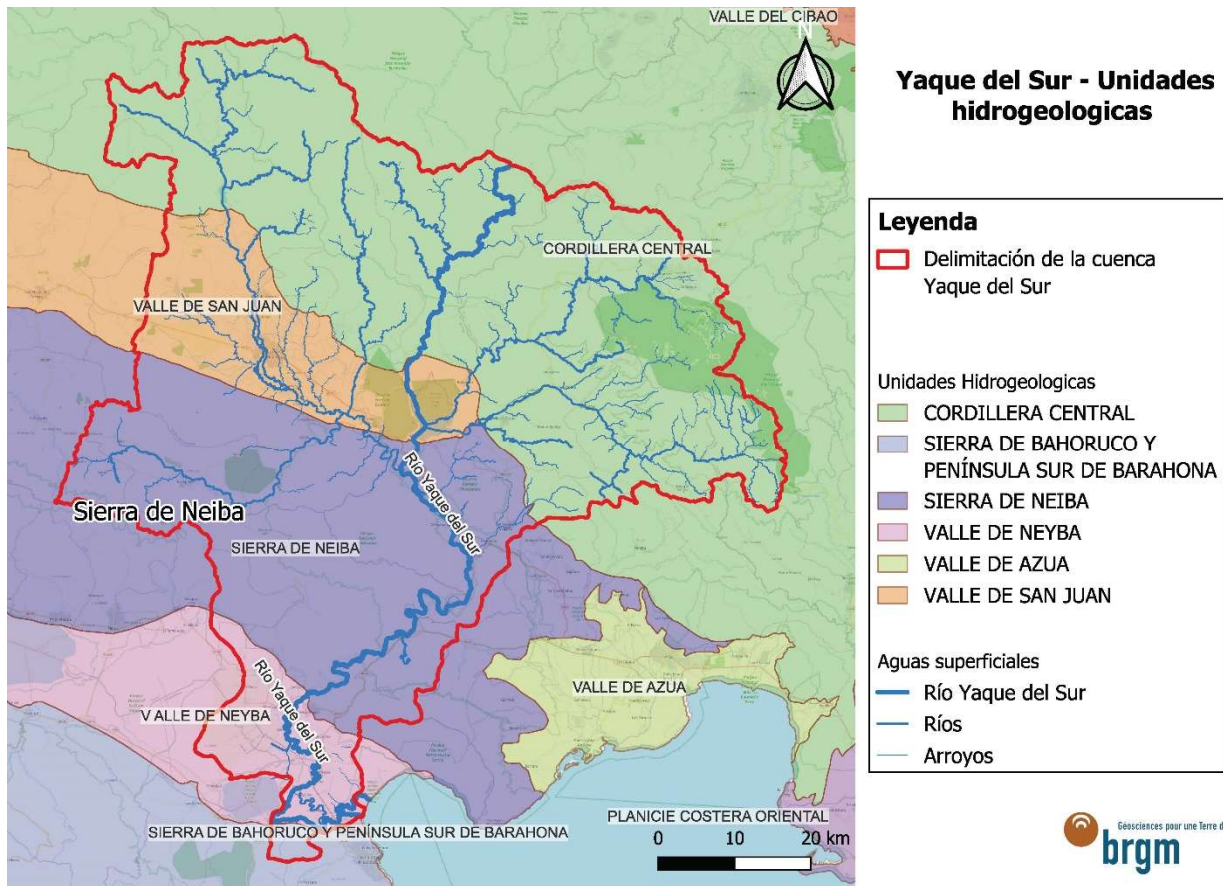


Ilustración 3: Unidades hidrogeológicas

La Unidad de la Cordillera Central está formada por la vertiente Sur de la Cordillera Central, con una orientación predominante NO-SE. Se trata de una unidad con un basamento geológico mayoritariamente básico. Estos materiales tienen un grado de permeabilidad bajo y, por lo tanto, de escasa importancia hidrogeológica. En la ladera de la cordillera se asientan depósitos de plataforma marina del Cretácico Superior, constituidos por calizas (que pueden dar lugar a acuíferos locales de cierta importancia con grados de permeabilidad generalmente medios) acompañadas de aportes terrígenos de permeabilidad menor. En el borde norte del Valle de San Juan, sector de la Loma de la Longaniza, la formación de caliza arrecifal detrítica del Eoceno-Mioceno, parece muy karstificada. Constituye un acuífero en su mayor parte libre. Su espesor está estimado a más de 500 m (INDRHI/EPTISA, 2004).

Numerosos ríos provienen de la Cordillera, acompañados de pequeños acuíferos detríticos de permeabilidades medias a altas, pero de extensión limitada. Sin embargo, en ciertos casos como en la región de Constanza, se desarrollan valles interiores que actúan como trampas topográficas e hidrogeológicas, donde los aluviones dan lugar a acuíferos libres en los que se localizan las mayores demandas.

El valle de San Juan es una cuenca de origen tectónico alargado según una dirección E-O. El relleno de la cuenca se compone de formaciones detríticas sobre grandes espesores. El estudio de INDRHI/Aquater menciona niveles piezométricos próximos de la superficie en el centro del valle, en donde la piezometría está estrictamente relacionada con los niveles de los ríos. El gradiente aumenta en los bordes por efecto de la recarga de las formaciones que constituyen las áreas de montaña, y se observan direcciones de flujo generalizadas en dirección del eje del valle.

La Sierra de Neiba es una unidad constituida, fundamentalmente, por materiales carbonatados que dan lugar a un acuífero de tipo kárstico con un grado de permeabilidad de medio a alto. El complejo volcánico-sedimentario de El Aguacate de Neiba, de permeabilidad más baja se inserta entre dos series carbonatadas. Por el borde sureste, la unidad presenta un límite totalmente abierto y en conexión hidráulica con los depósitos cuaternarios de la planicie de Azua. El sistema kárstico de la Sierra de Neiba, que se recarga por la infiltración directa de las precipitaciones, se descarga en numerosos manantiales o resurgencias de muro.

El Valle de Neiba corresponde a la parte con la altura más baja de la cuenca y el clima más seco. Las formaciones porosas de edad cuaternaria que ocupan la parte superficial del valle pueden ser acuíferos. Se considera que las calizas profundas de la formación de Barahona podrían ser acuíferas, aunque con aguas salinas. Sin embargo, cerca del contacto de falla con la unidad hidrogeológica Sierra de Neiba, aparecen manantiales de aguas profundas que se mezclan con aguas más superficiales. Es muy probable que las capas confinadas se alimenten desde la Sierra de Neiba.

2.3. MONITOREO DE LA CUENCA DEL YAQUE DEL SUR

La base de datos asociada a los mapas presentados incluye la totalidad de la información colectada y generada durante el proyecto, o sea, los datos históricos que provienen principalmente de las bases de datos del INDRHI y del INAPA y los datos adquiridos durante el proyecto. Se consideran las estaciones climatológicas y meteorológicas (INDRHI y INDOMET), las estaciones de seguimiento de caudal y calidad de los ríos y las estaciones de medición de los niveles y calidad de las aguas subterráneas. Las estaciones pueden ser activas (existen datos de 2023, 2024 y/o 2025), inactivas (sin datos recientes), cerradas (no se encontró la estación en el campo o el administrador de la estación indicó que la estación ya no está activa). Debido al gran número de variables (Ilustración 4) y a su rápida evolución en el tiempo, preparar un mapa en formato papel no se consideró adecuado. Se propuso para este tema un servicio web generado por el IGN que permite al usuario, en línea, activar y desactivar capas de información y exportar el resultado deseado.

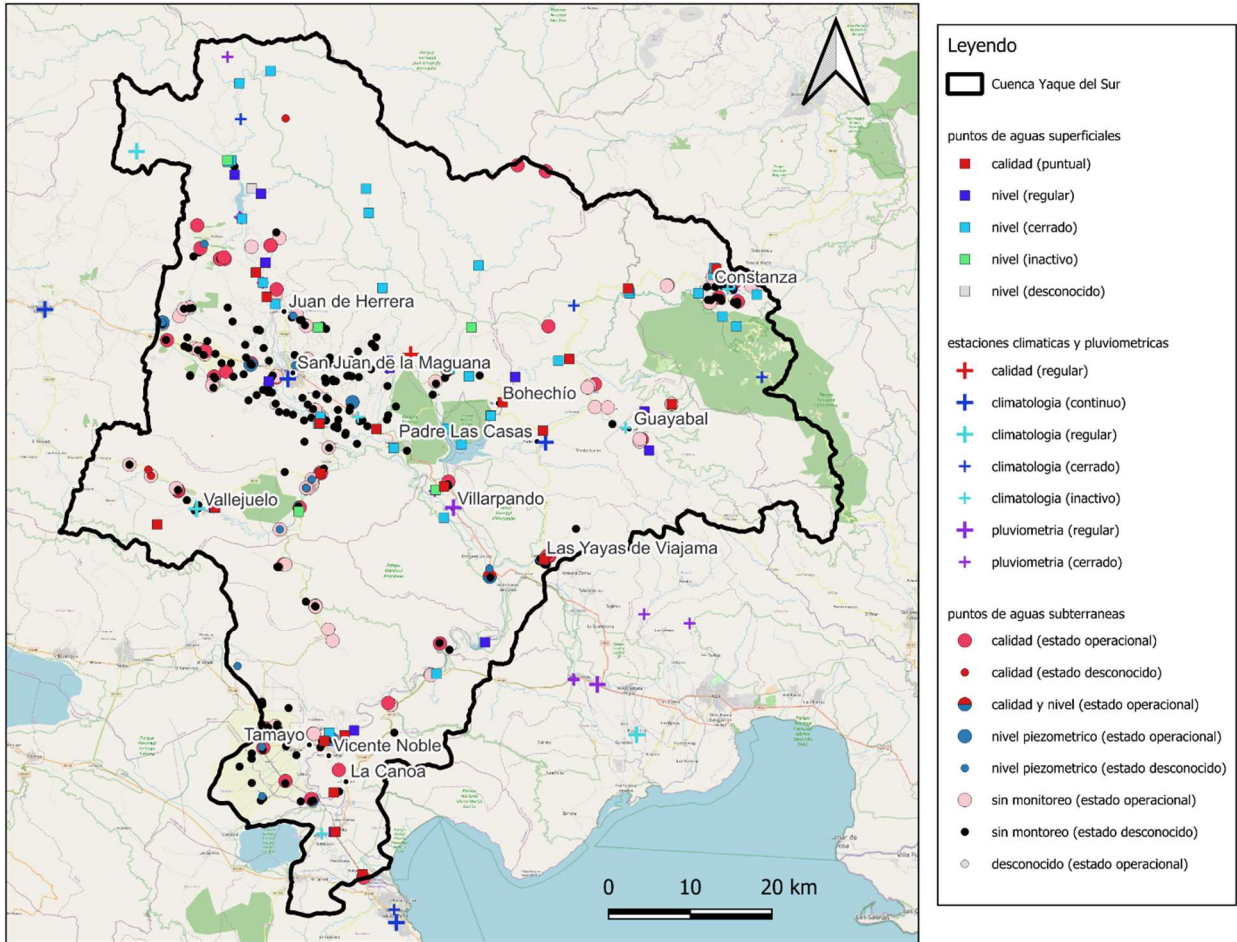


Ilustración 4: Puntos de monitoreo en la cuenca del Yaque del Sur

3. Calidad natural (fondos hidrogeoquímicos) del agua

3.1. METODOLOGIA

Los análisis del agua subterránea colectadas en la cuenca del Yaque del Sur dejan en evidencia valores altos en algunos elementos disueltos que pueden ser de origen natural, o sea, resultantes de la disolución de los minerales que forman los suelos y las rocas donde circulan las aguas.

La presencia de minerales disueltos en el agua en concentraciones superiores a las normas para consumo humano puede crear problemas para la gestión del recurso hídrico. Así, es importante conocer los sectores de la cuenca que podrían tener contenidos altos en sulfatos y flúor debido a la lixiviación de las rocas, llamado fondo hidrogeoquímico natural.

Algunos puntos de la cuenca presentan también valores de cloruro encima de las recomendaciones para el consumo humano, pero es un elemento también presente a menudo en las aguas por contaminación antrópica. Distinguir el origen natural del origen antrópico necesita estudios locales con adquisición de datos. El método propuesto aquí, a la escala de la cuenca, no se adapta entonces al estudio del cloruro.

Para determinar los sectores que podrían tener alto contenidos en fluoruro (F) y sulfato (SO₄) en las aguas subterráneas, hay que evaluar qué formaciones geológicas pueden contener minerales ricos en estos elementos.

El método utilizado fue desarrollado inicialmente para la exploración de recursos minerales, y es presentado por (Tourlière et al., 2015). El método se basa en la idea de asociar la alta presencia de un contaminante con un parámetro explicativo, en nuestro caso el tipo de litología del acuífero. Su implementación consiste en varias etapas:

1. Discretización del área de estudio: en nuestro caso, dividido en pequeñas entidades (mallas)
2. Elección de un valor umbral para la ausencia/presencia del contaminante
3. Identificación de las celdas que superan el valor umbral del contaminante
4. Asignación de puntuaciones para cada valor del parámetro explicativo (es decir, de la litología)
5. Predicción para todas las mallas de la zona de estudio que no cuentan con puntos de muestro de calidad del agua.

En la Ilustración 5 se presenta un caso práctico en la región de Yaque del Sur: la malla elegida es una malla hexagonal. Se elige una malla hexagonal para limitar los problemas de anisotropía generados por una malla cuadrada, al tiempo que se garantiza una cobertura completa del dominio de estudio. El tamaño de los hexágonos corresponde a un círculo circunscrito de 4 km. Este tamaño se eligió de manera que buscara un equilibrio entre el número de litologías diferentes presentes en las mallas y la representatividad de las celdas. Este punto delicado del método se puede encontrar detallado en la tesis de Vella, 2022.

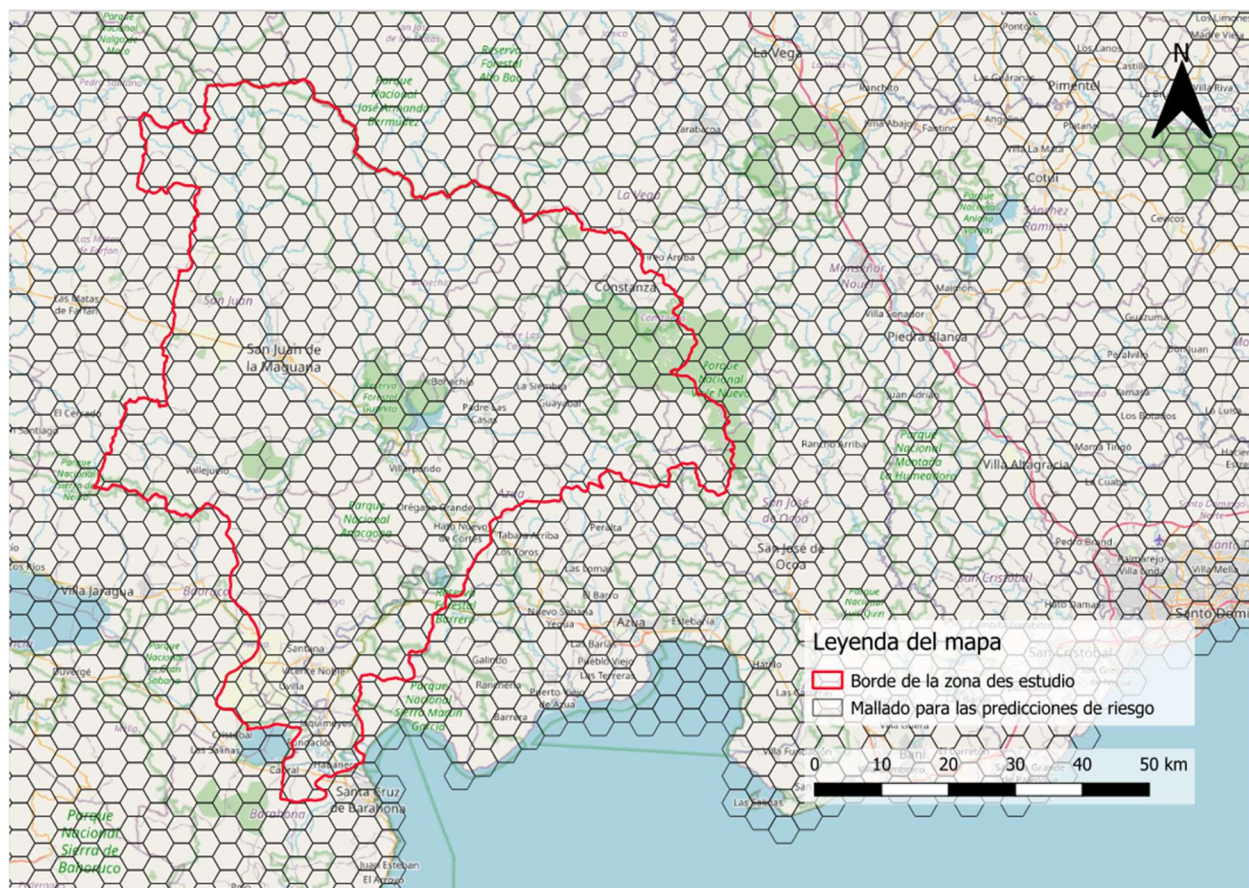


Ilustración 5: Ejemplo de mallado (o cuadrículado) utilizado para los mapas de fondo hidrogeoquímico en el Yaque del Sur

A cada litología diferente disponible se le asigna un código. Estas litologías proceden del mapa geológico a escala 1:250 000 (Ilustración 6).

