

**Estimación de la recarga potencial por precipitación
en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.**

Karen Dayana Ballesteros Buitrago
Lauren Marcela González Jiménez

Trabajo de grado presentado para optar por el título de
Geóloga

Asesora: PhD. Marcela Jaramillo Uribe

MEDELLÍN
UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
2020

Agradecimientos

En primer lugar, quisiéramos agradecer a la Universidad EAFIT por ser la sede de nuestro conocimiento profesional, por brindarnos un espacio de aprendizaje, y darnos la oportunidad de ser educadas por grandes maestros que aportaron enormemente en nuestra formación académica.

Gracias infinitas a nuestra asesora Marcela Jaramillo por habernos acompañado durante toda la carrera, por darnos la oportunidad de aprender de ella, por ser nuestro pilar académico quien siempre ha promovido nuestro interés por las aguas subterráneas y nos ha apoyado incontables veces en pro de mejorar nuestro conocimiento y habilidades en el tema.

A nuestros padres que nos han acompañado en nuestro crecimiento profesional y personal, quienes siempre creyeron en nosotras, impulsaron nuestro amor por la ciencia y nos brindaron palabras de fuerza en los momentos que más necesitamos su apoyo. A nuestros hermanos y demás familiares que nos acompañaron y que hoy comparten con nosotras la alegría y satisfacción por este nuevo logro.

A todos nuestros amigos y futuros colegas quienes hicieron de nuestra estancia en la universidad, años memorables con buenos recuerdos que atesoraremos siempre. Gracias por siempre ayudarnos de manera desinteresada, y permitirnos formar vínculos que esperamos nos mantengan en contacto por muchos años más.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
1. Hipótesis y objetivos.....	3
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivo General.....	3
1.3. Objetivos específicos.....	3
2. Métodos.....	4
2.1. Recopilación de información.....	4
2.2. Climatología.....	5
2.3. Direcciones de flujo superficial.....	7
2.4. Cobertura Vegetal.....	8
2.5. Capacidad de retención de agua en el suelo.....	9
2.6. Grupo hidrológico.....	10
2.7. Ejecución SWB (Soil Water Balance).....	10
3. Marco conceptual.....	12
3.1. Tipos de recarga.....	12
3.2. Métodos de estimación de recarga.....	13
3.2.1. Medidas directas.....	13
3.2.2. Método de balance de agua.....	13
3.2.3. Aproximaciones de Darcy.....	14
3.2.4. Método de trazadores.....	15
3.2.5. Métodos empíricos.....	15
3.3. Método del SWB (Soil-Water Balance).....	15
3.3.1. Entradas.....	16
3.3.2. Salidas.....	18
4. Área de estudio.....	20
4.1. Geología del desierto.....	22
4.2. Geología estructural.....	23
4.2.1. Falla de Baraya.....	23
4.2.2. Falla La Chusma.....	23
4.2.3. Falla Andalucía.....	24
4.3. Hidrogeología.....	24
5. Resultados.....	33
5.1. Diagnóstico de la información disponible en el área de estudio.....	33
5.2. Análisis de la precipitación.....	33
5.3. Cartografía temática y archivos ASCII.....	38
5.3.1. Mapa de precipitación.....	38
5.3.2. Mapa de direcciones de flujo superficial.....	40

5.3.3.	Mapa de cobertura vegetal.....	41
5.3.4.	Mapa de capacidad de retención del suelo.....	42
5.3.5.	Mapa de grupo hidrológico.....	43
5.4.	Modelo SWB estimación de evapotranspiración real y recarga potencial	43
5.4.1.	Condiciones Normales	43
5.4.2.	Condiciones Niño	44
5.4.3.	Condiciones Niña	46
6.	Discusión	48
7.	Conclusiones	52
8.	Referencias	53

Lista de Figuras

Figura 1.	Diagrama metodológico empleado para la ejecución del modelo SWB.....	4
Figura 2.	Funcionamiento del SWB	16
Figura 3.	Localización geográfica del área de estudio	20
Figura 4.	Mapa hidrológico del área de estudio.....	21
Figura 5.	Mapa geológico del área de estudio.....	23
Figura 6.	Mapa de la provincia hidrogeológica y Sistema Acuífero Neiva-Tatacoa-Garzón	25
Figura 7.	Mapa de unidades hidrogeológicas del desierto de La Tatacoa	26
Figura 8.	Secuencia estratigráfica para los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica 1	27
Figura 9.	Mapa de localización de los cortes geológicos	28
Figura 10.	Perfil hidrogeológico A-A' en dirección NE-SW de la Unidad Hidrogeológica 1	29
Figura 11.	Perfil hidrogeológico D-D' en dirección NE-SW de la Unidad Hidrogeológica 1	30
Figura 12.	Mapa de isopiezas del área de estudio.	31
Figura 13.	Estadísticos de datos faltantes de las estaciones climatológicas del desierto de La Tatacoa .	33
Figura 14.	Gráficas de análisis entre la serie de precipitación de la estación San José y ENOS.....	34
Figura 15.	Serie de precipitación en el periodo 1997-1998 para condiciones Niño	35
Figura 16.	Serie de precipitación en el periodo 2010-2011 para condiciones Niña.	35
Figura 17.	Serie de precipitación en el periodo 2012-2013 para condiciones Normales.	36
Figura 18.	Estadísticos de barras que representan el % de la frecuencia relativa (fi).	37
Figura 19.	Estadísticos que permiten analizar la respuesta de la estación San José al ENOS	38
Figura 20.	Mapa de precipitación usando el Chirps y una interpolación Kriging de deriva externa.....	39
Figura 21.	Mapa de direcciones de estudio de la zona de estudio.	40
Figura 22.	Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio.....	41
Figura 23.	Mapa de capacidad de retención del suelo	42
Figura 24.	Mapa de grupos hidrológico en el área de estudio.....	43
Figura 25.	Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Normales	44
Figura 26.	Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Niño.	45
Figura 27.	Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Niña.	46
Figura 28.	Perfil hidrogeológico B-B' en dirección NW-SE de la Unidad Hidrogeológica 1	50
Figura 29.	Perfil hidrogeológico F-F' en dirección NW-SE de la Unidad Hidrogeológica 1	50