LITO_1	SIGLAS_1	SISTEMA	SERIE	NOMBRE	LCODE	STRAT	LIT_STR
Calizas	tmi'c	Terciario	Mioceno	ENRIQUILLO	CALZ	MIO	CALZ-MIO
Indiferenciado	q	Cuaternario		ENRIQUILLO	ALL2	IND	ALL2-IND
Depósitos fluviales	q'f	Cuaternario		ENRIQUILLO	DFLU	IND	DFLU-IND
Calizas	teo-tol(m)'	Terciario	Eoceno-O	ENRIQUILLO	CALZ	EOO	CALZ-EOO
Marisma	qh'mr	Cuaternario		ENRIQUILLO	MARS	IND	MARS-IND
Calizas margosas	tol(s)-tmi(r)	Terciario	Oligoceno	ENRIQUILLO	CAMAR	OLM	CAMAR-OLM
Abanicos	q'ab	Cuaternario		ENRIQUILLO	ALLU	IND	ALLU-IND
Rocas volcánicas submarinas	tpg'v	Terciario	Eoceno-O	ENRIQUILLO	VSMR	EOO	VSMR-EOO
Calizas	tpl-qp'c	Terciario-C	Plioceno-F	LA GRANCHORRA	CALZ	PLP	CALZ-PLP
Dunas	q'd	Cuaternario		BANI	DUNA	IND	DUNA-IND
Calizas	tpl'MI	Terciario	Plioceno	BARAHONA	CALZ	PLI	CALZ-PLI
Flysch	teo-tol'FI	Terciario	Eoceno-O	BANI	FLSH	EOO	FLSH-EOO
Margas	tmi(m-s)'m	Terciario	Mioceno	BANI	MARG	MIO	MARG-MIO
Calizas	teo(i)'c	Terciario	Eoceno	BANI	CALZ	EOC	CALZ-EOC
Margas	tpl'm	Terciario	Plioceno	BANI	MARG	PLI	MARG-PLI
Yesos	tpl'MI-ev	Terciario	Plioceno	BARAHONA	YESO	PLI	YESO-PLI
Conglomerados	tmi(s)'Mm,	Terciario	Mioceno	BANI	CGT	MIO	CGT-MIO
Margas	tol'm+cg	Terciario	Oligoceno	BANI	MARG	OLG	MARG-OLG
Margas	k(s)'m+car	Cretácico	Cretácico	BANI	MARG	CRS	MARG-CRS
Conglomerados	teo'cg	Terciario	Eoceno	BANI	CGT	EOC	CGT-EOC
Areniscas	k(s)'ar	Cretácico	Cretácico	BANI	ARNC	CRS	ARNC-CRS
Calizas	teo-tmi(s)'	Terciario	Oligoceno	SABANA BUEY	CALZ	OLM	CALZ-OLM
Sedimentos lacustres	q'lac	Cuaternario		BARAHONA	SLAC	IND	SLAC-IND
Areniscas	tmi(s)'Mm	Terciario	Mioceno	AZUA	ARNC	MIO	ARNC-MIO
Calizas	tol(s)'c	Terciario	Oligoceno	SAN CRISTOBAL	CALZ	OLG	CALZ-OLG
Calizas	tpa'c	Terciario	Paleoceno	SAN CRISTOBAL	CALZ	PEO	CALZ-PEO
Areniscas	teo'ar	Terciario	Eoceno	SAN CRISTOBAL	ARNC	EOC	ARNC-EOC
Conglomerados	k(s)'gc	Cretácico	Cretácico	SAN CRISTOBAL	CGT	CRS	CGT-CRS
Tonalita	k(s)-tpg'to	Cretácico-	Cretácico	SAN CRISTOBAL	TONA	PEO	TONA-PEO
Conglomerados poligénicos	tpl-qp'Mc	Terciario-C	Plioceno-F	NEIBA	CGT	PLP	CGT-PLP
Rocas magmáticas	k'mgm	Cretácico	Cretácico	SAN CRISTOBAL	RMAG	CRT	RMAG-CRT
Sedimentos marinos	q'c	Cuaternario		JIMANI	SMAR	IND	SMAR-IND
Arenisca	tol(s)-tmi(i)	Terciario	Oligoceno	AZUA	ARNC	OLM	ARNC-OLM
Basaltos	q'b	Cuaternario		AZUA	BSLT	IND	BSLT-IND
Conglomerados	q'cg	Cuaternario		NEIBA	CGT	IND	CGT-IND
Gabros	'g			SAN CRISTOBAL	GABB	IND	GABB-IND
Granito	k(s)-tpg'gr	Cretácico-	Cretácico	SAN CRISTOBAL	GRAN	PEO	GRAN-PEO
Calizas margosas	tmi(m)'cm	Terciario	Mioceno	NEIBA	CAMAR	MIO	CAMAR-MIO
Rocas volcánicas submarinas	tpg-tmi(m)	Terciario	Eoceno-O	NEIBA	VSMR	TER	VSMR-TER
Traquiandesitas	tpl-qp'and	Terciario-C	Plioceno-F	AZUA	TRAN	PLP	TRAN-PLP
Piroxenitas	'pi			SAN CRISTOBAL	UB	IND	UB-IND
Gabros-Norititas	'no			SAN CRISTOBAL	GANO	IND	GANO-IND
Calizas	k(s)'c	Cretácico	Cretácico	SAN PEDRO DE MACORIS	CALZ	CRS	CALZ-CRS
Rocas volcano-sedimentarias	k(s)'v-s	Cretácico	Cretácico	LA ROMANA	VSED	CRS	VSED-CRS
Rocas volcano-sedimentarias	teo'v-s	Terciario	Eoceno	LA ROMANA	VSED	EOC	VSED-EOC
Esquistos verdes	k'mgm-esv	Cretácico	Cretácico	SANTO DOMINGO	SCHST	CRT	SCHST-CRT
Esquistos	'esq.v-s			MONTE PLATA	SCHST	IND	SCHST-IND
Riodacita-Riolita	k(s)-tpg'rd	Cretácico-	Cretácico	EL SIEBO	RDAC	PEO	RDAC-PEO
Calizas	k(i)'-c	Cretácico	Cretácico	MONTE PLATA	CALZ	CIF	CALZ-CIF
Melange Tectónico	'Mel			CONSTANZA	MILO	IND	MILO-IND
Calizas	k'c	Cretácico	Cretácico	MONTE PLATA	CALZ	CRT	CALZ-CRT
Dioritas	'di			BONAO	DIOR	IND	DIOR-IND
Flysch	k(s)-tol'FI	Cretácico-	Cretácico	CONSTANZA	FLSH	PEO	FLSH-PEO
Anfibolitas	k'mgm-ani	Cretácico	Cretácico	BONAO	AMPH	CRT	AMPH-CRT
Flysch	k(s)'-FI	Cretácico	Cretácico	LAS LISAS	FLSH	CRS	FLSH-CRS
Rocas volcánicas-submarinas	tol(s)'v	Terciario	Oligoceno	SAN JUAN	VSMR	OLG	VSMR-OLG
Esquistos micáceos	'esq-ml			SAMANA	SCHMC	IND	SCHMC-IND
Mármol	'ml			SAMANA	MRML	IND	MRML-IND
Conglomerados	tol(m-s)'ar	Terciario	Oligoceno	LA VEGA	CGT	OLG	CGT-OLG
Limolitas calcáreas	tng'l+ar	Terciario	Mioceno-F	LA VEGA	CARN	MIP	CARN-MIP
Andositas	tol(s)'and	Terciario	Oligoceno	SALCEDO	ANDES	OLG	ANDES-OLG
Conglomerados	tmi(i)-tpl'D	Terciario	Mioceno-F	LA ISABELA	CGT	MIP	CGT-MIP
Olistostroma	q'Ols	Cuaternario		PUERTO PLATA	OLST	IND	OLST-IND

Ilustración 6: Tabla que resume el conjunto de litologías encontradas para el mapa de la cuenca

A continuación, el valor umbral de presencia se fija en 100 mg/L para el sulfato y 1 mg/L para el flúor. Así, se filtran las mallas que contienen un resultado de análisis superior al valor umbral y

se identifican las litologías contenidas en cada una de esas mallas. A partir del número de ocurrencias de cada litología en cuestión, se calcula una puntuación, de modo que, para cada elemento considerado, SO₄ y F, se obtiene una tabla de puntuaciones para cada litología (Ilustración 7).

Número de malla	ALL2-IND	ALLU-IND	ARNC-MIO	CALZ-CRT	CALZ-PLI	CGT-IND	CGT-PLP	DFLU-IND	FLSH-EOO	MARG-MIO	RMAG-CRT	SLAC-IND	TRAN-PLP
HX-238	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
HX-239	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
HX-271	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
HX-306	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
HX-329	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
HX-599	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
HX-652	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Total de mallas afectadas	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	1	1	1
Puntuaciones total	0.57	0.57	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.57	0.14	0.29	0.14	0.14	0.14

Ilustración 7: ejemplo de tabla de puntuaciones para cada litología

Por ejemplo, en el caso de los conglomerados indiferenciados (CGT-IND), dos mallas superan el umbral de 100 mg/l, por lo que la puntuación asignada a esta litología es de:

$$\text{Número de mallas afectadas por la litología} / \text{número total de mallas en exceso} = 2/7 = 0,29$$

Para la predicción en cada malla, se observan las litologías contenidas y se suma la puntuación de cada litología presente, obteniendo así una puntuación (y no una probabilidad) correspondiente. La Ilustración 8 muestra de forma simple el cálculo en el caso de esta malla.

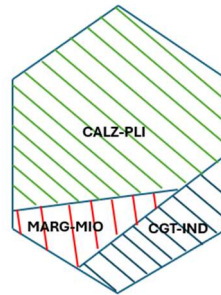


Ilustración 8: Ejemplo del cálculo de la puntuación para las mallas que se van a predecir

Por lo tanto, la puntuación de esta malla es de 0,29 (MARG-MIO)+0,14(CGT-IND)+ 0,14(CALZ_PLI) = 0,57.

3.2. SULFATOS

El sulfato (SO₄) es un elemento mayoritario en las aguas subterráneas que tiene como origen dominante los aportes geogénicos (provenientes de la meteorización de las rocas) con posibilidades de aportes atmosféricos en las áreas industriales, de mar y la niebla marina en las zonas costeras y de los efluentes mineros. En la cuenca del Yaque del Sur, los estudios hidrogeoquímicos (Gourcy et al., 2025) muestran que el origen dominante es geogénico. Los acuíferos que contienen evaporitas (por ejemplo, yeso o anhidritas), los acuíferos cristalinos o sedimentarios (ricos en minerales como piritita, arsenopiritita) son los más favorables a tener altas concentraciones en sulfatos en sus aguas.

En la Cuenca del Yaque del Sur las concentraciones en SO₄ van de 1 hasta 1008 mg.l⁻¹. La norma para agua potable en el país es de 400 mg.l⁻¹, lo que significa que en algunos sectores de

la cuenca no sería posible consumir directamente el agua extraída de los acuíferos. Sin embargo, si se excluyen las aguas termales, no se identificó ningún sector de la cuenca con valores de sulfatos por encima de la norma nacional. De este modo, la información sobre el fondo geogénico en sulfato solo queda disponible en el proyecto SIG.

El método utilizado en la cuenca del Yaque muestra Ilustración 9 que las aguas en el borde sur del valle de San Juan, en el borde norte de la Sierra de Neiba, así como al este de la Sierra de Neiba, son los sectores con mayores posibilidades de concentraciones altas en sulfatos (Ilustración 9). Estos sectores se caracterizan por la presencia de facies litorales, molasa marina y caliza arrecifal. En este caso, el factor explicativo del alto contenido en sulfato se asocia a la influencia marina. Sin embargo, no se descarta que la influencia antrópica pueda ser también un factor importante en el alto contenido en sulfatos en algunas aguas ya que la presión urbana y agrícola puede ser fuerte en algunas zonas como mostrado en el capítulo 4.4.

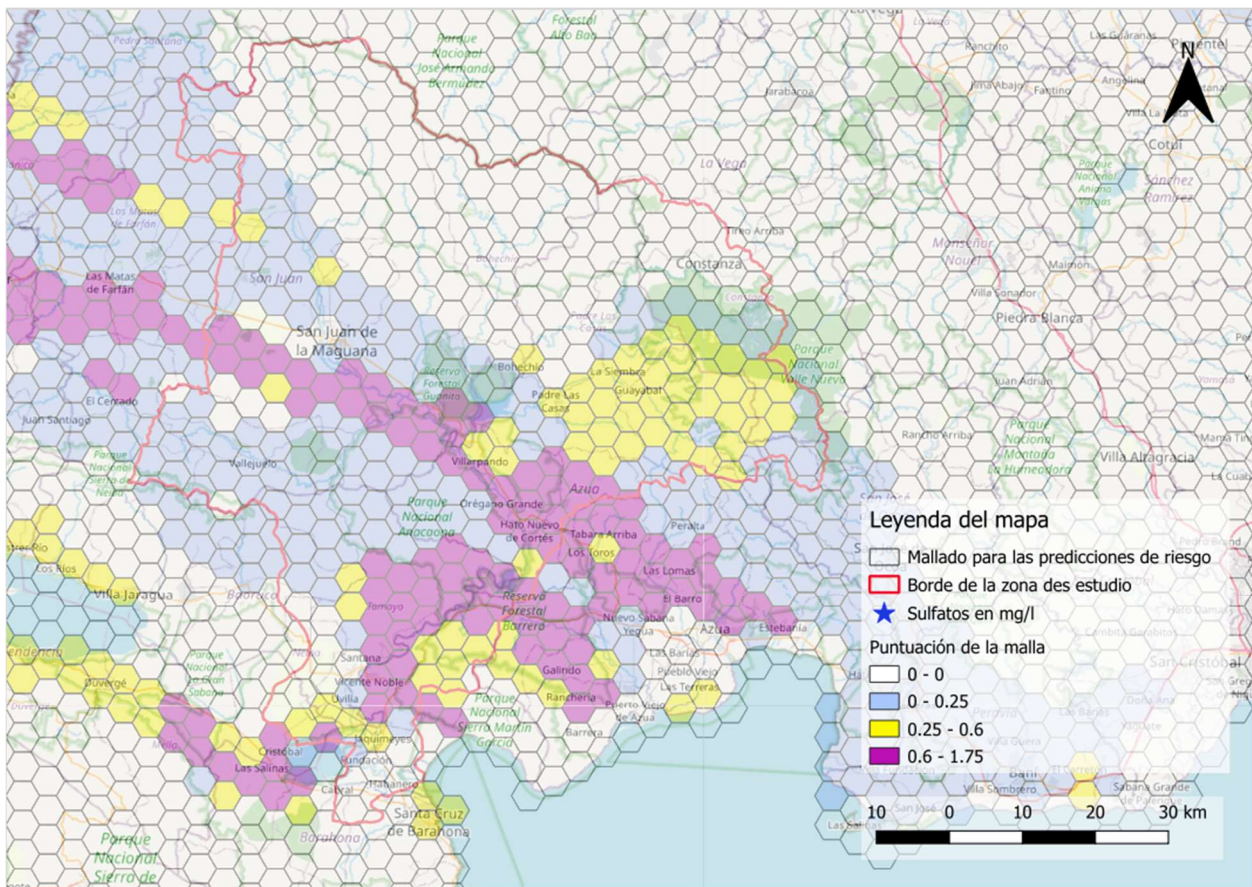


Ilustración 9: Vista sintética de los sectores que tienen una puntuación más alta para el SO₄ en las aguas subterráneas de la cuenca

3.3. FLUORURO

Sólo un elemento traza, el fluoruro (F), tiene valores en unos sectores de la cuenca por encima del valor de 1,5 mg/L recomendado por la Organización mundial de la salud (OMS) para el consumo humano. El consumo de agua con exceso de flúor puede crear problemas para la salud humana. En la cuenca del Yaque del Sur, el origen del flúor es predominantemente natural (fondo hidrogeoquímico alto) domina. En la cuenca del Yaque del Sur, el origen natural (fondo hidrogeoquímico alto) domina. Los minerales conocidos como ricos en F son fluorita, criolita y fluorapatita. Estos minerales son comunes en rocas volcanoclásticas, y en rocas de la corteza

profunda y aguas termales. Las plantas y los suelos también pueden contener altas concentraciones de fluoruro.

El F aumenta a lo largo de las líneas del flujo en el acuífero, o sea, las concentraciones tienden a aumentar entre mayor es el tiempo de residencia del agua que circula en el subsuelo. En la cuenca del Yaque del Sur las concentraciones en F van de 0,1 hasta 2,5 mg/L. Uno de los puntos con más alto contenido en F es el de las aguas termales en La Sourza (punto_2032 de la base de datos del proyecto, formación Sombreritos (margas, calizas).

Los otros puntos con concentraciones por encima de 1,5 mg/L están en el sector Tamayo en formaciones de basaltos vacuolares y brechas volcánicas (formación Neiba) (puntos_2044, 2045, 2054). Las aguas de Guanarate (punto_2044) son ligeramente termales y los habitantes no la utilizan para consumo debido al alto contenido en fluoruro.

Otros puntos en el oeste y noroeste de San Juan de la Maguana (puntos_2004, 2007, 2012, 2014), con concentraciones superiores a 0,8 mg/L, están en formaciones de basaltos alcalinos, en abanicos de aluviones, y en conos de deyección de la vertiente Sur de la Sierra de Neiba.

La metodología aplicada en la cuenca par el fluoruro, resalta, de manera general, los mismos sectores que fueron identificados para los sulfatos (Ilustración 10).