Lista de tablas

Tabla 1. Estaciones de precipitación del IDEAM que tienen influencia en el área de estudio.....	5
Tabla 2. Clasificación de la cobertura vegetal mediante los valores de NDVI.	8
Tabla 3. Reclasificación de la cobertura vegetal con clasificación nivel II de Anderson.	9
Tabla 4. Clasificación del grupo hidrológico relacionada a la textura del suelo	9
Tabla 5. Clasificación del grupo hidrológico del suelo.....	10
Tabla 6. Grupo hidrológico del suelo relacionado a la textura del suelo.	10
Tabla 7. Resumen de datos ingresados en el panel de control del SWB.	11
Tabla 8. Tabla de clasificación de humedad del suelo.	17
Tabla 9. Resumen de la geología regional del Desierto de la Tatacoa.	22
Tabla 10. Resultados análisis pruebas de bombeo y recuperación.	30
Tabla 11. Resultados de la precipitación de las estaciones IDEAM y la interpolación con CHIRPS.....	40
Tabla 12. Resumen de los resultados arrojados por el modelo SWB	47

Resumen

El desierto de La Tatacoa es un bosque seco tropical con precipitaciones entre 1000 y 1300 mm/año con temperaturas máximas de 40°C. El principal problema de la región está relacionado con el recurso hídrico debido a las condiciones climáticas secas que gobiernan la zona. Es tanto así que el municipio huilense fue el más afectado por abastecimiento de agua en 1998 durante el fenómeno del Niño, poniendo en peligro la existencia de los habitantes de Villavieja. Nuestra investigación pretende estimar la recarga por precipitación en condiciones climáticas Niño, Niña, y Normal con el fin de comprobar que la lluvia no es la fuente principal de recarga del acuífero del desierto. La estimación de la recarga se calculó con el método SWB (Soil Water Balance), el cual realiza un balance hídrico para obtener la recarga potencial y la evapotranspiración real de la zona utilizando información climática, cobertura vegetal, usos y textura del suelo, humedad antecedente y direcciones de flujo superficial. Los resultados de la recarga potencial promedio para años en condición climática Normal (2013), Niño (1997-1998) y Niña (2010) fueron de 143, 23, y 266 mm/año respectivamente; lo que proporciona valores de recarga de 12% (Normal), 4% (Niño), 15% (Niña) con respecto a las precipitaciones promedio de la zona en cada uno de los periodos evaluados. Esta investigación demostró que los porcentajes de recarga directa promedio en la zona son bajos comparados con los valores de precipitación promedio, por lo que se proponen dos escenarios para futuras investigaciones donde, la recarga principal proviene de una fuente indirecta como son los ríos permanentes del área de estudio (río Magdalena y Cabrera), o que el acuífero del desierto contiene aguas muy antiguas que no se están recargando.

Introducción

La proporción de agua dulce en la tierra está distribuida en 97% agua salada y un 3% de agua dulce de la cual solo el 0.06% es de fácil acceso (Ahuja, 2017). Aproximadamente el 30% del agua dulce disponible en el planeta corresponde a reservas de agua subterránea distribuyéndose porcentualmente para usos domésticos (46%), agrícolas (36%) e industriales (27%) (Taylor et al., 2012).

De todas las reservas de agua, Sudamérica es la fuente del 28% del total en el mundo, con el 5% de esta en Colombia (IDEAM, 2019). Según el estudio nacional del agua (IDEAM, 2019) el 72% de la oferta hídrica en el país corresponde al sistema hídrico subterráneo (SHS).

En Colombia se tienen identificados 61 sistemas acuíferos, entre ellos el sistema acuífero Neiva-Tatacoa-Garzón (SAM 2.3), donde se ubica el desierto de La Tatacoa del cual se abastece gran parte de la población del municipio de Villavieja (IDEAM, 2015). Además, IDEAM (2015) afirma que el SAM 2.3 podría suplir las necesidades de abastecimiento para esta zona que presenta un índice de aridez deficitario. Sin embargo, este pertenece al 71% de los 61 sistemas acuíferos identificados en el país, que no cuentan con información suficiente para un aprovechamiento sostenible (IDEAM, 2019).

El desierto de La Tatacoa, ubicado en el municipio de Villavieja al norte del departamento del Huila, cuenta con una extensión de 330 km^2 y ocupa más del 50% de las áreas desérticas del municipio. De los 670 km^2 que tiene Villavieja, 600 km^2 (es decir, el 98%) presenta un nivel de desertificación entre bajo y muy alto (Alcaldía de Villavieja, 2016).

Según el “Plan básico para el análisis de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo”, llevado a cabo por la alcaldía de Villavieja en 2016, el principal problema de la región está relacionado con el recurso hídrico debido a las condiciones climáticas secas que gobiernan la zona. Es tanto así que, según el mismo informe, Villavieja fue el municipio huilense más afectado por el fenómeno del Niño de 1998, incluso “...poniendo en peligro la existencia de los habitantes de Villavieja...”.

A pesar del potencial que tiene el agua subterránea para suplir la demanda (total o parcialmente) para uso doméstico, pecuario y agrícola, son pocos los estudios especializados realizados en el desierto de La Tatacoa. Vélez et al. (2006) realizaron un estudio hidrogeológico en el desierto con el fin de establecer volúmenes de agua disponibles para consumo, el cual incluyó una estimación de recarga potencial por precipitación a partir del método de Bradbury et al. (2000) con datos de estaciones climatológicas desde 1978 hasta 2002 para años en condición Normal, Niño y Niña.

Este estudio previo incluye como primera recomendación, "...Revisar y fortalecer el modelo hidrogeológico con base en nueva información...". Además, el Plan de Acción 2016-2019 de la CAM (2016), afirma que es necesario conocer y diagnosticar las características hidrogeológicas en todo el departamento del Huila.

Con este proyecto de grado, se busca actualizar la información hidrogeológica, específicamente proponer un nuevo modelo de recarga potencial por precipitación con el modelo SWB desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en el desierto de la Tatacoa, ya que se encontraron inconsistencias en los resultados de la recarga propuestos por Vélez et al. (2006). Adicionalmente, no se ha llevado a cabo ningún otro estudio hidrogeológico en la zona, lo que quiere decir que han pasado 18 años desde los datos utilizados para la primera estimación de recarga.

Este proyecto no sólo es relevante por el hecho de que ayudará a mejorar el nivel de conocimiento del recurso hídrico subterráneo de nuestro país, sino que, además, tendrá un impacto positivo dando herramientas a las entidades gubernamentales para la toma de decisiones y aprovechamiento sostenible del recurso en la población de Villavieja, donde el 90% de las fuentes hídricas superficiales tipo quebrada se secan durante épocas sin lluvia (Alcaldía de Villavieja, 2016) y el agua subterránea se convierte, en muchos casos, en la única opción de abastecimiento para la población.

Los resultados de este estudio, a su vez, servirán de base para investigaciones futuras que planea adelantar la Universidad sobre la hidrogeología del desierto de La Tatacoa y que, en los próximos dos años, buscan formar, al menos, dos magísteres en Ciencias de la Tierra.

1. Hipótesis y objetivos

1.1. Hipótesis

Las condiciones climáticas de la zona de estudio permiten suponer que la precipitación no es la principal fuente de recarga del acuífero del desierto de La Tatacoa.

1.2. Objetivo General

Estimar la magnitud de la recarga directa por precipitación del acuífero del desierto de la Tatacoa para condiciones climáticas Normal, Niño y Niña, utilizando una metodología basada en el balance hídrico (SWB).

1.3. Objetivos específicos

- Recopilar información secundaria para llevar a cabo un diagnóstico sobre el conocimiento hidrogeológico en el desierto de La Tatacoa.
- Compilar información temática requerida para el modelo SWB (precipitación, temperatura, modelo de elevación digital, imágenes Landsat-8 y textura del suelo).
- Realizar un análisis de las series de tiempo con los registros de precipitación para evaluar la calidad de los datos y los periodos sobre los que se van a realizar las estimaciones de recarga.
- Generar los archivos temáticos para el área definida, con el fin de ejecutar el modelo SWB.

2. Metodología

Este capítulo explica detalladamente los procesos que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto de grado (Figura 1). Los datos de entrada al código se basan en el Sistema de Unidades Anglosajón y de esta manera fueron ingresados los insumos al modelo, pero posteriormente transformados al Sistema de Unidades Internacional para la presentación de los resultados.

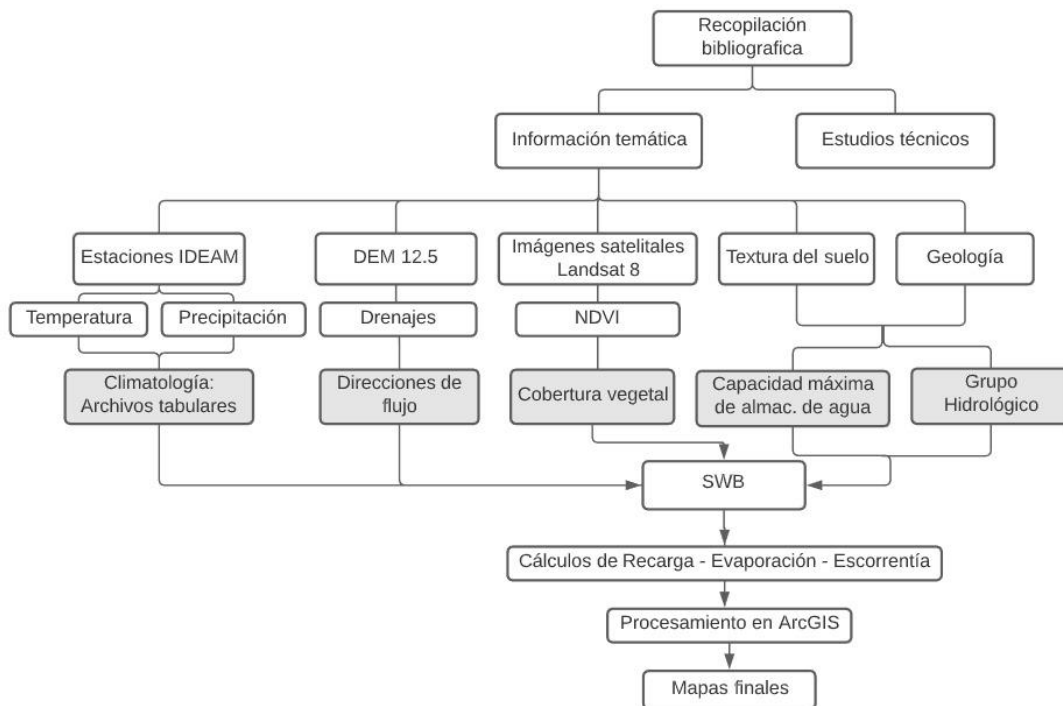


Figura 1. Diagrama metodológico donde se describen los insumos utilizados para la ejecución del modelo SWB.