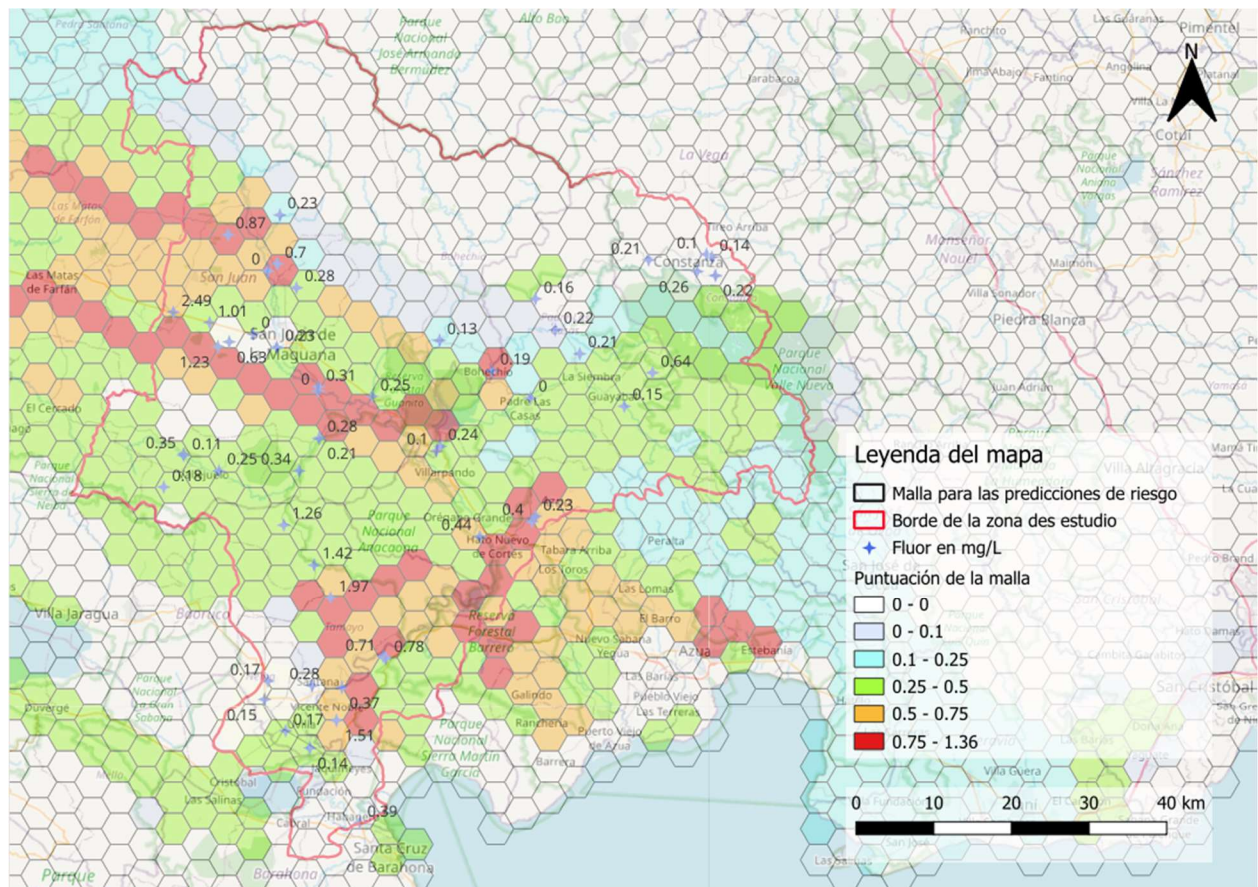


Ilustración 10: Vista sintética de los sectores con mayores puntuaciones para el fluoruro en las aguas subterráneas de la cuenca (y concentraciones de F medidas en 2024-2025)

3.4. LIMITES DEL METODO

La escala de trabajo, al 1:250000 y el número limitado de mediciones de concentraciones en las aguas subterráneas son dos de los factores limitantes del estudio. Para identificar con mayor precisión las fases minerales (litofacies) que más aportan F y/o SO₄ al agua, hubiera sido necesario utilizar mapas geológicos a escala 1:50000 y disponer de puntos de monitoreo en unidades geológicas distintas de la cobertura cuaternaria superficial, constituida por abanicos aluviales, terrazas, gravas y arenas.

También es relativamente delicado relacionar la presencia de elementos químicos disueltos con la litología local ya que no disponemos de los perfiles de los pozos (lo que impide conocer los niveles captados), pero también porque muchos pozos están localizados en formaciones cuaternarias, compuestas de mezclas de rocas que provienen de formaciones aguas arriba.

3.5. PRESENTACION DEL MAPA SOBRE FLUORUROS

Es necesario utilizar con cuidado la información presentada en el mapa final (Ilustración 11) por las razones descritas en el capítulo anterior.

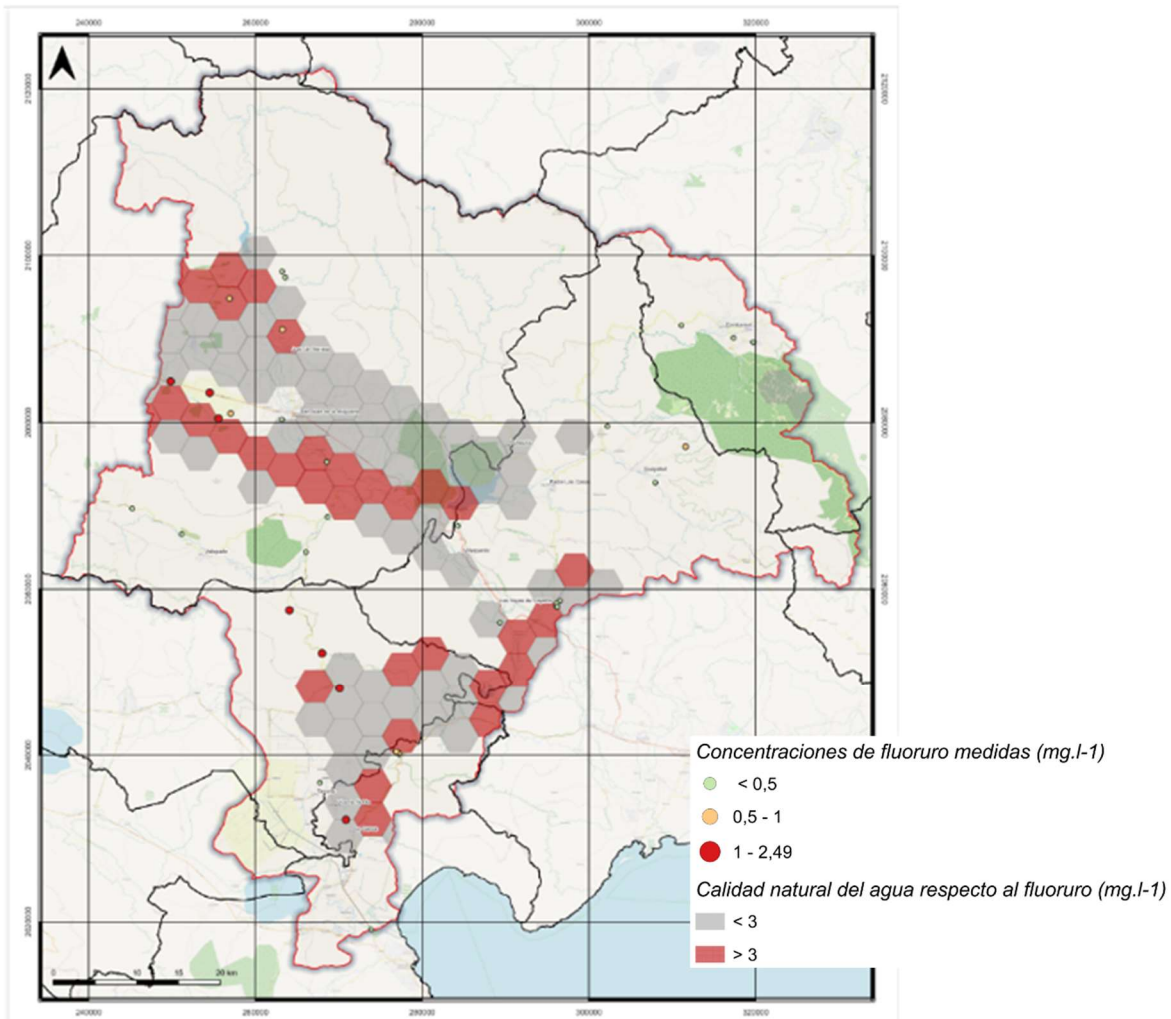


Ilustración 11: Vista preliminar del mapa de la calidad predictiva del agua respecto al fluoruro

En el mapa se presentan los puntos de monitoreo que permitieron la realización de este trabajo, es decir, los valores máximos de concentraciones en F medidas en los puntos de aguas subterráneas presentados en la Ilustración 12. Los valores permitiendo estos cálculos se encuentran en la base de datos del proyecto. El mapa solo representa los sectores con la puntuación más alta (de color rojo y rosado en la Ilustración 10).

NBD	Codigo_Punto	Comunidad	Y	X	Z	F
ID0029	102	Constanza	18.911976	-70.716238	1214	0.14
ID0031	104	Constanza	18.895353	-70.7340622	1196	0.26
ID0032	105	Constanza	18.890768	-70.711709	1237	0.22
ID0033	106	Constanza	18.915366	-70.722892	1262	0.1
ID0034	107	Constanza	18.908168	-70.793529	1308	0.21
ID0035	110	Padre las Casas	18.861538	-70.931458	943	0.16
ID0036	111	Padre las Casas	18.798176	-70.876589	996	0.21
ID0038	114	Guayabal	18.73765	-70.821506	763	0.15
ID0041	118	Fondo Negro	18.442412	-71.112455	103	0.71
ID0045	122	Las Yayas de Viajama	18.602637	-70.932974	320	0.4
ID0046	125	Las Yayas de Viajama	18.584238	-70.996384	229	0.44
ID0047	126	Canoa	18.688651	-71.045588	349	0.24
ID0048	130	Buena Vista	18.812156	-71.0482292	489	0.13
ID0052	135	Vallejuelo	18.674547	-71.358828	715	0.11
ID0056	138	Jorjillo	18.637406	-71.3828404	839	0.18
ID0053	141	Vallejuelo	18.67595	-71.3592361	712	0.35
ID0105	142	Las Yayas de Viajama	18.608524	-70.928534	230	0.23
ID0025	2002	Maguana	18.955455	-71.245277	680	0.23
ID0060	2004	Guayabal de San Juan	18.931661	-71.308373	655.7	0.87
ID0063	2007	Punto Caña	18.841065	-71.374152	469.6	2.49
ID0068	2012	San Juan de maguana	18.829401	-71.329508	453.8	1.01
ID0070	2014	Barranca	18.801584	-71.319064	474.5	1.23
ID0073	2017	Barranca	18.807276	-71.305233	451.4	0.63
ID0075	2020	Juan de Herrera	18.898769	-71.247785	454	0.7
ID0076	2021	San Juan de Maguana	18.816827	-71.276097	379.1	
ID0078	2023	San Juan de Maguana	18.801361	-71.247042	385.9	0.23
ID0081	2026	Rincon abajo	18.756295	-71.195457	351.4	0.31
ID0082	2030	Habanero	18.249222	-71.138795	1	0.39
ID0085	2034	Mena arriba	18.335407	-71.200362	25.5	0.14
ID0086	2035	Santa Barbara (batey 6)	18.354821	-71.23039	25.9	0.17
ID0087	2036	Batey 4	18.39107	-71.256496	-10.8	0.15
ID0088	2037	Tamayo	18.407624	-71.198733	17.7	0.28
ID0091	2041	Batey 3	18.4124	-71.252733	21	0.17
ID0026	2044	Guanarate	18.510549	-71.177621	186.2	1.97
ID0094	2045	El Granado	18.548818	-71.198068	259.4	1.42
ID0098	2049	Pueblo Nuevo	18.696518	-71.193903	385.1	0.28
ID0101	2053	El Capa	18.658165	-71.217731	449.8	0.34
ID0102	2054	Cabeza de Toro	18.595003	-71.235719	401.3	1.26

Ilustración 12: Valores máximo de F (en mg.l⁻¹) medido en las aguas subterráneas en 2024-2025

4. Vulnerabilidad del recurso a la contaminación antrópica

4.1. METODOLOGIA

Algunos elementos disueltos en el agua provienen principalmente de la actividad humana, como por ejemplo en el Yaque del Sur con el caso del nitrato (NO_3) y de los pesticidas. El nitrato suele proceder de las aguas residuales en los centros urbanos y de la agricultura (fertilizantes minerales, orgánicos y ganadería). El mapa de la vulnerabilidad del recurso hídrico a la contaminación antrópica construida considera únicamente las fuentes de contaminación de origen agrícola. Sin embargo, para una visión completa sería necesario añadir la información sobre la conexión de los habitantes a una red de alcantarillado y la eficiencia de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales.

En la cuenca del Yaque del Sur, las aguas subterráneas presentan mayores concentraciones de nitratos debido a la acumulación de este contaminante en el acuífero. En cambio, las aguas superficiales se benefician del efecto de dilución por el agua de lluvia. Las concentraciones en las aguas subterráneas varían desde valores inferiores al límite de detección hasta $127,6 \text{ mg.l}^{-1}$.

La presión agrícola es confirmada por la presencia de pesticidas en las aguas. El análisis de 238 moléculas en algunos puntos de agua puso en evidencia la presencia de varios pesticidas en concentraciones superiores a las recomendaciones de la OMS, alcanzando niveles de hasta $0,1 \mu\text{g/L}$ en el valle de Constanza.

Para evaluar el efecto de la presión agrícola sobre la calidad de las aguas subterráneas en términos de nitratos y de pesticidas, se necesita caracterizar la capacidad del contaminante para llegar hasta el agua subterránea, así como estimar la importancia de la presión ejercida en el suelo. Estas dos informaciones se combinan para poder evaluar la presión significativa sobre el recurso hídrico (Ilustración 13).



Ilustración 13: Esquema de la metodología aplicada para evaluar la presión significativa sobre el recurso hídrico subterráneo

4.2. PRECISAR LA PRESION

La presión agrícola está estimada a partir de los cultivos de la zona. Los cultivos están extraídos del mapa de Uso y Cobertura del suelo del MIMARENA, actualizado en 2022 (Ilustración 14).

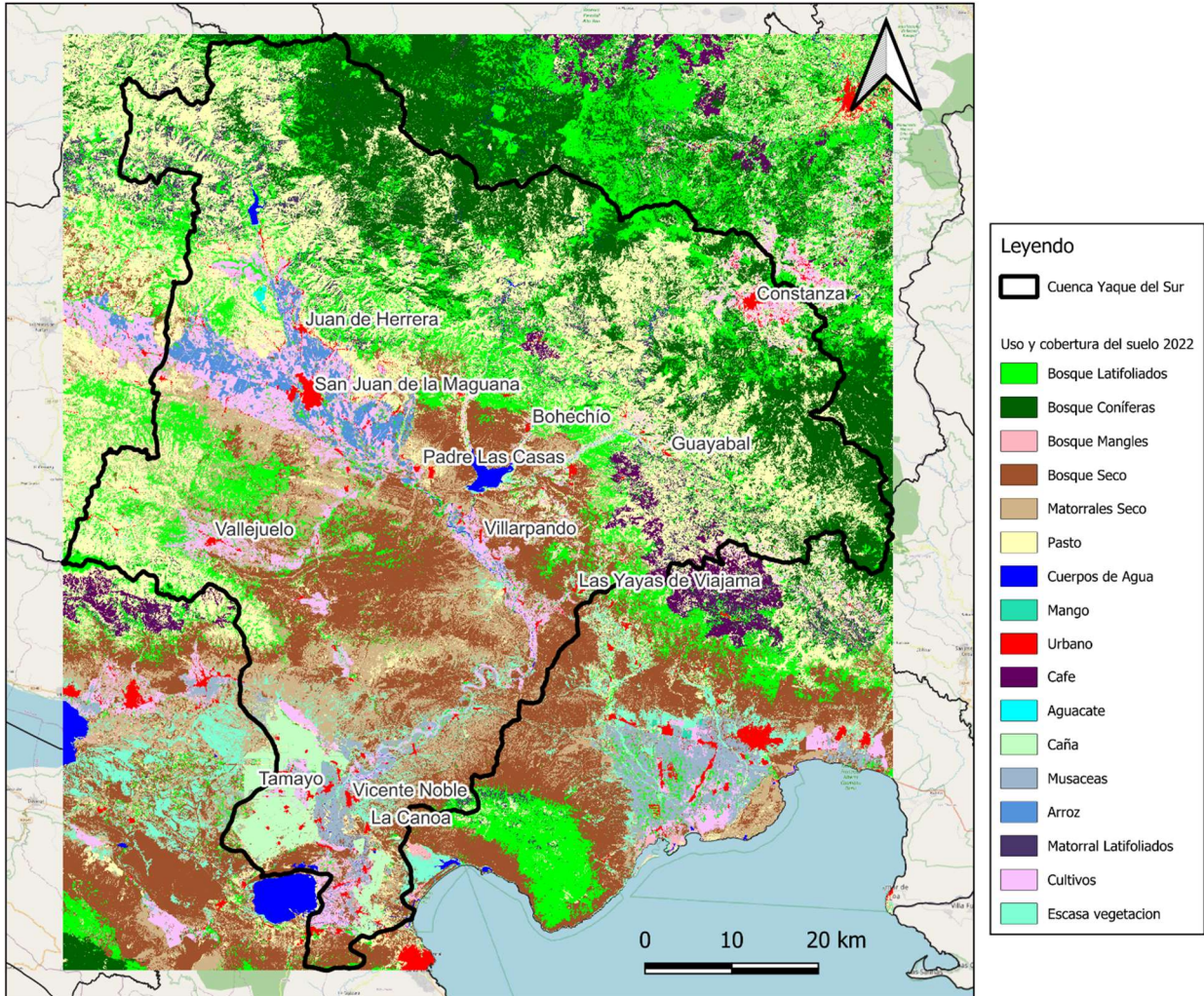


Ilustración 14: Mapa de Uso y Cobertura del suelo (@MIMARENA, 2022)

A partir de datos de la literatura sobre las prácticas agrícolas de la zona, complementada con conocimientos agronómicos generales e información contextual propia de la cuenca estudiada y de una experiencia en agronomía en los Caribes se pudo establecer notas de riesgo entre 1 (riesgo muy bajo) y 10 (riesgo alto) para los principales cultivos de la zona (Ilustración 15).

Para los principales cultivos de la zona (Ilustración 15), se estableció una nota de riesgo entre 1 (riesgo muy bajo) y 10 (riesgo alto), basándose en datos de la literatura sobre las prácticas agrícolas de la zona; complementada con conocimientos agronómicos generales, información contextual propia de la cuenca estudiada y de una experiencia de los expertos del BRGM en agronomía en los Caribes. La Asociación Sur Futuro aportó su experiencia en las prácticas actuales y permitió ajustar, en los casos necesarios, las notas establecidas inicialmente.

Una primera serie de notas se propuso partiendo de los conocimientos adquiridos en las Antillas francesas (Bessiere y Surdyk, 2017), y luego se reajustó en la medida de lo posible a partir de

datos obtenidos de la literatura científica. La búsqueda bibliográfica incluyó referencias procedentes de la República Dominicana y, cuando fue posible, de la zona de estudio.

Se realizó una reunión en diciembre de 2025 con los socios del proyecto para presentar las notas a actores locales. La mayoría de las notas propuestas fueron validadas, aunque algunas de ellas fueron reevaluadas en concertación con los actores locales. La divergencia más significativa se presentó en los casos del café y del plátano. En estos casos, las notas iniciales se consideraron demasiado altas, ya que se basaban en cultivos con alto potencial de rendimiento destinados a la exportación, mientras que la zona estudiada también incluye otros sistemas de producción, según los expertos locales.

A continuación, se presentan de manera detallada las notas asociadas a diferentes tipos de uso y cobertura de los suelos.

Pastos y Bosque

Las categorías «pastos y bosque» y «pastos» reciben una nota baja de riesgo de nitratos (nota=1), debido a su baja fertilización.

También presentan un riesgo limitado por pesticidas (nota=1), reflejando una protección fitosanitaria restringida.

Arroz

El arroz presenta un riesgo alto de nitratos (nota=8), debido a la alta intensidad de fertilización nitrogenada necesaria para alcanzar rendimientos elevados. De igual manera, el carácter inundado de este cultivo, que favorece la transferencia de nitrógeno al sistema hídrico, tiene un peso considerable en la asignación de la nota. Esta evaluación se basa principalmente en Cox et al. (2019) y Bonilla et al. (2019), que destacan el papel de las cadenas de producción intensivas y las prácticas de fertilización.