2.1. Recopilación de información

Para el desarrollo de este numeral se realizó una búsqueda detallada de la información hidrogeológica existente en la zona de interés. Se consultaron diferentes bases de datos con el fin de obtener artículos publicados sobre el desierto, informes de las memorias explicativas de la zona (302 y 303) de la plataforma del IGAC (Instituto Colombiano Agustín Codazzi) y documentos técnicos elaborados por la Corporación Autónoma Regional del Valle Alto del Magdalena (CAM), la alcaldía de Villavieja y la Gobernación del Huila. Para acceder al documento base (Vélez et al., 2006) del presente proyecto se solicitó la información en la Biblioteca Hernán Garcés González de la Facultad de minas de la Universidad Nacional con el cual se obtuvo el informe y archivos digitales de dicho

proyecto. Adicionalmente, se descargó información cartográfica y temática como capas de geología, textura del suelo y cobertura vegetal, así como información de estaciones climatológicas del área de interés la cual se solicitó al IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales). En cuanto al DEM (modelo de elevación digital) del área de estudio se descargó de ASK Alaska del satélite ALOS PASAR e imágenes LANDSAT-8 de la plataforma Earth Explorer del USGS. Además de datos de precipitación descargados del CHIRPS (CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations | Climate Hazards Center - UC Santa Barbara).

2.2. Climatología

Inicialmente para la selección de las estaciones de precipitación se realizó un buffer con el fin de seleccionar estaciones cercanas al área de interés, las cuales se presentan en la tabla 1. Posteriormente se tuvo en cuenta que las estaciones contaran con un registro de precipitación de 1990-2015 para abarcar los años sobre los que Vélez et al. (2006) evaluó su modelo, y además contar con información reciente de precipitación. Es por esto que las tres primeras estaciones de la tabla fueron descartadas, y se seleccionaron las estaciones San José, La Victoria, Baraya y La Yeguera como estaciones de trabajo.

Tabla 1. Estaciones de precipitación del IDEAM que tienen influencia en el área de estudio.

Nombre	Categoría	Estado	Fecha de instalación	Altura	Municipio	Fecha de suspensión
DESIERTO LA TATACOA [21115010]	Climática Principal	Suspendida	13/07/2005	459	Villavieja	29/04/2019
BARAYA [21115110]	Agrometeorológica	Suspendida	15/01/1974	635	Baraya	15/03/1981
SINAI HACIENDA [21110310]	Pluviométrica	Suspendida	15/10/1979	400	Villavieja	15/02/2002
VICTORIA LA [21110290]	Pluviométrica	Activa	15/07/1968	400	Villavieja	
YEGUERA LA [21110120]	Pluviométrica	Activa	15/11/1965	400	Villavieja	
SAN JOSE [21115060]	Climática Ordinaria	Activa	15/10/1963	400	Villavieja	
BARAYA [21110070]	Pluviométrica	Activa	15/11/1958	615	Baraya	

Para el ingreso de la precipitación al modelo SWB este permitía archivos tipo ASCII e información tabular en archivo .txt. Con el fin de definir la opción de entrada se generaron

los dos archivos y se seleccionó el que se adaptó mejor a las condiciones del área de estudio.

El archivo tipo ASCII, se generó a partir de información descargada de datos de precipitación mensuales del CHIRPS, para el periodo desde el año 1990 hasta el 2015. Posteriormente, por medio de un código programado en Python por Rendón-Álvarez (2020), se realizó el recorte del área de estudio a cada uno de los archivos mensuales del CHIRPS y, además, se generó una capa con los valores promedios de precipitación en un formato raster con el tamaño de celda original de los archivos (5333m). Con el fin de adaptar la información al proyecto se redefinió el tamaño del píxel del raster de precipitación en 100m para tener mayor detalle en los cálculos de la zona, pero además garantizando un número de columnas y filas que no generaran problemas posteriores en la ejecución del modelo SWB.

Para determinar si la calidad de datos obtenida a partir del CHIRPS era adecuada para el desarrollo de este proyecto, se buscó comparar los valores observados en las estaciones con los valores obtenidos a partir de las interpolaciones del CHIRPS. Se interpoló la información con las 4 estaciones cercanas al área de estudio usando otro código de programación desarrollado por Rendón-Álvarez (2020) que permite ejecutar métodos de interpolación determinísticos y estocásticos como el Kriging ordinario (KO), y Kriging de deriva externa (KED). Para el Kriging de deriva externa, se realizaron los respectivos ajustes de variogramas con métodos como el efecto pepita y esférico. Estos ajustes al variograma son importantes ya que deben ser incluidos en el código de interpolación. Finalmente, se obtienen los resultados de interpolación con KO, y KED. De esta última interpolación se obtiene un archivo adicional, el cual indica la calidad y confiabilidad de la interpolación distribuida espacialmente en la zona de estudio.

Por otra parte, el ingreso al modelo en forma de archivo tabular solo permite ingresar los datos de una estación con información de precipitación, lo que llevo a realizar un análisis de la calidad del registro para definir la estación con la que se ejecutó el modelo SWB.

Para el análisis de la calidad de la serie de tiempo se tuvo en cuenta la cercanía al área de estudio, y la estación con el menor de datos faltantes y mayor índice de continuidad (IC) el cual corresponde a la estación San José.

Para definir si los registros en la estación respondían a condiciones climáticas Normal, Niño y Niña; periodo de tiempo en el que se evaluó el modelo SWB, se utilizó una macro desarrollada por Rendón-Álvarez (2020) la cual, mediante gráficos, permitió establecer si los registros tomados se veían afectados por el ENOS.

Además, en esta macro, se analizaron gráficas que compararon el comportamiento de la precipitación en la estación con los registros del ENOS tomados del NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica), esto con el fin de establecer los años en los que las condiciones Niño, Niña y Normal se presentaban con fuerte intensidad. A partir de los picos extremos de Niño y Niña se definieron los periodos para la ejecución del modelo y por medio de las gráficas de precipitación mensual, se definió el mes inicial y final de los años hidrológicos a evaluar en las diferentes condiciones climáticas.

Adicionalmente, esta macro permitió generar histogramas de frecuencia para entender las fluctuaciones de la precipitación a escala mensual y anual.

Con la estación y el periodo de registro definido, los datos fueron organizados de acuerdo con el ejemplo proporcionado por el modelo SWB como un archivo tabular que contiene los valores de precipitación, temperatura promedio mínima y máxima de la estación San José. Los elementos de datos opcionales que no fueron utilizados se establecieron en el archivo como -99999.

Finalmente, se hace una correlación entre los datos obtenidos por el CHIRPS (archivo tipo ASCII) y los archivos tabulares con la estación del IDEAM (Archivo .txt) evaluando los valores obtenidos en cada una de las estaciones usando la interpolación del CHIRPS y así, analizar que tanto se aproximan los datos interpolados a los datos observados, para posteriormente seleccionar el archivo que favoreció el objetivo del proyecto.

2.3. Direcciones de flujo superficial

Se ingresó en formato de cuadrícula de enteros a partir de un modelo de elevación digital con el algoritmo de enrutamiento de flujo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984) que otorga un sentido al flujo único en cada celda de la cuadrícula, esto a partir de la pendiente desde la celda central y sus celdas vecinas.

Se debe considerar que el Código SWB no tiene la capacidad de discriminar si el flujo en una celda va a varias celdas vecinas, de ser así el modelo indica que hay una depresión cerrada. Por esto es importante tener en cuenta que el DEM debe estar previamente corregido y no presentar vacíos, esto se realizó con la herramienta Fill de ArcGIS.

2.4. Cobertura Vegetal

Para la elaboración de este mapa se utilizó una imagen LANDSAT-8 con una resolución de 30 m que integran el programa mundial de la NASA's Science Mission Directorate y aporta a los usuarios imágenes visibles e infrarrojas con alta resolución (USGS, 2018). Las imágenes fueron descargadas de forma gratuita de la plataforma Earth Explorer proporcionada por el USGS.

El mapa de entrada se elaboró a partir de la metodología de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) propuesta por (Tucker, 1979) en la que se clasifica la vegetación a partir de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED), que para LANDSAT corresponde a las Bandas 5 y 4 respectivamente.

El cálculo del NDVI está dado por la siguiente ecuación (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Una vez realizado el procedimiento en ArcGIS se reclasificó el ráster obtenido según la tabla 2 propuesta por (Olivo, 2017).

Tabla 2. Clasificación de la cobertura vegetal mediante los valores de NDVI. Tomado de (Olivo, 2017).

Rangos de NDVI	
< 0	Presencia de agua y/o áreas con sombras
0 - 0,2	Suelo desnudo
0,2 – 0,4	Vegetación escasa + suelo
0,4 – 0,6	Vegetación dispersa
>0,6	Vegetación densa

Posteriormente este ráster fue categorizado según la clasificación nivel II de Anderson (Tabla 3) de la cual se obtiene la relación entre el tipo de suelo y la cobertura, para

finalmente adquirir el número de curva. Esta reclasificación se realizó apoyada en el mapa de cobertura de suelo propuesto por (Núñez & Toro, 2017).

Tabla 3. Reclasificación de la cobertura vegetal por medio los valores de la clasificación nivel II de Anderson.

Rangos de NDVI	LU	COD	ANDERSON
<0	200	5	Superficies de agua
0 - 0,2	240	7	Suelo Desnudo
>0,4	150	3	Pastizales y Arbustos

Finalmente, este mapa se ingresó al código en formato ASCII como lo especifica el modelo.

2.5. Capacidad de retención de agua en el suelo

Esta entrada se generó en formato ASCII de números reales y para cada textura del suelo se asignó una capacidad de agua disponible (AWC) de acuerdo con la tabla proporcionada por (Thorntwaite y Mather, 1957) (Tabla 4), recomendada por el Manual SWB. La textura de suelo fue tomada del trabajo de (Vélez et al., 2006).

Tabla 4. Clasificación del grupo hidrológico del suelo relacionada a la textura del suelo. Adaptado de (Vélez et al., 2006).