El cultivo de arroz también está asociado a un alto riesgo de productos fitosanitarios (nota=8), debido a que los suelos fértiles y las condiciones húmedas favorecen el desarrollo de malezas y enfermedades. Por esta razón, el uso de insecticidas y herbicidas es frecuente (Cote et al, 2011).

Verduras y frutas

Los cultivos de verduras y frutas presentan el riesgo máximo de nitratos y productos fitosanitarios (nota=10). Esto se debe a su alta demanda de nitrógeno, la repetición frecuente de aportes en sistemas de rotación corta y el uso intensivo de riego, lo que favorece la lixiviación de nitratos.

Estas plantas también son muy sensibles a plagas y enfermedades y requieren numerosos tratamientos (insecticidas, fungicidas y herbicidas). Sin embargo, las prácticas agrícolas en la República Dominicana parecen estar más controladas que a finales de los años 1990, especialmente para cumplir con las normas de exportación (Barzman, 1994).

Caña de azúcar

La caña de azúcar se clasifica con un riesgo intermedio de nitratos (nota=6), debido a la gran variabilidad de las prácticas de fertilización según los objetivos de rendimiento (Kwong y Deville, 1994).

El riesgo por pesticidas también es intermedio (nota=6). La caña está expuesta a malezas durante la implantación o regeneración, pero consume relativamente pocos pesticidas durante todo el ciclo.

El carácter duradero del cultivo y el desarrollo del sistema radicular limitan el potencial de lixiviación, justificando una nota inferior a la de los cultivos hortícolas.

Musáceas (banano, plátano, guineo)

Las musáceas (banano) presentan un riesgo moderado de nitratos (nota=4). Existe una gran variabilidad en las prácticas de fertilización y protección fitosanitaria según la explotación (Gonçalves y Kernaghan, 2014).

El riesgo fitosanitario también es moderado (nota=5). Las musáceas son sensibles a enfermedades fúngicas, pero la presión fitosanitaria varía según las prácticas agrícolas. Algunas parcelas reciben una protección limitada, especialmente las que no se destinan a la exportación o se producen de manera orgánica. La República Dominicana es, de hecho, un país líder en este mercado (Damiani, 2002; Reynolds, 2008).

Café

El cultivo de café presenta un riesgo bajo de nitratos (nota=2). En la cuenca estudiada, esta evaluación se basa en observaciones locales que muestran una predominancia de pequeñas explotaciones con un uso limitado de agroquímicos y necesidades reducidas de fertilización. Esta distribución también se observa a nivel nacional: más del 80 % de los productores tienen explotaciones de menos de 6,3 hectáreas, que representan aproximadamente el 26 % de la superficie agrícola total, mientras que menos del 3 % de los productores con más de 63 hectáreas concentran cerca del 50 % de las tierras agrícolas (FIDA, 2010).

El riesgo por productos fitosanitarios también es bajo (nota=2). Aunque algunas grandes explotaciones puedan usar pesticidas de manera inapropiada (Hutter et al., 2018), los expertos locales indican que, en la cuenca estudiada, los usos son moderados y adecuados a la predominancia de pequeñas parcelas (FIDA, 2010).

Aguacate

El aguacate se clasifica con un riesgo moderado de nitratos (nota=4). La fertilización suele ser moderada (Bonilla, 1993), pero puede aumentar significativamente a partir de los seis años, lo que incrementa el riesgo de lixiviación.

El riesgo por productos fitosanitarios también es medio (nota=5). Las infestaciones de plagas y enfermedades son limitadas, pero se requieren tratamientos puntuales según la edad de las parcelas y las condiciones locales.

Hoy en día las superficies de aguacate en la zona son limitadas, pero presentan una fuerte expansión.

Cultivo	Nota de riesgo - nitrato	Nota de riesgo - pesticidas
Pastos y bosque	1	1
Arroz	8	8
Pastos	2	1
Verduras/frutas	10	10
Caña de azúcar	6	6
Musaceas	4	5
Café	2	2
Aguacate	4	5

Ilustración 15: Notas de presión para el nitrato y los pesticidas

4.3. CARACTERIZAR LA MOBILIDAD DEL CONTAMINANTE

La capacidad del suelo y subsuelo a infiltrar y a dejar pasar los contaminantes está establecida mediante el método del IDPR (capítulo 5.2).

La combinación de la capa de la capacidad del suelo para favorecer la infiltración (notas entre 0, infiltra mucho y 10 sin infiltración en el mapa de la izquierda en la Ilustración 16) con la puntuación de presión por nitratos o pesticidas (los dos mapas de la derecha en la Ilustración 16) permite obtener la presión significativa de origen agrícola sobre las aguas subterráneas. La presión está reportada a la misma escala que el mapa de uso y cobertura del suelo para no perder en precisión.

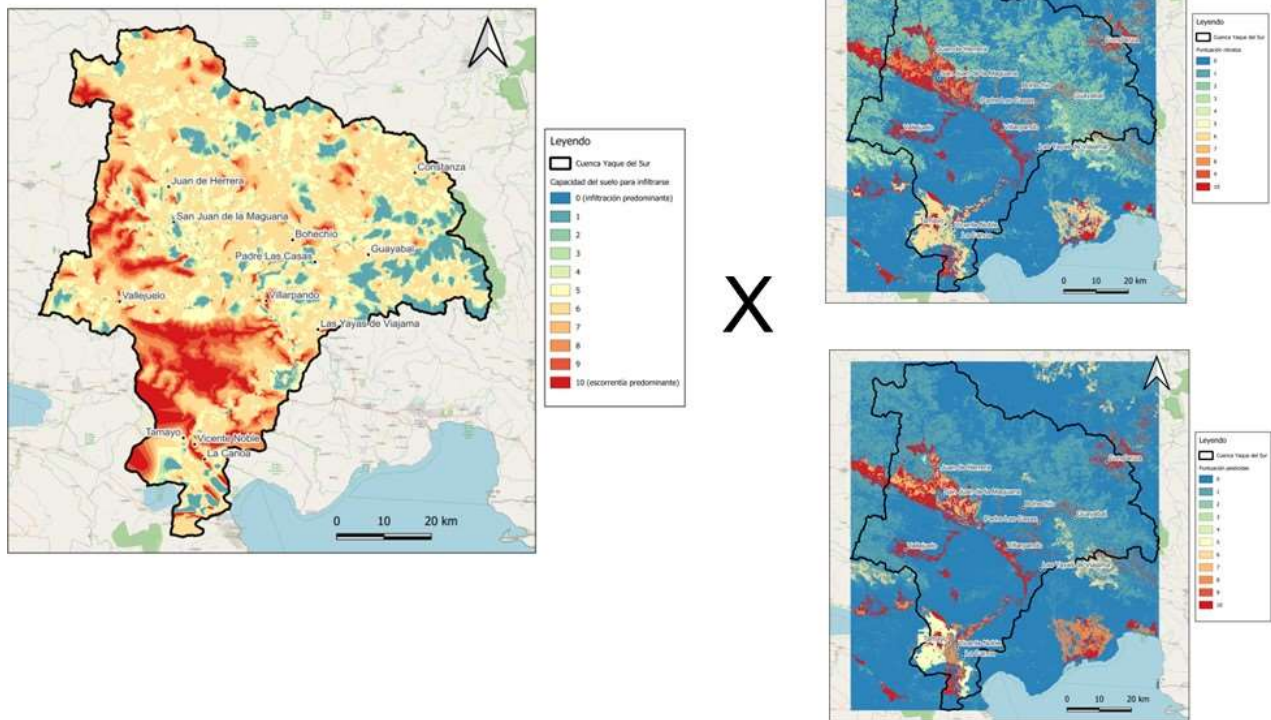


Ilustración 16: Combinación entre el índice IDPR (capacidad del suelo a infiltrar) y la presión en nitrato y pesticidas

4.4. MAPAS DE PRESIÓN SIGNIFICATIVAS SOBRE EL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO

Los mapas de presión significativa, para nitratos (Ilustración 17) como para pesticidas (Ilustración 19), ponen claramente en evidencia los sectores de mayor riesgo de contaminación antrópica de las aguas. El valle de Constanza presenta concentraciones en algunos pesticidas superiores al $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$ y valores de nitratos por encima de la norma europea de 50mg.l^{-1} (en rojo en la Ilustración 18). En esta zona, los pesticidas que presentan concentraciones por encima de la norma de $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$, son: B.A.M., mancozeb, metalaxyl, metoxifenoazida, metolaclo, tiametoxam.

El valle de San Juan y Vallejuelo, con cultivo de verduras y arroz, y el sur de la cuenca que tiene principalmente musáceas y caña de azúcar para exportación, presentan algunas concentraciones en nitrato superiores a 25mg.l^{-1} (valor de riesgo para la directiva marco del agua europea, en naranja en la Ilustración 18). La zona del valle de Neiba, aunque tenga una presión potencial fuerte, no presenta valores altos en nitratos y pesticidas porque la recarga de los acuíferos se hace principalmente desde la Sierra de Neiba, zona con baja presión.

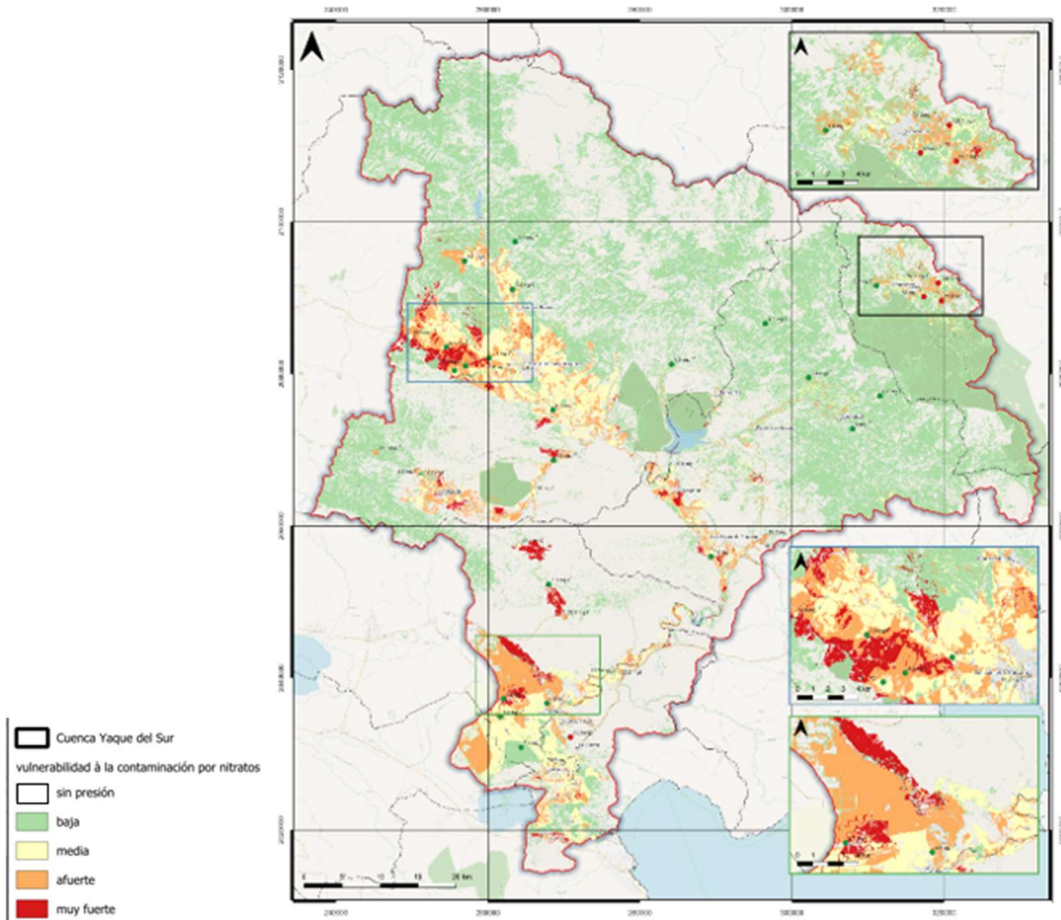


Ilustración 17: Vista preliminar del mapa de presión significativa en nitrato de origen agrícola en las aguas subterráneas.

En el mapa de presión significativa en nitrato se añaden las concentraciones máximas en NO_3 (en mg.l^{-1}) medidos en las aguas subterráneas durante el periodo 2024-2025 (Ilustración 18).

NBD	Codigo_Punto	Comunidad	Y	X	NO3
ID0029	102	Constanza	18.911976	-70.716238	127
ID0031	104	Constanza	18.895353	-70.7340622	53
ID0032	105	Constanza	18.890768	-70.711709	72.4
ID0033	106	Constanza	18.915366	-70.722892	32.3
ID0034	107	Constanza	18.908168	-70.793529	1.9
ID0035	110	Padre las Casas	18.861538	-70.931458	4.3
ID0036	111	Padre las Casas	18.798176	-70.876589	3.4
ID0037	112	Guayabal	18.777073	-70.7874813	6.6
ID0038	114	Guayabal	18.73765	-70.821506	5
ID0039	116	Fondo Negro	18.440282	-71.1091799	23.9
ID0041	118	Fondo Negro	18.442412	-71.112455	11.5
ID0045	122	Las Yayas de Viajama	18.602637	-70.932974	32.7
ID0046	125	Las Yayas de Viajama	18.584238	-70.996384	7.5
ID0047	126	Canoa	18.688651	-71.045588	11.8
ID0048	130	Buena Vista	18.812156	-71.0482292	1.8
ID0052	135	Vallejuelo	18.674547	-71.358828	14.2
ID0056	138	Jorjillo	18.637406	-71.3828404	39.4
ID0053	141	Vallejuelo	18.67595	-71.3592361	6.6
ID0105	142	Las Yayas de Viajama	18.608524	-70.928534	28.2
ID0025	2002	Maguana	18.955455	-71.245277	3.7
ID0060	2004	Guayabal de San Juan	18.931661	-71.308373	9.6
ID0063	2007	Punto Caña	18.841065	-71.374152	11.5
ID0068	2012	San Juan de maguana	18.829401	-71.329508	5.8
ID0070	2014	Barranca	18.801584	-71.319064	9.1
ID0073	2017	Barranca	18.807276	-71.305233	4.4
ID0075	2020	Juan de Herrera	18.898769	-71.247785	9.2
ID0076	2021	San Juan de Maguana	18.816827	-71.276097	2.1
ID0078	2023	San Juan de Maguana	18.801361	-71.247042	27.6
ID0081	2026	Rincon abajo	18.756295	-71.195457	5.3
ID0082	2030	Habanero	18.249222	-71.138795	17.3
ID0083	2032	La Canoa	18.367732	-71.168649	56.9
ID0085	2034	Mena arriba	18.335407	-71.200362	12.3
ID0086	2035	Santa Barbara (batey 6)	18.354821	-71.23039	7.4
ID0087	2036	Batey 4	18.39107	-71.256496	8.3
ID0088	2037	Tamayo	18.407624	-71.198733	4.6
ID0091	2041	Batey 3	18.4124	-71.252733	4.2
ID0026	2044	Guanarate	18.510549	-71.177621	29.9
ID0094	2045	El Granado	18.548818	-71.198068	6.1
ID0098	2049	Pueblo Nuevo	18.696518	-71.193903	9.6
ID0101	2053	El Capa	18.658165	-71.217731	12
ID0102	2054	Cabeza de Toro	18.595003	-71.235719	12.5

Ilustración 18: Concentraciones máximas en nitrato (en mg.l⁻¹) medidas en las aguas subterráneas de la cuenca del Yaque del Sud en 2024-2025

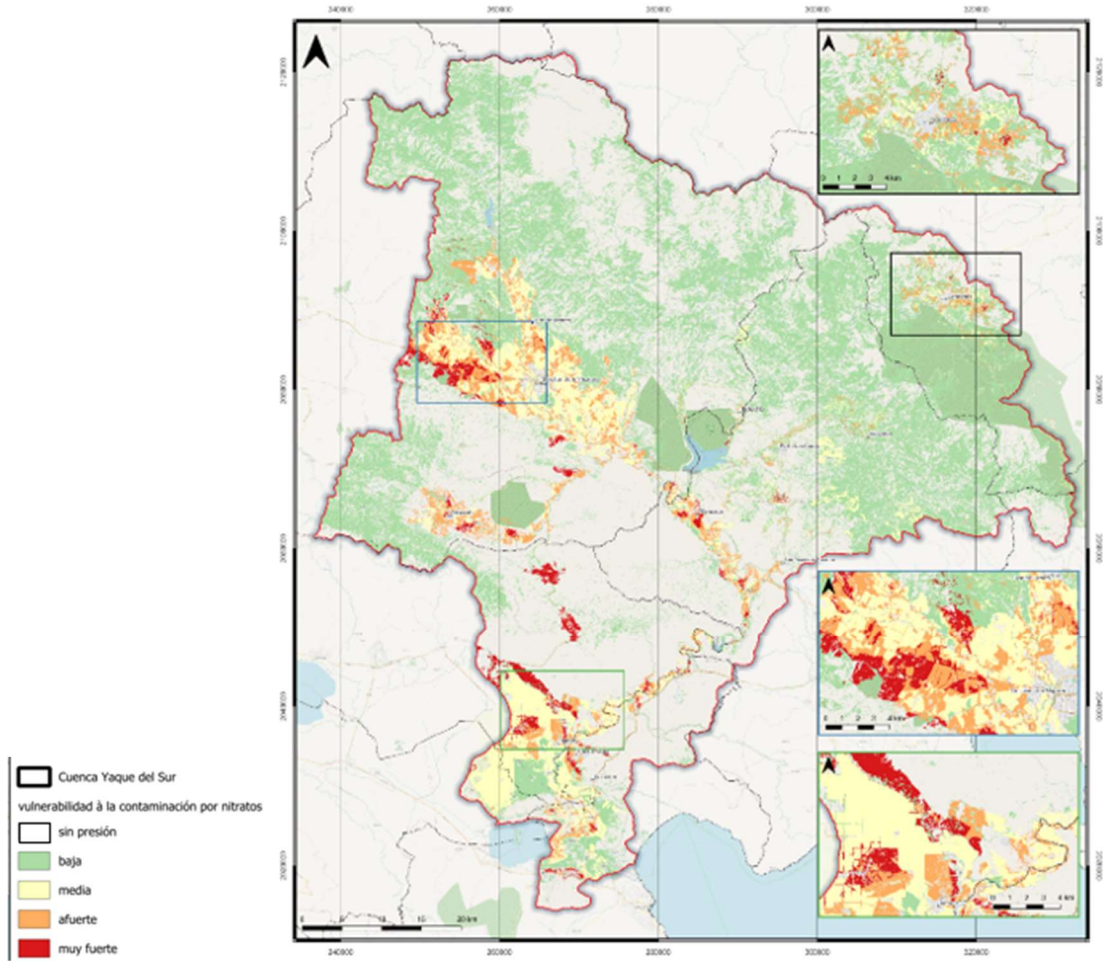


Ilustración 19: Vista preliminar de la presión significativa en pesticidas de origen agrícola en las aguas subterráneas.