Código	Textura de suelo	AWC (in/ft)	AWC (mm/m)
J4d3	Franco Arcilloso Arenoso	2.7	225
Q2a	Arena Franca	1.2	100
J5c3	Franco Arenoso	1.6	133
J5d3	Franco Arenoso	1.6	133
V3b	Arcilla Arenosa	3.2	266
Q3a	Arena Franca	1.2	100
J5d3	Franco Arenoso	1.6	133
J4d3	Franco Arcilloso Arenoso	2.7	225

2.6. Grupo hidrológico

Este fue ingresado como un mapa en formato ASCII clasificado a partir de los Grupos hidrológicos del suelo del Servicio de Conservación de Suelos (SCG, 1964 en Bradbury et al., 2000) como se observa en la tabla 5 y 6. La clasificación fue ingresada con valores enteros de 1 a 4 para los grupos de la A-D respectivamente.

Tabla 5. Clasificación del grupo hidrológico del suelo propuesto por (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000).

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura del suelo
A	Rápida	Alta capacidad de Infiltración > 76 mm/h	Arenosa Arenosa-limosa Franca
B	Moderada	capacidad de Infiltración 76-38mm/h	Franco- arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillosa-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de Infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

Tabla 6. Grupo hidrológico del suelo relacionado a la textura del suelo. (Vélez et al. 2006; Adaptado de SGC, 1964).

Código	Textura de suelo	Grupo Hidrológico
J4d3	Franco Arcilloso Arenoso	2
Q2a	Arena Franca	1
J5c3	Franco Arenoso	1
J5d3	Franco Arenoso	1
V3b	Arcilla Arenosa	3
Q3a	Arena Franca	1
J5d3	Franco Arenoso	1
J4d3	Franco Arcilloso Arenoso	2

2.7. Ejecución SWB (Soil Water Balance)

Se integraron todos los insumos generados anteriormente. Para la ejecución del modelo SWB, se editó el código de recarga (recharge.cti) que ofrece el USGS y funciona como panel de control del modelo SWB, en el cual se ingresaron las coordenadas (x,y) de la zona de interés, número de filas, columnas y tamaño de celda de los archivos tipo ASCII

(tabla 7) Así mismo, se configuraron los nombres de los archivos que requiere el SWB, y se estableció la ecuación de evapotranspiración con la que se ejecutó el modelo, además, se modificaron los archivos de salida que arrojó el modelo como el lugar de almacenamiento y la escala temporal en la que se presentaron los resultados.

Los archivos de salida del modelo se exportaron a ArcGIS, se procesaron y reclasificaron de acuerdo con el manual del modelo SWB (Westenbroek et al., 2010) para generar los mapas finales de evapotranspiración real y recarga potencial en condiciones Normal, Niño y Niña.

Tabla 7. Resumen de datos ingresados en el panel de control del SWB.

Coordenadas X0 ; Y0 X1 ; Y1	528.502 ; 274.871 562.502 ; 306.471
Número de filas	316
Número de columnas	340
Tamaño de celda	100 m
Ecuación de evapotranspiración	Thornthwaite-Mather $E_{tp} = 16 \left(\frac{I}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10Ta}{I} \right)^3$

3. Marco conceptual

La recarga se define como el agua que ingresa a la zona de saturación, y aumenta las reservas subterráneas. Esto puede ocurrir naturalmente, por precipitación, transferencia desde otras unidades hidrogeológicas, o artificialmente debido a actividades como riego, fugas en la red de suministro o infiltración de reservorios y sedimentos (Balek, 1988).

3.1. Tipos de recarga

Para la estimación de la recarga es importante tener presente que la mayoría de las técnicas desarrolladas, no miden el valor real, si no que hacen una estimación potencial la cual se define como el agua que infiltra, pero no necesariamente llega al nivel piezométrico (Rushton, 1988). La recarga potencial y la recarga real se diferencian según el procedimiento de estimación y la zona del suelo que se considera (Scanlon et al., 2002).

Cuando se habla de recarga real, el análisis se efectúa a partir de información hidrogeológica, es decir mediante análisis en el nivel freático, ya que asegura la llegada de la recarga a la zona saturada; el método WTF (Water Table Fluctuation) es un caso de estimación que se aproxima a la recarga real. Por otra parte, la recarga potencial no considera directamente la zona saturada, y el flujo estimado como recarga puede o no alcanzar el nivel freático. Esta recarga efectúa el análisis a partir de observaciones hidrológicas, de agua superficial o de zona no saturada por ejemplo el modelo de balance de humedad en el suelo (SWB) (Bastidas, 2019) utilizado en el presente estudio ya que es la mejor aproximación a la recarga al no contar con datos directos de campos limitados por las condiciones de pandemia y los altos costos para la instrumentación del acuífero.

Para la clasificación de la recarga, Lerner et al. (1990) proponen una subdivisión, teniendo en cuenta su fuente:

- Recarga directa por precipitación.
- Recarga indirecta, producto de cauces.
- Flujos laterales, provenientes de otros acuíferos.
- Retorno de riegos
- Recarga Urbana

3.2. Métodos de estimación de recarga

Algunos autores (Scanlon et al. 2002; Lerner et al. 1990; Samper, 1997) clasifican los métodos de estimación de recarga según la procedencia de los datos que requiere cada técnica, incluyendo una clasificación secundaria donde se subdividen en técnicas físicas, trazadores y modelos numéricos.

El primer grupo incluye los métodos que toman datos del agua en superficie, el segundo usa técnicas con datos de la zona no saturada y el tercer grupo reúne los métodos que utilizan los datos de la zona saturada. En este documento se tendrá en cuenta la clasificación propuesta por Lerner et al. (1990) y Samper (1997), la cual divide los métodos de estimación de recarga subterránea en:

- Medidas directas.
- Balance de Agua.
- Técnicas de Darcy.
- Técnicas de Trazadores.
- Métodos Empíricos.