5. Potencial hidrogeológico

5.1. CONTRUCCION DEL MAPA DEL POTENCIAL HIDROGEOLOGICO

Elaboración del mapa

Con el fin de disponer de un documento cartográfico en forma de SIG a una escala adecuada para el estudio, se ha elaborado un mapa del potencial hidrogeológico de la cuenca del río Yaque del Sur, a partir de los siguientes elementos:

- Los mapas hidrogeológicos existentes:
 - o Mapa hidrogeológico, Escala 1:500 000, INDRHI 1989
 - o Mapa hidrogeológico, Escala 1:250 000, Barahona y Azua, INDRHI 1989
 - o Mapas del Estudio Hidrogeológico Nacional (INDRHI/AQUATER, 2000)
 - o Mapas del Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana Fase II (INDRHI/EPTISA, 2004)
- Los mapas geológicos del SGN de la zona de estudio, Escala 1:50 000 y sus notas.
- La síntesis de la información sobre la transmisividad realizada para el informe BRGM/RC-74947-FR
- Los datos de campo obtenidos durante las misiones, descritos en el informe BRGM/RC-74947-FR: observaciones de nivel de agua, descarga de pozo, fuentes y manantiales, en relación con la naturaleza de las capas geológicas, pruebas de bombeo y registros de pozo (Ilustración 20).



Ilustración 20: Observaciones de campo (@Delaunay)

Cada polígono de los mapas geológicos a escala 1/50 000 se ha clasificado según su potencial acuífero teórico en una escala del 1 al 6 (Ilustración 21) por dos hidrogeólogos que han realizado misiones de campo. En total, se clasificaron 420 polígonos basándose en su descripción geológica y en las observaciones de campo, cuando estas estaban disponibles. En el caso de las calificaciones que diferían entre un hidrogeólogo y otro, la diferencia era generalmente de uno o dos puntos y a menudo estaba relacionada con una diferencia de apreciación entre los códigos 3 a 6, que representan potenciales medios a altos, mientras que el consenso era mucho

más frecuente en los potenciales bajos o muy bajos. Las calificaciones que presentaban diferencias se debatieron entre expertos hidrogeólogos con el fin de obtener una lista validada.

Tipo de acuífero	Código
Acuífero poroso - Potencial alto	6
Acuífero poroso - Potencial moderado	5
Acuífero fracturado o kárstico - Potencial Alto	4
Acuífero fracturado o kárstico - Potencial Moderado	3
Formaciones geológicas - Bajo potencial	2
Formaciones geológicas - Muy bajo potencial	1

Ilustración 21 : Clasificación de los acuíferos

La ventaja de este método es que la agregación de clases ha suavizado la mayor parte de las incoherencias que aparecían en la unión de los mapas geológicos a escala 1:50 000 producidas por el Servicio Geológico Nacional (SGN). Las formaciones geológicas que se cortaban en el límite del mapa, y eran sustituidas por otra designación en el mapa vecino, se han armonizado, salvo por algunos detalles que han requerido retoques manuales.

Así, el mapa del potencial acuífero de la cuenca del río Yaque del Sur conserva los detalles de los contornos geológicos de la cartografía a escala 1/50 000 del SGN, pero agrupa estas formaciones en cuatro clases de potencial hidrogeológico: muy bajo, bajo, moderado y alto.

Como es habitual en este tipo de mapas, los símbolos representan el tipo de acuífero: sedimentario con porosidad intergranular, medio fisurado, zócalo, acuífero volcánico.

Uso y limitaciones del mapa de potencial acuífero

El mapa del potencial acuífero de la cuenca del Yaque del Sur es una herramienta cartográfica para representar espacialmente la aptitud del territorio para la presencia, almacenamiento y explotación de las aguas subterráneas. Su utilización es fundamental en estudios preliminares y en la planificación de recursos hídricos.

El mapa de potencial acuífero permite identificar zonas favorables para la localización de pozos y perforaciones, contribuyendo a reducir el riesgo de perforaciones fallidas y los costos asociados. Por lo tanto, no es un mapa que permite localizar la ubicación precisa de una perforación porque eso necesita generalmente un estudio geofísico, o por lo menos estudios de detalle. Sin embargo, el mapa de potencial permite la priorización de sectores para estudios geofísicos e hidrogeológicos detallados.

Este mapa constituye también una herramienta de apoyo para la gestión sostenible de los acuíferos, la planificación territorial y sectorial (abastecimiento de agua potable, agricultura, industria) porque se puede utilizar para definir zonas estratégicas para la seguridad hídrica. Se puede considerar como una base cartográfica para la formulación de políticas de gestión de agua o la elaboración de modelos numéricos para apoyar la toma de decisiones. Puede servir también a la preparación de mapas de aptitud a la recarga artificial para aumentar localmente el potencial acuífero.

El mapa representa un potencial relativo y no garantiza la presencia ni el caudal de agua subterránea. No puede considerar la heterogeneidad y anisotropía de los acuíferos. Así, de manera excepcional se podría encontrar pozos de alta capacidad en zonas clasificadas en potencial bajo.

Por supuesto, el mapa de potencial acuífero tiene una componente subjetiva que depende de los criterios utilizados para atribuir una clasificación. Esta clasificación y la precisión del mapa depende directamente de la disponibilidad, resolución y actualidad de los datos utilizados.

No sustituye los estudios de campo, tales como perforaciones exploratorias, ensayos de bombeo y estudios geofísicos. El mapa tiene que ser un documento dinámico (sistema de información geográfica) donde la integración de nuevos datos y estudios pueda contribuir a confirmar o modificar el presente resultado.

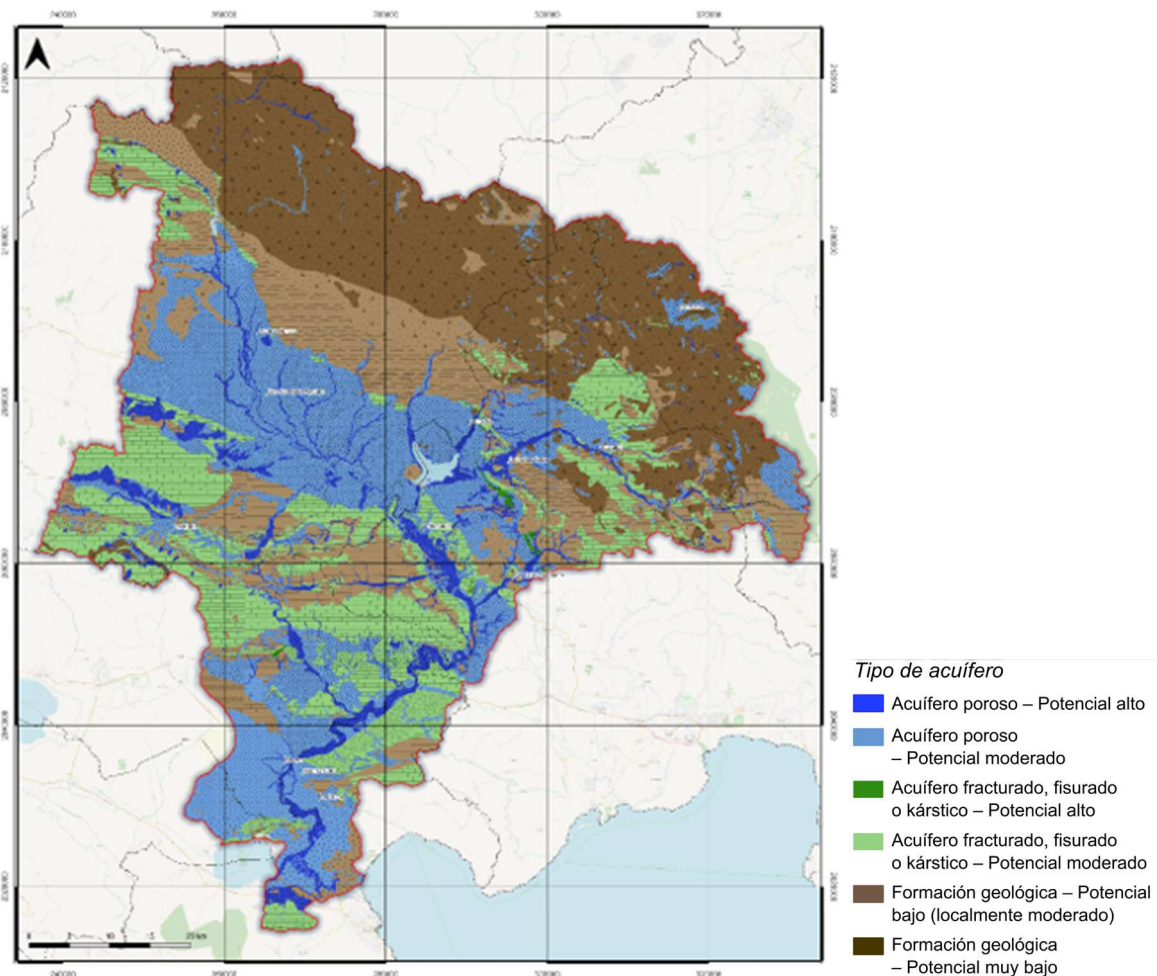


Ilustración 22: Vision preliminar del mapa de potencial hidrogeológico

El mapa de potencial hidrogeológico está editado en dos formatos. El A1 contiene el mapa principal y un cartucho con la piezometría del valle de San Juan que está descrito en el informe BRGM/RC-74947-FR (Gourcy et al., 2025). El formato A0 tiene además del mapa principal el mapa de la lluvia efectiva, el mapa de la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia y el mapa del IDPR detallados en el capítulo 5.2.

5.2. MAPAS QUE ACOMPAÑAN EL MAPA DE POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO EN FORMATO A0

Principio de la estimación de la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia

Para estimar la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia es necesario definir la lluvia efectiva o sea la lluvia que se infiltra, mientras que la otra parte se pierde por evapotranspiración o alimenta la red hidrográfica superficial, mediante escorrentía o flujos subterráneos (Ilustración 23).

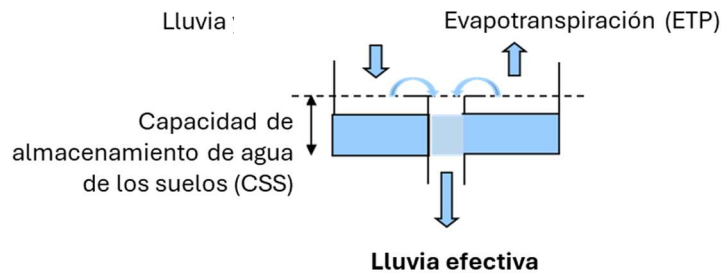


Ilustración 23: Principio del cálculo de la lluvia efectiva.

La metodología adoptada para estimar esta recarga a escala de la subcuenca hidrográfica ha sido adaptada de Robelin et al., 2026. Consiste, en primer lugar, en realizar un balance hídrico del suelo en cada celda de una cuadrícula que cubre toda la zona de estudio, teniendo en cuenta los datos meteorológicos y la cobertura del suelo. La lluvia efectiva así calculada a escala de la malla se agrega a continuación a escala de la unidad hidrogeológica (media espacial) y se le aplica un coeficiente de infiltración para deducir la recarga potencial a esa escala (Ilustración 24 Ilustración 24: Principio de los cálculos necesarios para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos).

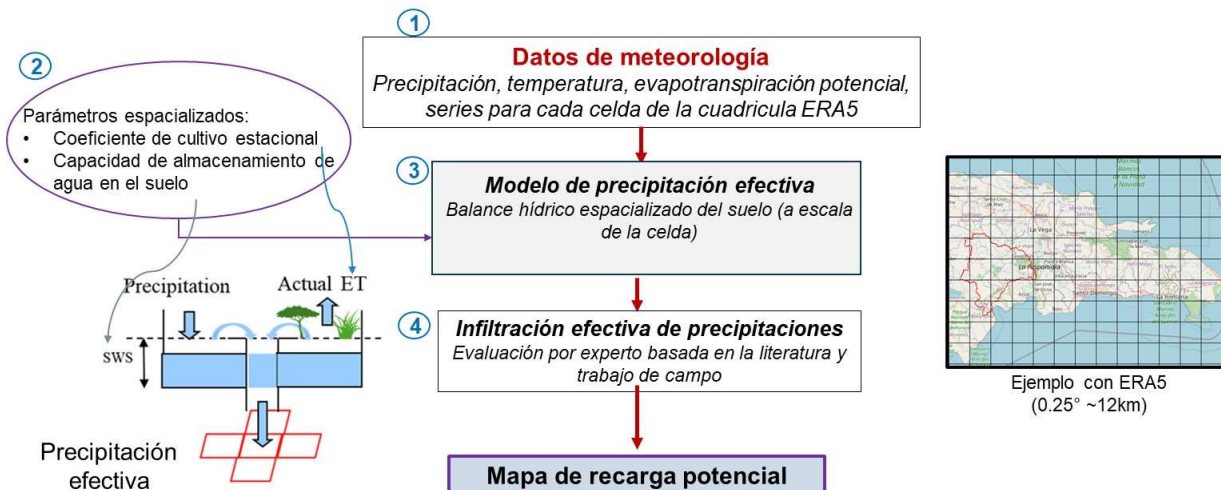


Ilustración 24: Principio de los cálculos necesarios para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos.

Para minimizar la incertidumbre relacionada con la selección del modelo de balance hídrico y su parametrización, se utilizan tres fórmulas diferentes para calcular la lluvia efectiva diaria (Thornthwaite, 1948; Edijatno et Michel, 1989; Dingman, 2002). El resultado final se obtiene calculando la media de las tres crónicas obtenidas.

Mapa de la lluvia efectiva

Los datos meteorológicos necesarios para realizar el cálculo espacializado de la lluvia efectiva son los registros diarios de precipitaciones, temperatura y evapotranspiración potencial para cada una de las mallas de la cuadrícula. Para las precipitaciones y la temperatura, se utilizaron los datos de reanálisis ERA5 con una resolución de 0,25° (Hersbach et al, 2023). Para cada celda, se calculó el registro de evapotranspiración potencial (ET₀) a partir del registro de temperatura aplicando la fórmula de Hamon (1963).

La evapotranspiración de referencia (ET₀) corresponde a la cantidad máxima de agua que puede evaporarse de un suelo cubierto por una vegetación de referencia. Para tener en cuenta la cubierta vegetal o la ocupación real de los suelos, se adopta la metodología propuesta por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración real (Allen et al., 1998), introduciendo un coeficiente de cultivo (K_c) que varía a lo largo del año según las fases de desarrollo de los vegetales, y que se amplía a los suelos desnudos o urbanizados. De esta forma, la evapotranspiración potencial ETP que interviene en las fórmulas de cálculo del balance hídrico del suelo es igual a K_c*ET₀.

Al cruzar los datos del mapa de uso y cobertura del suelo (MIMARENA, 2022) y la evolución del índice de superficie foliar (Leaf Area Index, LAI₁), se pueden identificar las diferentes fases fenológicas de la vegetación y los cultivos presentes en la zona de estudio. Al combinar estas observaciones con los valores de los coeficientes de cultivo recopilados por Allen et al. (1998), se pueden generar mapas de evolución estacional de los K_c (Ilustración 25) que se utilizarán para calcular la lluvia efectiva.



Ilustración 25: Evolución estacional de los K_c en la república dominicana

Para el cálculo de la lluvia efectiva es necesario conocer la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo (*soil-water storage capacity*, CCS). En este caso se usó un valor medio de 100 mm sobre la cuenca, coherente con los datos del atlas de los suelos del Caribe (Gardi et al., 2015).

El mapa de la lluvia efectiva calculada y asignada en “zonas homogéneas” se encuentra en la Ilustración 26. Las zonas homogéneas fueron construidas a partir del mapa hidrogeológico a escala 250 000 y las subcuencas hidrográficas.

Mapa de la recarga potencial de los acuíferos por la lluvia

Para representar espacialmente la recarga se delimitan unidades homogéneas que tienen sentido desde el punto de vista hidrogeológico.

¹ Datos del satélite MODIS/Terra a una resolución de 500 m, valores agregados sobre 8 días.

Partimos de los mapas geológicos a escala 1/50 000. Para cada unidad geológica, en función de la litología, definimos cuatro clases, de forma muy similar a la metodología aplicada para el mapa del potencial hidrogeológico:

- Muy poco infiltrante
- Poco infiltrante
- Infiltrante
- Muy infiltrante

Clase : Muy poco infiltrante

Se trata de afloramientos de capas muy poco permeables como las rocas volcánicas o volcanoclasticas masivas de la formación Tireo, así como de arcillas y rocas duras de la Cordillera, donde la pendiente favorece la escorrentía. Como no hay acuíferos significativos, salvo las zonas fisuradas dentro de estas formaciones poco permeables, la recarga debe ser muy baja a pesar de las abundantes lluvias en la cordillera.

Clase: Poco Infiltrante

Se trata de capas con baja permeabilidad como las lutitas y las margas y calizas de la formación Sombrero, las alternancias de calizas tableadas, margocalizas y margas de la formación de Neiba, las calizas masivas de la formación El Numero, tobas y brechas de la formación Tireo.

Clase: Infiltrante

Se trata de formaciones permeables como areniscas de la formación Trinchera, arenas de la formación Quita Coraza o alternancias de arenas con otras litologías.

Clase: muy infiltrante

Reúne a los detríticos gruesos, y material aluvial, como los que se encuentran en las formaciones Arroyo Blanco, Arroyo seco del Valle de Neiba o los conglomerados y arenas de la formación del rio Yaque del Sur o de la formación Ocoa, los aluviones del Valle de San Juan. La ubicación de esas litologías en zonas llanas favorece la infiltración.

Estas clases son, evidentemente, una fuerte simplificación de la realidad, pero, a falta de una aproximación mejor, permiten proponer una distribución de la recarga en la cuenca.

El cruce del mapa de clases de infiltración con el mapa de lluvia efectiva calculado anteriormente da como resultado un mapa de la recarga potencial.

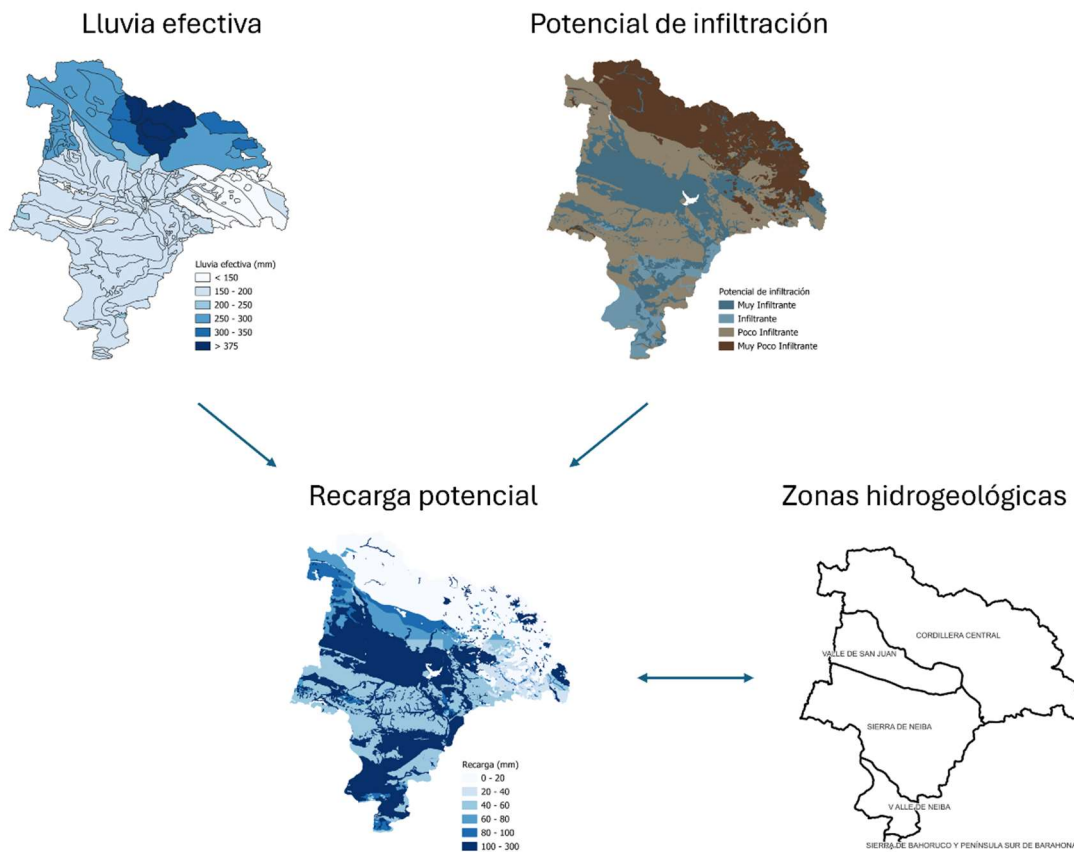


Ilustración 26: Construcción del mapa de la recarga potencial

La asignación de los coeficientes de infiltración, que expresan el porcentaje de lluvia efectiva (o útil) que participa en la recarga de los acuíferos, se realizó según estimaciones de expertos, tras varias pruebas con distintos conjuntos de parámetros (Ilustración 27).

Clase de infiltración	% de infiltración de la lluvia efectiva
Muy poco infiltrante	5%
Poco infiltrante	30%
Infiltrante	55%
Muy infiltrante	80%

Ilustración 27: Coeficiente de infiltración de la lluvia efectiva que participa a la recarga de los acuíferos

Los elementos que han llevado a la elección de los parámetros se basan en:

- estudios anteriores (esencialmente el proyecto SYSMIN, INDRHI/EPTISA y INDRHI/AQUATER)
- la experiencia de los órdenes de magnitud en contextos similares
- algunas estimaciones puntuales de la recarga con el método de la fluctuación de los niveles piezométricos.

Debido a las numerosas incertidumbres y al carácter teórico de la estimación de la infiltración, la recarga así obtenida se califica de recarga potencial.

Cabe señalar que esta recarga procedente de las precipitaciones efectivas no tiene en cuenta la infiltración a través de los cuerpos de agua superficiales y los numerosos canales de riego. En el estudio INDRHI/EPTISA (2004), esta recarga adicional se distinguía y podía alcanzar 15% de la recarga del acuífero (MEPyD, 2018).

Recarga según estudios anteriores

Todas las publicaciones posteriores al año 2000 y los informes que tratan sobre la recarga utilizan los mismos valores, que parecen provenir del estudio INDRHI/AQUATER (2000). Estos valores se mencionan en el informe INDRHI/EPTISA (2004) y en diversas presentaciones del SGN (presentación CAMIPE, 2017), MEPyD (2018) o la publicación de Rodríguez y Febrillet, (2006). Estas cifras se recogen en la Ilustración 28.

Unidad	Superficie (km ²)	Recarga (Mm ³ /a)	Recarga (mm)
Cordillera central	12240	289	24
Sierra de Neiba	3800	175	46
Valle de San Juan	1600	276	173
Valle de Neiba	2200	270	123
Sierra de Barahona	4100	253	62

Ilustración 28: Valores de recarga según INDRHI/Aquater (2001)

Cabe señalar, sin embargo, que en el estudio de Tahal (1978) se habían propuesto valores de recarga mucho más elevados. El volumen II de este estudio presenta balances hidrológicos y un desglose de los hidrogramas. A partir de representaciones gráficas de las precipitaciones y los caudales diarios, se obtienen las características de los hidrogramas en períodos seleccionados para extraer los parámetros de las curvas de agotamiento, a partir de los cuales se determinan los tipos de escorrentía (superficial, hipodérmica, caudal base). La suma de estas contribuciones debe ser coherente con la superficie de la cuenca.

Cuenca	Lluvia Ponderada (mm)		Evaporación (mm)		Recarga de aguas subterráneas (mm)	
	Promedio	Desviación standard	Potencial	Real	Promedio	Desviación standard
YAQUE DEL SUR						
El Puente	1154	279	1846	458	403	159
Villarpando	1029	166	2044	558	338	114
Dummy	1063	163	1975	565	344	1079
Palo Alto	838	354	2149	432	237	181

Ilustración 29: Valores de recarga según el estudio de Tahal (1978)

Los modelos de lluvia-caudal han reconstruido los caudales totales. El proceso de simulación permite estimar la recarga potencial de los acuíferos por cuenca o subcuenca, sin definir de cual acuífero se trata.

Validación con observaciones de campo

En el marco del presente estudio, se instalaron varios sensores de presión con el fin de realizar un seguimiento de la fluctuación piezométrica de los acuíferos.

En lo que respecta a los acuíferos libres, un método bastante sencillo basado en la fluctuación de los niveles piezométricos consiste en analizar el aumento de dichos niveles durante un ciclo hidrológico (como mínimo) para deducir la recarga que lo origina. El método se denomina, en inglés, Water Table Fluctuation (fluctuación del nivel freático) y lo describen, por ejemplo, Healy et Cook, 2002, Delin et al., 2007, o Delotier et al., 2018. Este método se basa en la relación entre la recarga inducida por las precipitaciones y la variación del nivel piezométrico dh del acuífero libre considerado, en un intervalo de tiempo Δt .

La ecuación se escribe $R = S \times dh / \Delta t$

Con R: el flujo de recarga de las aguas subterráneas (mm.año^{-1});

- S: el coeficiente de almacenamiento (-);

- dh: la variación de la altura piezométrica (mm) en el intervalo de tiempo Δt .

- Aplicación sobre la crónica piezométrica de Constanza:

En la cordillera, se instaló un sensor en la cuenca de Constanza. La fluctuación que aparece tiene dos modos, ya que las precipitaciones se producen según dos estaciones húmedas.

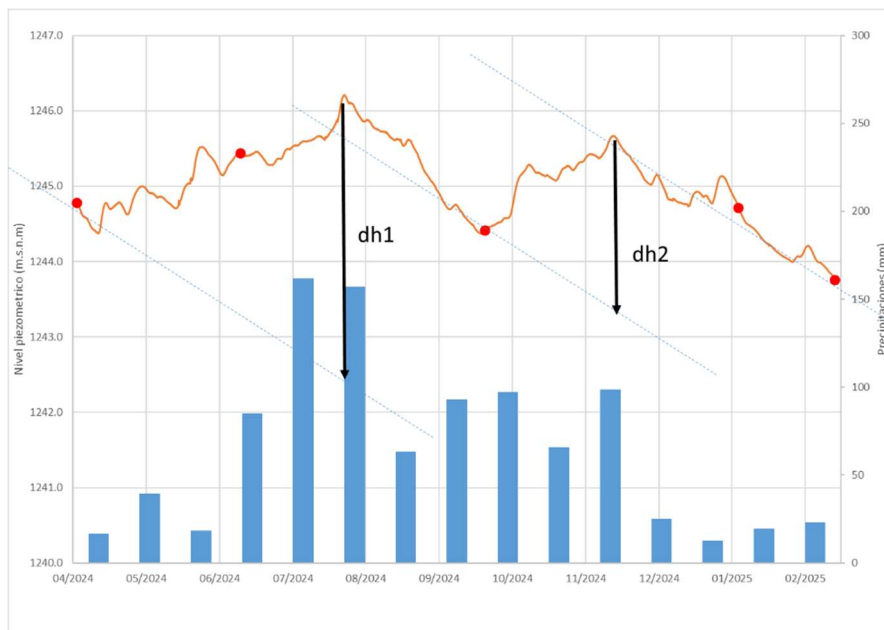


Ilustración 30: método WTF aplicado al acuífero de Constanza

Según la Ilustración 30 los valores a utilizar son: $dh1=3,5$ m y $dh2=2,3$ sobre intervalos de tiempo $\Delta t1=4$ meses y $\Delta t2= 2$ meses.

El coeficiente de almacenamiento retenido en este contexto de relleno aluvial y coluvial es de 5%

La recarga se calcula en el primer modo a 525 mm/a (estimado sobre 4 meses de recarga) y en el segundo modo a 552 mm/a (estimado sobre 2,5 meses de recarga)

Estos valores de recarga son importantes porque la cuenca de Constanza es una fosa de hundimiento rodeada de relieves con importantes escorrentías y llena de sedimentos detríticos infiltrados. Este valor no debe extenderse a la Cordillera. Se trata de un sistema muy particular y de extensión limitada.

- Aplicación sobre la crónica piezométrica de BRGM 2006 en el valle de San Juan:

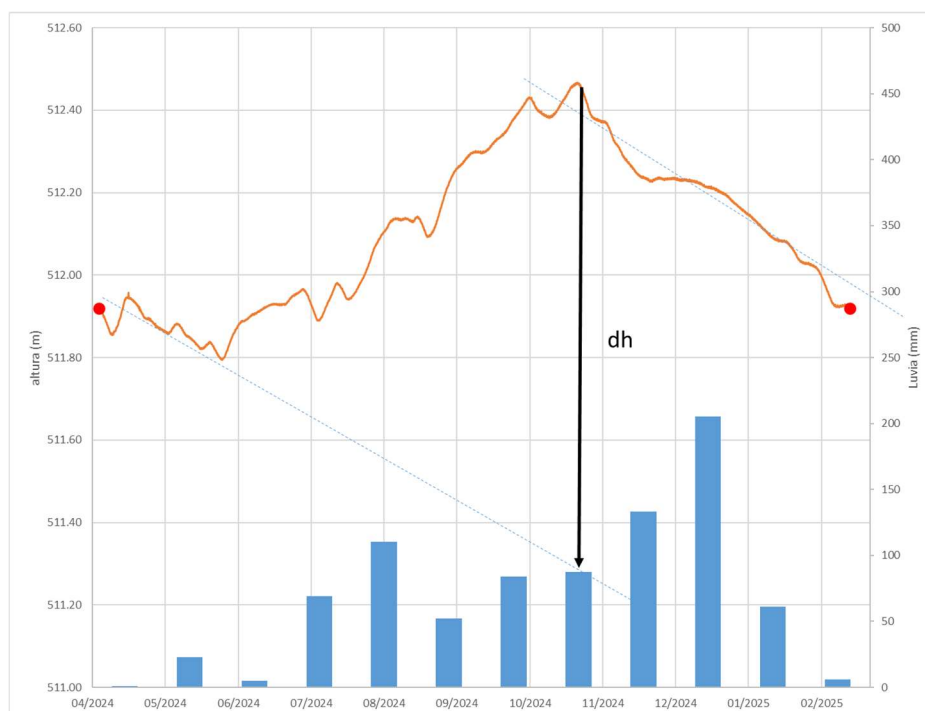


Ilustración 31: método WTF aplicado al acuífero de Valle de San Juan

Según la Ilustración 31, los valores a utilizar son: $dh=1,15$ m y $\Delta t=5$ meses.

El coeficiente de almacenamiento retenido en este contexto aluvial y coluvial es de 5% a mínima

La recarga calculada es de 138 mm/a

- Aplicación sobre la crónica piezométrica de BRGM 2033 en el valle de Neiba:

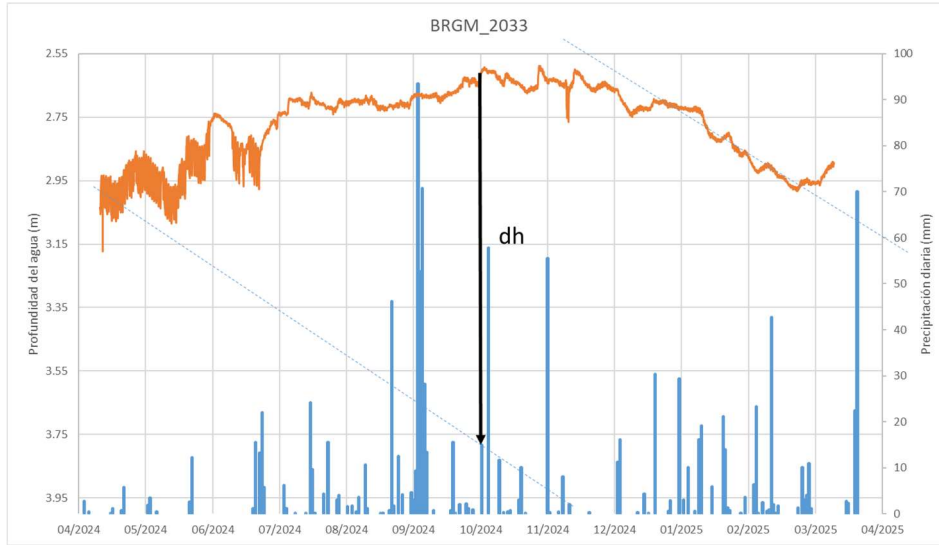


Ilustración 32: método WTF aplicado al acuífero de Valle de Neiba

Según la Ilustración 32, los valores a utilizar son: $dh=1,15$ m y $\Delta t=5$ meses. El coeficiente de almacenamiento debe ser más pequeño porque el sedimento del acuífero es más fino. Además, hay áreas con acuíferos confinados. En consecuencia, la precisión del método es limitada en este caso. Como hipótesis de trabajo, se propone un coeficiente de 3%, dando una recarga de 86 mm.

Valores en la literatura

La estimación del coeficiente de infiltración se expresa más comúnmente en porcentaje de lluvia que en lluvia efectiva (Sanz et al. 2011). El coeficiente de recarga es un concepto menos usado en la literatura. El coeficiente de recarga se define como la relación entre la recarga y la precipitación efectiva, que indica la precipitación efectiva que contribuye a los acuíferos subterráneos y se expresa en porcentaje (Andualet et al., 2021; Allocca et al., 2014; Muteraja, 1986) como:

$$R_{\text{Coef}} = R/P_e$$

donde R_{Coef} es el coeficiente de recarga, R es la recarga y P_e es la precipitación efectiva.

No se trata aquí de hacer una revisión bibliográfica de los valores habituales utilizados según las litologías. Simplemente, los valores del coeficiente en relación con la lluvia efectiva se sitúan entre el 5 % y el 80 %, según las características de muy poca infiltración a muy infiltrante de las diferentes litologías.

Estimación de la recarga potencial

Teniendo en cuenta lo anterior, se aplicó una distribución del coeficiente de recarga entre el 5 % y el 80 % en la cuenca del río Yaque del Sur (Ilustración 27). Los resultados se muestran en la Ilustración 33 y Ilustración 34.

Unidad hidrogeológica	Volumen de recarga (Mm³)	Recarga (mm)
Cordillera central	111	44
Valle de San Juan	83	135
Sierra de Neiba	144	89
Valle de Neiba	30	102
Sierra de Barahona	2	91

Ilustración 33: Computación de la recarga potencial por unidad hidrogeológica en la cuenca de Yaque del Sur

Como en el estudio INDRHI/Aquater (2000), el valle de San Juan tiene la mayor recarga por su situación geográfica y la permeabilidad de sus terrenos. El Valle de Neiba aparece en segundo lugar, seguido por las sierras de Neiba y de Barahona presentan recargas similares. La cordillera central tiene el valor más bajo a pesar de las abundantes precipitaciones.

Los valores son compatibles no sólo con los valores de los estudios INDRHI/Aquater (2000) y INDRHI/Eptisa (2004) sino también con las estimaciones con el método WTF. Sin embargo, hay que considerarlos con precaución. Las observaciones que permiten su validación aún son insuficientes y otros métodos podrían corroborar o refutar los resultados aquí presentados.

Es importante señalar que los valores en millones de m³ (Mm³) no deben compararse entre los distintos estudios, ya que las superficies de referencia son diferentes. En el presente estudio, las superficies de las unidades hidrogeológicas están limitadas por el contorno de la cuenca hidrográfica del río Yaque del Sur. Por ello, es preferible razonar con valores en mm por año.