3.2.1. Medidas directas

Los métodos de medición directa trabajan con lisímetros los cuales son tanques o bloques instrumentados llenos de suelo alterado o inalterado, con o sin vegetación donde el flujo que circula a través de este puede ser medido; el bloque es aislado hidrológicamente del suelo que lo rodea, pero es una muestra representativa ya que tiene la misma vegetación y está expuesto al mismo clima (Vélez y Velásquez, 2019). Sin embargo, son costosos y proporcionan únicamente medidas puntuales.

3.2.2. Método de balance de agua

El método del balance hídrico se basa en la ley de conservación de masa, evaluado en determinado período, en un área de volumen conocido definida por condiciones de contorno en donde la diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento del agua (Vélez y Velásquez, 2019). La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes y se pueden realizar en la zona superficial, saturada y no saturada (Samper, 1997).

A continuación, se presenta una síntesis de la literatura de algunos tipos de balance hídrico presentados por autores como (Hendrickx y Walter, 1997; Kendall y Caldwell 1998; Lerner et al., 1990; Santos et al., 2016; Vélez y Velásquez, 2019; Xie et al., 2017).

- **Balance de humedad del suelo:** La lluvia y la evapotranspiración potencial constituyen los datos de entrada al balance y la evapotranspiración real y la recarga los datos de salida, siendo este el método más utilizado. Los modelos de balance de humedad del suelo se clasifican en: modelos de base física y modelos de aproximación matemática (tipo tanques o reservorios) (Xie et al., 2017).
- **Balance de ríos y canales de agua.** La recarga se calcula midiendo la caída del nivel del agua después de aislar una sección del canal. La caída neta en los niveles de agua se atribuye a la infiltración una vez calculadas las pérdidas por evaporación y precipitación (Vélez y Velásquez, 2019).
- **Aumento del Nivel Freático:** El volumen almacenado producto de un aumento del nivel freático es igual a la recarga, luego de tener en cuenta otros flujos de entrada y salida como pozos de bombeo y flujo entre acuíferos (Vélez y Velásquez, 2019).
- **Descarga de la cuenca:** La descarga promedio es igual a la recarga neta promedio más la tasa de extracción. Si el acuífero no es explotado, la tasa de extracción es cero, por lo tanto, la descarga promedio será igual a la recarga neta promedio (Vélez y Velásquez, 2019).

3.2.3. Aproximaciones de Darcy

A partir de la ecuación de Richards, la técnica de Darcy estudia la zona no saturada y con base en Boussinesq la zona saturada. Para esta última realiza un conteo de datos de contenido de humedad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, por medio de modelos numéricos o técnicas analíticas, según la simplicidad de las condiciones de campo o la cantidad de simplificaciones asumidas (Vélez y Vásquez, 2019).

La modelación inversa de flujo utiliza herramientas que resuelvan la ecuación de Darcy (MODFLOW, FeFLOW, SUTRA, etc.) considerando los niveles piezométricos y los caudales como entradas del modelo, se obtienen como salidas las tasas de recarga (Santos et al., 2016).

3.2.4. Método de trazadores

Los trazadores son sustancias que se encuentran en el agua y sirven para definir caminos preferenciales de flujo (Hendrickx y Walter, 1997), determinar el mecanismo que causa el flujo de agua, identificar la fuente de los solutos y el sistema de contaminación, calcular el ciclo biológico de los nutrientes en el ecosistema y determinar la fuente de recarga (Kendall y Caldwell, 1998). Los principales trazadores son los isótopos, nitratos, bromuro y la temperatura.

3.2.5. Métodos empíricos

Las técnicas empíricas correlacionan la recarga con otras variables hidrológicas medibles como precipitación, temperatura, elevación, flujo en canales, entre otros. Esta relación se evalúa a lo largo del tiempo y transpone el valor estimado a otras áreas de recarga con características similares (Vélez y Vásquez, 2019).

3.3. Método del SWB (Soil-Water Balance)

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desarrolló un código para estimar las variaciones espaciotemporales de la recarga por precipitación por medio del método SWB modificado del propuesto por Thornthwaite-Mather (1948). Este código fue modificado de Visual Basic a Fortran 95 por el USGS.

Junto con el código el USGS ofrece un manual desarrollado por Westenbroek et al. (2010) el cual permite entender los procesos internos que ejecuta este modelo (Figura 2) además, proporciona información sobre cómo se deben organizar e ingresar los datos al código de programación del SWB. A continuación, se exponen algunas de las bases importantes del manual, para el desarrollo de este proyecto.