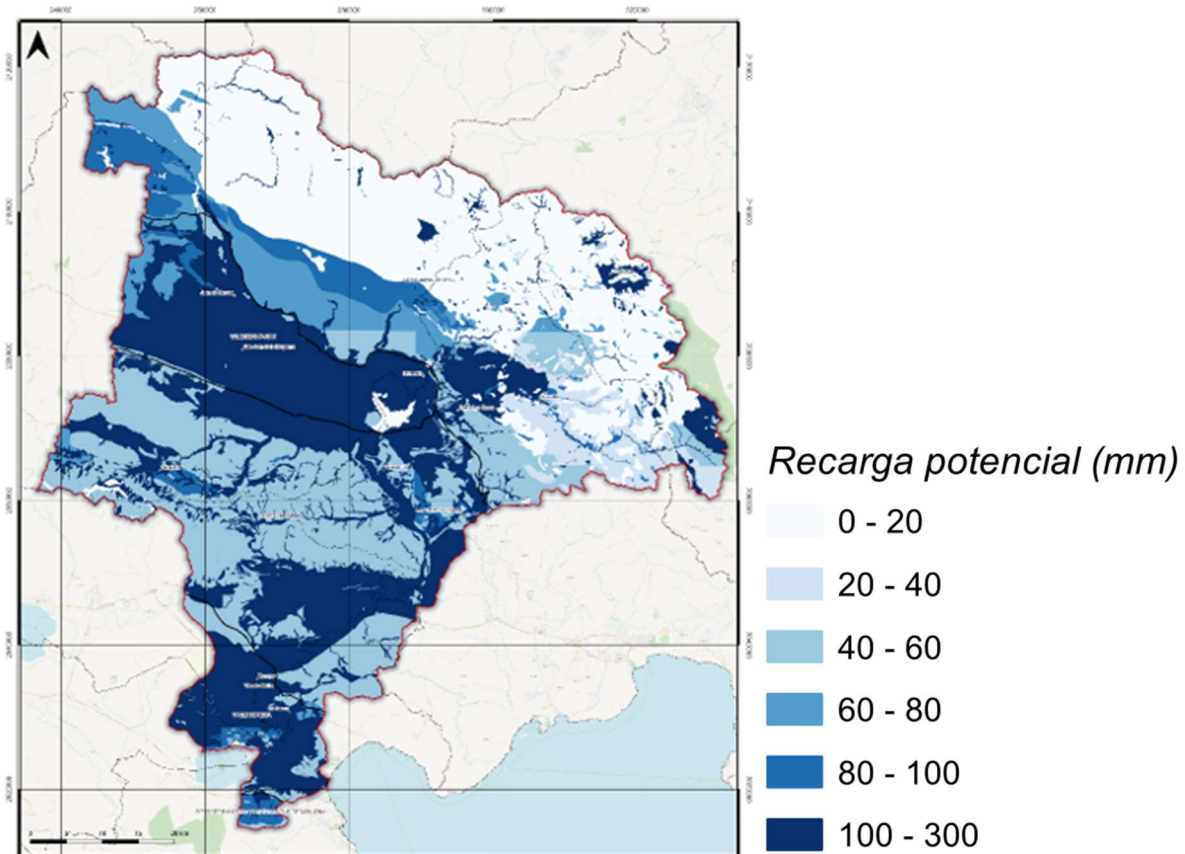


Ilustración 34: Vision preliminar del mapa de la recarga potencial (en mm) en la cuenca de Yaque del Sur

Índice de Desarrollo y Persistencia de la Red hidrográfica (IDPR)

a) Concepto de IDPR

El Índice de Desarrollo y Persistencia de la Red hidrográfica (IDPR) fue creado por el BRGM (Mardhel *et al.*, 2021) para describir una zona en función de los «camino» de las aguas superficiales. El agua de lluvia que precipita sobre la superficie de un terreno natural (que no es absorbida por las plantas o sometida a evaporación directa) sale de su zona de precipitación de dos formas distintas, i) se escurre por la superficie, se concentra en arroyos y ríos y abandona la cuenca por una salida superficial y ii) se infiltra en el subsuelo, se concentra en un acuífero y sale de éste a través de una salida que puede ser un río u otro acuífero.

El IDPR proporciona un enfoque cualitativo de la relación entre estos dos «camino», dando una indicación de la capacidad de las formaciones del suelo y del subsuelo para permitir la infiltración y/o la escorrentía de las aguas superficiales hacia/desde el medio subterráneo. La construcción del IDPR se base en la hipótesis siguiente: la organización espacial de la red hidrográfica depende principalmente de la capacidad de infiltración de las formaciones geológicas sobre las cuales se reparte.

Suponiendo un medio perfectamente homogéneo, sólo la pendiente y la morfología de las formas del relieve guían el desarrollo de los cursos de agua. Sin embargo, en el medio natural, las estructuras geológicas y la composición litológica del subsuelo influyen en este desarrollo. La litología, la edafología y la cobertura vegetal tienen una gran influencia en la permeabilidad y la rugosidad de las formaciones superficiales, lo que a su vez determina la velocidad de la escorrentía y la relación entre escorrentía e infiltración.

La densidad de drenaje es, por tanto, un indicador revelador de las propiedades de las formaciones geológicas. Una cuenca formada por materiales muy permeables tiene generalmente una densidad de drenaje baja. Por el contrario, una cuenca formada por rocas impermeables pero sueltas y erosionables, como margas o arcillas, tiene a menudo una densidad de drenaje elevada.

El cálculo del IDPR se basa en la comparación entre una red hidrográfica ficticia que considera la presencia de un río en cada talweg topográfico (red de talwegs, Índice de Desarrollo) y la red hidrográfica natural existente (red natural, Persistencia de la Red). Esto permite diferenciar las zonas de alta infiltración (red hidrográfica limitada), de las de alta escorrentía (red hidrográfica densa). El IDPR presenta una métrica de la diferencia entre las dos redes (talweg y natural) (Ilustración 35).

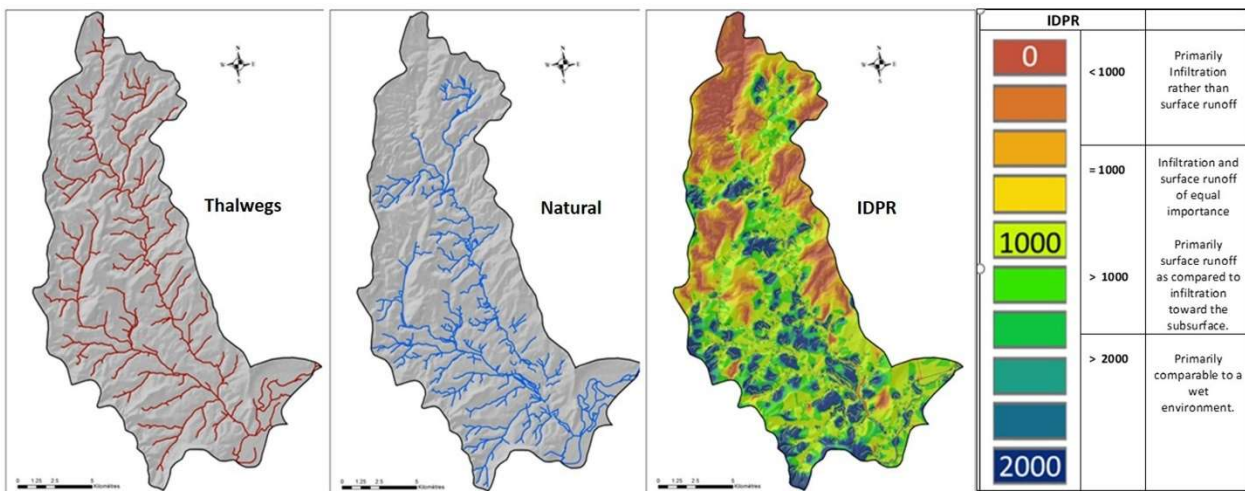


Ilustración 35: Red de talwegs, red hidrográfica natural, y IDPR correspondiente (tomado de Mardhel et al., 2021)

b) Preparación de los datos de entrada

Red hidrológica natural

Para calcular el IDPR se utiliza la red hidrológica natural. En general, procede de los datos de referencia utilizados por los servicios responsables de la gestión y el conocimiento de las redes de aguas superficiales.

Para calcular el IDPR pueden considerarse tanto las redes permanentes como las intermitentes. Por defecto, el IDPR se refiere al uso de la red permanente e intermitente, que tiene en cuenta la capacidad de escorrentía cuando ésta se produce en periodos de aguas altas, especialmente durante las inundaciones.

Se han recogido y analizado varias fuentes de datos para construir la red hidrológica de la cuenca hidrográfica del Yaque del Sur. Se noto problemas en varios de estos referenciales (indicados en Gourcy et al., 2025) y se decidió rehacer en detalle la red hidrográfica de la cuenca, partiendo de los datos mejor posicionados (OSM) y utilizando los datos del IGN (por su exhaustividad y características asociadas), así como las imágenes por satélite disponibles. Estos datos se encuentran en la base de datos del proyecto como Red teórica de flujos (talweg)

Para el cálculo de las pendientes, las cuencas hidrográficas y los talwegs se aplican técnicas de procesamiento espacial integradas en programas informáticos de Sistemas de Información Geográfica, a un modelo digital de terreno (MDT).

El tratamiento (cálculo de talwegs) se ha realizado con el programa ArcView©. Se basan en tres etapas:

- La primera utiliza un algoritmo basado en la búsqueda de "puntos talweg". En una ventana centrada en el píxel que se va a procesar, se examina la vecindad para detectar un cambio en la pendiente cóncava (etapa 1, Ilustración 36).
- La segunda etapa calcula el «gráfico derivado» del MDT, que asigna a cada punto la dirección de la celda de la cuadrícula vecina con la pendiente más pronunciada (etapa 2, Ilustración 36). Este conjunto de "celdas de drenaje" describe una cuenca hidrográfica cuando la salida se sitúa en el borde del MDT, o una "cuenca de depresión" cuando todos los recorridos descritos siguiendo las celdas terminan en un mínimo local.
- Por último, la aplicación dibuja líneas dinámicamente, partiendo de los puntos seleccionados y siguiendo la línea de mayor pendiente hasta que alcanza el borde de la imagen, o un mínimo local, o hasta que encuentra una línea que ya se ha dibujado (etapa 3, Ilustración 36).

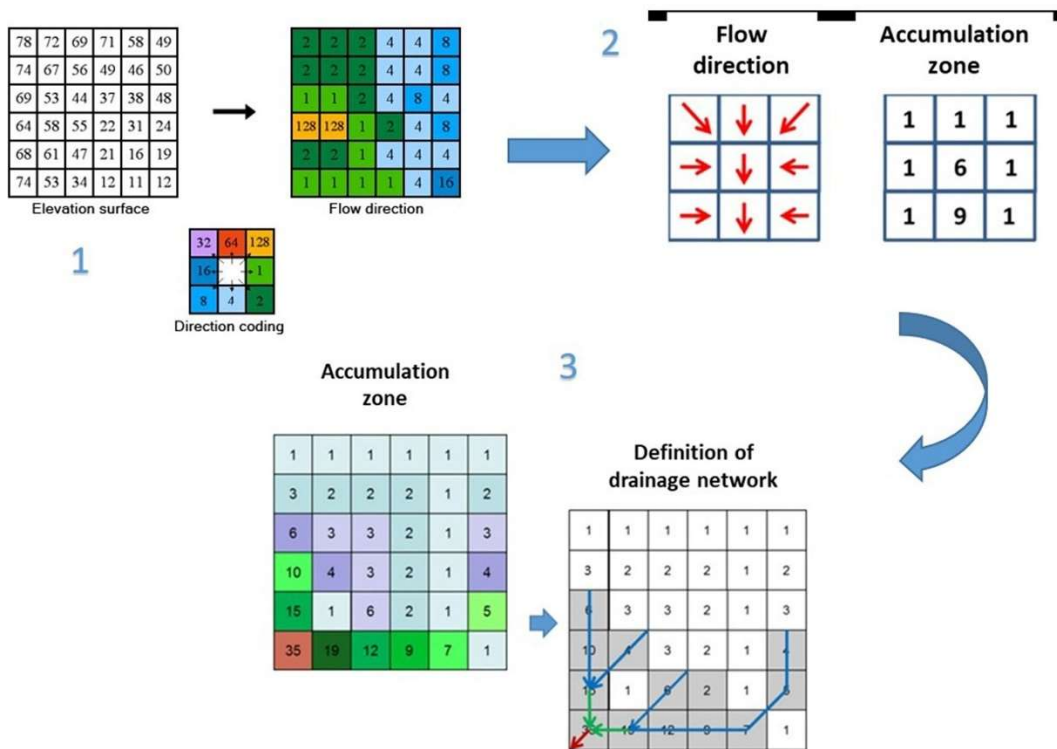


Ilustración 36: Principio de cálculo de la dirección del flujo, cálculo de la acumulación del flujo de muestra y ejemplo de definición de la red de drenaje (tomado de Mardhel et al., 2021)

Para la cuenca del Yaque del Sur, el IGN ha transmitido la última versión del modelo digital del terreno a 8 metros de resolución. A partir de estos datos, se calculó la red teórica de talwegs.

Tratamiento de las pendientes topográficas, de los cursos y de las masas de agua

La introducción de criterios de pendiente en el cálculo del índice IDPR permite una representación que se ajusta mejor a las variaciones locales de la morfología real. El cálculo del índice resulta inicialmente de la relación, en cualquier punto de la zona de estudio, entre la distancia al curso de agua real más cercano y la distancia al thalweg más cercano en términos de distancia euclidiana. Al ponderar este cociente con un cálculo de distancias condicionado por

las pendientes, se contabiliza mejor la red hidrográfica en zonas de alto contraste geomorfológico como las zonas aluviales y sus pendientes, zonas planas lateralmente extensas.

A escala del territorio, la distribución de los valores del índice IDPR oscila entre 0 y n, siendo el 99% de los valores inferiores o iguales a 2. Por convención, el cálculo del índice se multiplica por 1000 y se limita a 2000 para simplificar su uso y disminuir el volumen de datos. De forma sintética (Ilustración 37):

- El valor 0 corresponde a un talweg en el cual no se observa un curso de agua,
- El valor 1000 corresponde a un talweg que tiene un curso de agua,
- El valor 2000 corresponde a una zona acuática que no está descrita por un talweg (lago).

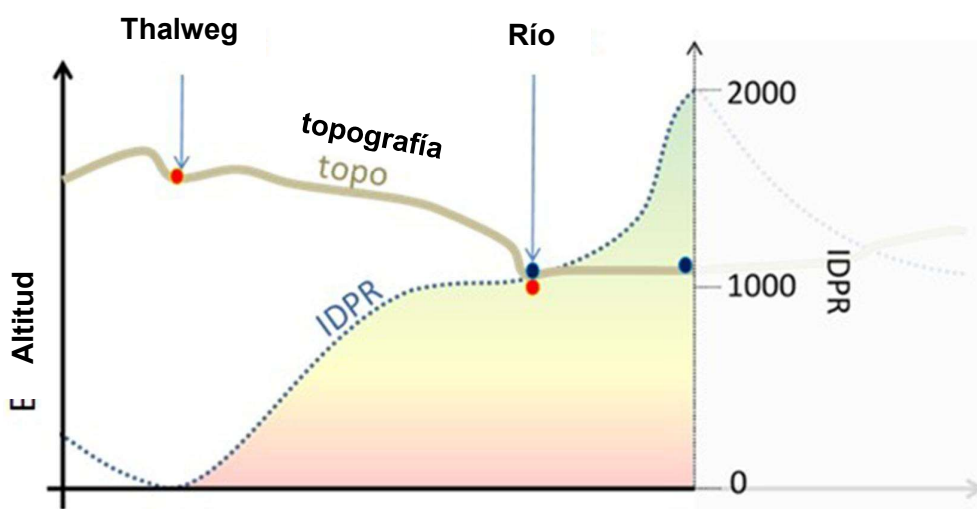


Ilustración 37: Método IDPR de tratamiento de cursos de agua y lagos (tomado de Mardhel et al., 2021)

c) Resultados

El mapa del IDPR calculado para la cuenca del Yaque del Sur se muestra a continuación (Ilustración 38).

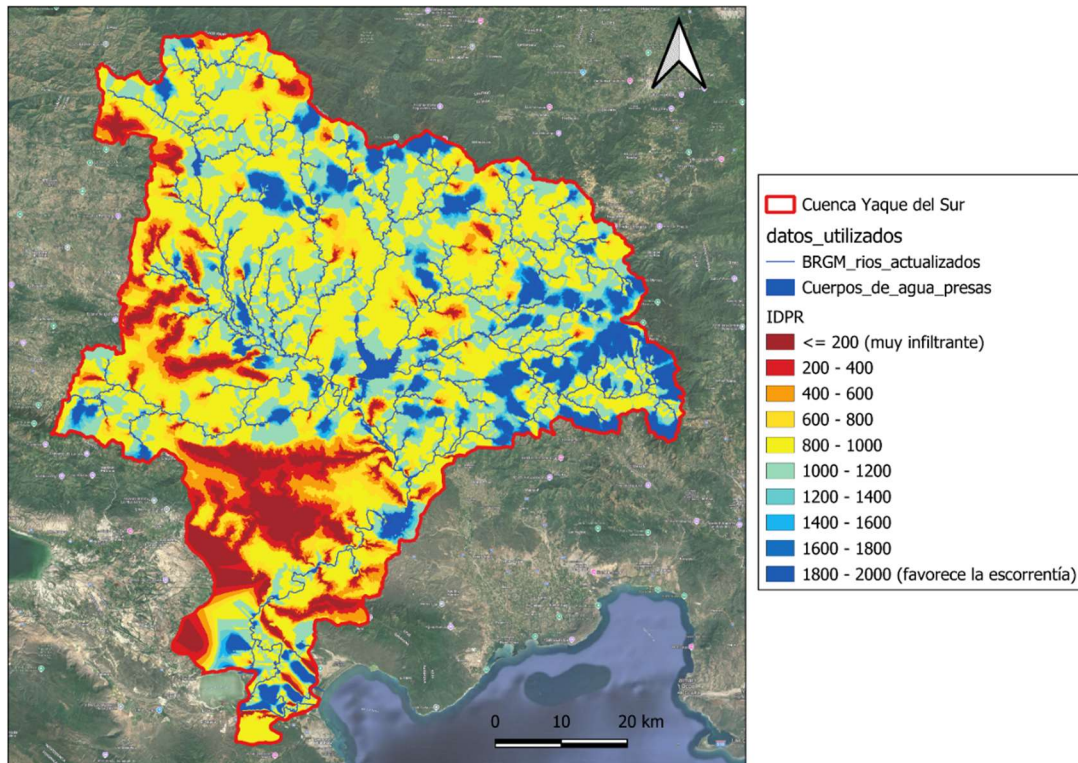


Ilustración 38: Cartografía del IDPR para la cuenca hidrográfica del Yaque del Sur

Los valores más bajos de IDPR, correspondientes a zonas en las que el suelo favorecería la infiltración, se localizan principalmente:

- en la mitad oriental de la provincia de Bahoruco (Parque Nacional de Anacaona);
- aguas arriba y en la orilla derecha del Río San Juan, en particular al oeste y suroeste de la ciudad de San Juan de la Maguana;
- aguas abajo, en la orilla izquierda del Río Yaque del Sur, al este de Vicente Noble.

Este resultado parece coherente con la litología predominantemente del terreno en cuestión: calizas tableadas o gravas en abanicos aluviales y conos de deyección.

Los valores más altos de IDPR, correspondientes a zonas donde el terreno existente favorece más la escorrentía, se localizan principalmente:

- en la parte oriental de la zona de estudio (incluyendo parte de las provincias de Azua y La Vega), zona con numerosos manantiales;
- en las partes altas de la cuenca (Cordillera Central), donde las pendientes tienden a favorecer la escorrentía.

Estas zonas, que tienden a escurrirse, tienen litologías dominantes menos permeables como traquiandesitas y dacitas, basaltos o conglomerados masivos polimícticos.

Este mapa sirve de base a la cartografía de la presión antrópica de origen agrícola y permite fácilmente localizar las áreas a proteger (las áreas más infiltrantes).

6. Recarga potencial de los acuíferos al horizonte 2055

La metodología propuesta para el cálculo de la lluvia efectiva, espacializada a escala de las unidades hidrogeológicas (apartado 5.3.1) para el periodo actual, se aplicó a series cronológicas de precipitación y temperatura derivadas de proyecciones climáticas, con el fin de evaluar su evolución futura. Este cálculo se hizo sin modificar los parámetros (CCS, Kc y CILE), ya que resulta demasiado complejo e incierto su evolución futura.

Se utilizaron dos conjuntos de proyecciones climáticas elaboradas en el marco del ejercicio internacional CMIP5 (Taylor et al., 2012) y ajustadas (usando la corrección de sesgo propuesta por Yang et al., 2010) por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (CCCS, (2018)). Los dos modelos climáticos globales (MCG) seleccionados para este estudio son MPI-ESM-LR y HadGEM2-ES, por haber sido utilizados en estudios anteriores (AFD, 2022). Los datos disponibles tienen una resolución espacial de 0,5°.

Los mapas presentados en la Ilustración 39 muestran la diferencia absoluta (para la temperatura) y relativa (para la evapotranspiración potencial, las precipitaciones y la recarga potencial) entre los valores futuros (horizonte a mediados de siglo) y los valores de referencia. Los valores de referencia son las medias interanuales del periodo 1976-2005 y los valores futuros las del periodo 2041-2070. Los dos modelos prevén un aumento medio de la temperatura media anual de entre 2°C y 3°C en la cuenca del Yaque del Sur, a mediados de siglo, siendo el modelo HadGEM más pesimista. Este aumento resulta lógicamente en un aumento de la evapotranspiración potencial de un 10% al 20%, que puede ser mayor o menor en términos de evapotranspiración real según la cubierta vegetal.

En términos de evolución de las precipitaciones, el modelo MPI-ESM-LR simula una disminución de las precipitaciones anuales en el futuro de entre -15% y -20% en toda la zona de estudio, mientras que el modelo HadGEM-ES proyecta una disminución menor (entre -3% y -8%).

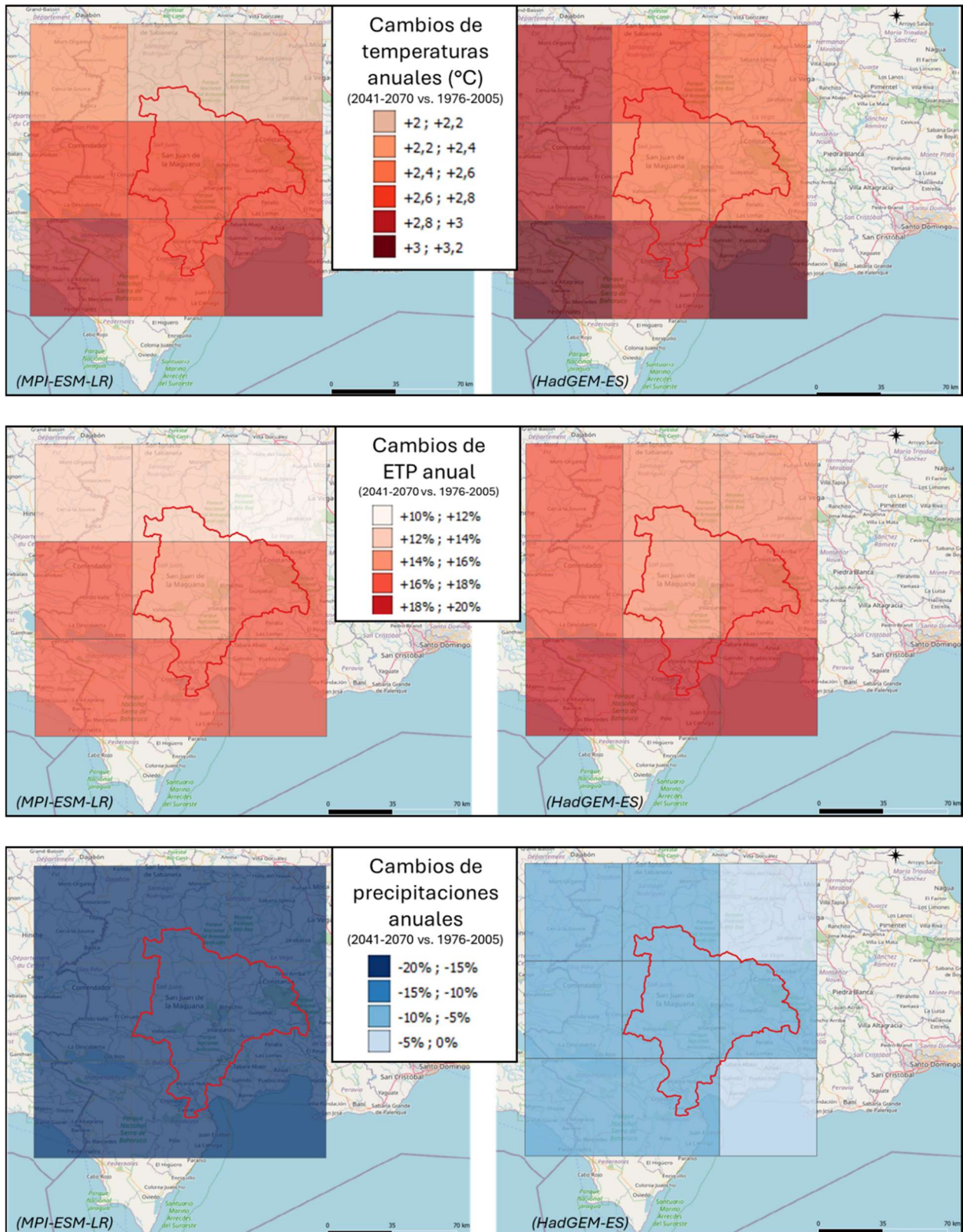


Ilustración 39: Cambios de valores medios de evapotranspiración potencial y de precipitaciones anuales calculados entre el periodo actual (1976-2005) y el horizonte 2055 (2041-2070), según las proyecciones de los modelos de clima globales MPI y HadGEM.

Las proyecciones climáticas presentadas, aplicadas al método de cálculo de la recarga potencial permitieron elaborar mapas de la evolución de la recarga potencial a mediados de siglo y a escala de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Yaque del Sur (Ilustración 40). Los dos modelos proyectan una disminución de la recarga potencial, más severa en el caso del modelo MPI (entre -33% y -44%) que en el modelo HadGEM (entre -8% y -24%).

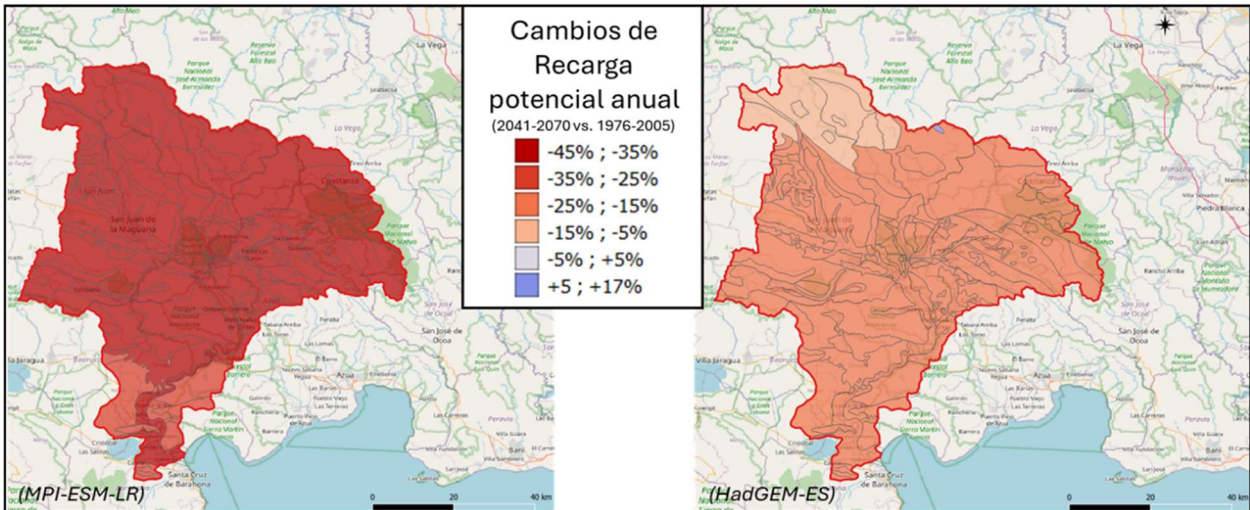


Ilustración 40: Cambios de valores medios de recarga potencial anual calculados entre el periodo actual (1976-2005) y el horizonte 2055 (2041-2070), según las proyecciones de los modelos de clima globales MPI y HadGEM.

7. Conclusiones

El proyecto “Mejora de la gestión de las aguas subterráneas en la República Dominicana en un contexto de cambio climático” llevado a cabo de 2023 a 2026 permitió coleccionar un gran número de datos relacionados al recurso hídrico subterráneo. Los datos centralizados en la cuenca del Yaque del Sur provienen de proyectos anteriores y de información almacenada en varias instituciones de la República Dominicana. El trabajo de colecta, análisis y verificación permitió crear una base de datos de calidad para esta cuenca y un proyecto de sistema de información geográfico asociado. De estos datos, públicos, se pudo elaborar una serie de mapas.

Dependiendo de la madurez de los temas abordados, de la calidad y cantidad de datos disponible, de la densidad de la información a presentar y de su carácter temporal o permanente, diferentes formatos de entrega de los datos del proyecto son propuestos:

1 - Mapa papel formato A0

Mapa del potencial hidrogeológico de la cuenca del Yaque del Sur. Mapa que sintetiza gran parte de la información del proyecto. El formato permite añadir mapas adicionales en formato pequeño. Los tres cartuchos propuestos son la capacidad de los suelos a infiltrar (IDPR), la lluvia efectiva y la recarga potencial de los acuíferos por precipitación.

2 - Mapa papel formato A1

Mapa de la calidad natural de las aguas subterráneas – anomalías en fluoruro

Mapa de la presión significativa de pesticidas sobre el agua subterránea

Mapa de la presión significativa de nitratos sobre el agua subterránea

Mapa del potencial hidrogeológico – A este mapa se añaden tres crónicas de variaciones de niveles de agua subterránea

Mapa de los cambios de valores medios de recarga potencial anual calculados entre el periodo actual (1976-2005) y el horizonte 2055 (2041-2070), según las proyecciones de los modelos de clima globales MPI y HadGEM

Todos los datos están en el proyecto SIG puesto a disposición del público a través del sitio internet del IGN. Así que el usuario podrá crear su propio mapa o poner en evidencia unas áreas de la cuenca.

8. Referencias

- AFD (2022), Evaluación sobre el riesgo de desastre y sobre la vulnerabilidad al cambio climático, Adap'Action. 75 pp.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
- Allocca V., Manna F., De Vita P., (2014). Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18 (2) (2014), pp. 803-817
- Anduaem T.G.; Demeke G.G; Ahmed I., Dar M.A., Ybeltal M., (2021). Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37 (2021) 100917. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917>
- Barzman M.M., (1994). Opportunities for pesticide reduction in the Dominican Republic 11813-DO, 23p. <https://doi.org/10/document>
- Bessière H., Surdyk N. (2017). Guide pour l'analyse pression impact dans le cas des pressions agricoles diffuses phytosanitaires. Rapport final. BRGM/RP-67366-FR, 82 p.
- Bonilla L. (1993). Cultivo de aguacate. Boletín Técnico. Serie Cultivos No. 17, 23p.
- Bonilla L., Núñez D., Martínez P., Reyes L., Martínez C. (2019). Evaluación de la respuesta del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) a la fertilización orgánica y convencional en Maizal, Esperanza, Valverde. APF 8. 19–24.
- CCCS (Copernicus Climate Change Service) (2018): Essential climate variables for water sector applications derived from climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.201321f6 (Accessed on 31/01/2026).
- Côte F.-X., Chabrier C., Domergue R., Fouré E., Fournier P., Galan M.-B., Laplace D., Marnotte P., Pavis C., Simon S., Vannièrre H. (2011). Pesticides DOM: Inventaire des Dispositifs Expérimentaux (informe). Cirad ; INRAE.
- Cox M., Payton F., Pimentel L. (2019). A gilded trap in Dominican rice farming. *Land Use Policy* 80. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.007>
- Damiani O. (2002). Small Farmers and Organic-Banana Production in the Dominican Republic. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1277.7201>
- Delin G.N., Healy R.W., Lorenz D.L., Nimmo J.R. (2007) Comparison of local-to-regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *J. of Hydrology* (2007) 334, 231-249
- Delottier H., Pryet A., Lemieux J.M., Dupuy A. (2018) Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method. *Hydrogeology Journal* DOI: [10.1007/s10040-018-1790-6](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1790-6)
- Dingman S. L. (2002). *Physical Hydrology*, 575, Waveland Press, 2nd edition, ISBN: 978-1-57766-561-8.

Edijatno Michel C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-122, doi:10.1051/lhb/1989007.

FIDA (2010). República Dominicana - Proyecto de desarrollo económico rural en el Centro y Este - (Prorural Centro y Este) (No. 2160- D). 72.p.

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R., Ravina da Silva, M. (eds), 2015. *Soil Atlas of Latin America and the Caribbean*, European Commission – Publications Office of the European Union, L-2995 Luxembourg, 176 pp.

Gonçalves A.L., Kernaghan J.R. (2014). Banana production methods -A comparative study. 41p.

Gourcy L., Gutierrez A., Brugeron A., Duchamp A., Delaunay M., Lanini S. (2025). Conocimientos hidrogeológicos en la cuenca del Yaque del Sur. Informe final V1. BRGM/RP-74947-FR, 142 p.

Hamon R.W. (1963) Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. Wallingford, Oxon, U.K.: International Association of Scientific Hydrology, Publication n°63.

Healy RW, Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol J* 10(1):91–109

Hersbach, H., Comyn-Platt, E., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N., Cagnazzo, C., Cucchi, M. (2023): ERA5 post-processed daily-statistics on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.4991cf48](https://doi.org/10.24381/cds.4991cf48)

Hutter H.-P., Khan A.W., Lemmerer K., Wallner P., Kundi M., Moshammer H. (2018). Cytotoxic and Genotoxic Effects of Pesticide Exposure in Male Coffee Farmworkers of the Jarabacoa Region, Dominican Republic. *Int J Environ Res Public Health*. 15, 1641–1652.

INDRHI (1989) - Mapa hidrogeológico, escala 1:500 000.

INDRHI-EPTISA (2004). Estudio hidrogeológico nacional de la República dominicana. Proyecto SYSMIN Fase II. Memoria de proyecto, 11 volúmenes.

INDRHI-AQUATER (2000). Estudio hidrogeológico nacional de la república dominicana. Proyecto SYSMIN Fase I. Memoria de proyecto, 7 volúmenes

Kwong K.F., Deville J. (1995). Nitrogen fertilizer use by sugarcane ratoon crops in Mauritius. *Proceedings XXI* (p. 42-55), in: *Proceedings XXI Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists*. Presented at the Kasetsart Univ., Bangkok (Thailand), Bangkok (Thailand). 657 p.

Lanini S., Caballero Y. (2021). ESPERE, a Tool for Multimethod Aquifer Recharge Estimation: What's New with Version 2? *Groundwater* 59, 5–6. <https://doi.org/10.1111/gwat.13049>

Lanini S., Caballero Y., Seguin J.-J., Maréchal J.-C. (2016). ESPERE, a multiple-method Microsoft Excel application for estimating aquifer. *Groundwater* 54. <https://doi.org/10.1111/gwat.12390>

Mardhel V., Pinson S., Allier D. (2021). Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory. *Journal of Hydrology* 592 (2021) 125609. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125609>

MEPyD (2018) – Contexto actual del agua en la República Dominicana. Octavo foro mundial del Agua, 168 p.

MIMARENA (2022). Uso y cobertura del Suelo. *Atlas de Biodiversidad y Recursos Naturales de la República Dominicana*

Muteraja K.N. (1986) *Applied Hydrology*. Tata McGraw-Hill, New Delhi, India

Raynolds L.T. (2008). The Organic Agro-Export Boom in the Dominican Republic: Maintaining Tradition or Fostering Transformation? *Latin American Research Review*. 43, 161–184.

Robelin O., Lanini S., Caballero Y., Sauquet E. (2026). RECHARGE, a model of aquifer potential recharge applied to mainland France. *Journal of Hydrology*, 664. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134631> .

Rodrigues Morillo H., Febrillet Huertas J.F. (2006). Potencial hidrogeológico de la República Dominicana. *Buletin geológico y minero*, 117(1), 187-200.

Sanz E., Menendez Pidal de Navascu I., and Tavera C. (2011) Calculating the average natural recharge in large areas as a factor of their lithology and precipitation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 4753–4788, 2011 www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/4753/2011/ doi:10.5194/hessd-8-4753-2011.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl, An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498, [DOI:10.1175/BAMS-D-11-00094.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1), 2012.

Thornthwaite C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 94, 38-55.

Tourlière B., Pakyuz-Charrier E., Cassard D., Barbanson L., Gumiaux C. (2015). Cell Based Associations: A procedure for considering scarce and mixed mineral occurrences in predictive mapping, *Computers & Geosciences*, Volume 78, Pages 53-62, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.01.012>.

Vella A. (2022). Highlighting mineralized geological environments through a new Data-driven predictive mapping approach. Thèse de l'Université d'Orléans.

Yang Wei, Johan Andréasson, L. Phil Graham, Jonas Olsson, Jörgen Rosberg, Fredrik Wetterhall (2010) Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. *Hydrology Research* 1; 41 (3-4): 211–229. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2010.004>.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34



Géosciences pour une Terre durable

brgm

www.brgm.fr