Westenbroek et al. (2010) explica que el cálculo se realiza con base en la aplicación de sistemas de información geográficos (SIG), y que el modelo requiere ciertos datos de entrada los cuales pueden estar en formato ASCII y tabulares. Así mismo, asegura que el método calcula en cada celda de la cuadrícula un valor de recarga mediante la siguiente ecuación en la que cada elemento es controlado por uno o más módulos del SWB:

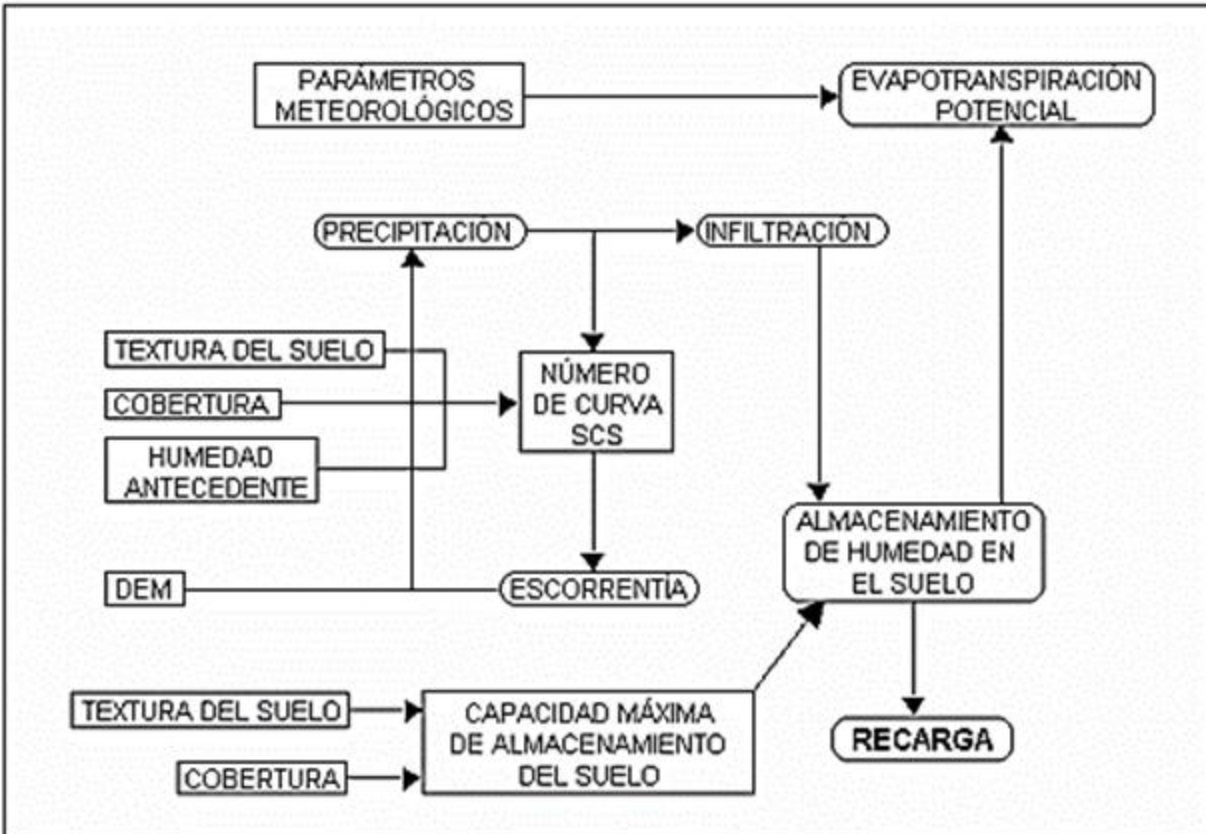


Figura 2. Metodología del modelo SWB. Adaptado de Vélez et al., (2006)

$$\begin{aligned}
 \text{Recarga} = & (\text{Precipitación} + \text{Flujo de entrada}) \\
 & - (\text{Interceptación} + \text{Flujo de salida} + \text{ET}) \\
 & - \Delta \text{ humedad del suelo}
 \end{aligned}$$

3.3.1. Entradas de agua al modelo

Precipitación: Se ingresa al modelo de forma diaria en un archivo ASCII con múltiples series de tiempo distribuidas espacialmente, o un archivo tabular con una sola estación de referencia (Westenbroek et al., 2010).

Flujo de entrada: Se incorpora por medio de un archivo ASCII basado en el modelo de elevación digital. Este proporciona la escorrentía superficial de las celdas contiguas que direcciona el flujo de salida en la cuadrícula de la pendiente que desciende (Westenbroek et al., 2010).

Interceptación: Se calcula a partir de los valores de precipitación ingresados al modelo en el cual una parte es retenida por la vegetación y evaporada. La cantidad de precipitación debe superar la porción interceptada antes de asumir que el agua entra en contacto con el suelo (Westenbroek et al., 2010).

Flujo de salida: El flujo de salida o escorrentía es calculada con base en el número de curva que juega un papel importante debido a que, para cada celda enlaza la precipitación (P), el coeficiente de capacidad de retención de humedad del suelo y la escorrentía total (ESD). Adicionalmente este cálculo tiene en cuenta un factor de abstracción inicial que se define como una porción del volumen de precipitación que cae al inicio de una lluvia, pero no se convierte en escorrentía (Westenbroek et al., 2010).

Para el componente de flujo de salida el modelo utiliza la siguiente ecuación (Westenbroek et al., 2010):

$$R = \frac{(P - I\alpha)^2}{(P + [Smax - I\alpha])} \quad P > I\alpha$$

R: Escorrentía

P: Precipitación diaria

Smax: Capacidad máxima de retención de humedad del suelo.

Iα: Abstracción inicial.

El cálculo del factor Iα se estima mediante la siguiente ecuación:

$$I\alpha = 0.2Smax$$

El Smax de almacenamiento está dado por el número de curva según la cobertura del suelo:

$$Smax = \left(\frac{1,000}{CN}\right) - 10$$

Los números de curva se clasifican según las tres condiciones de estado de humedad del suelo propuestos en la tabla 8 (Westenbroek et al., 2010).

Tabla 8. Tabla de clasificación de humedad del suelo. Tomada de Westenbroek et al. (2010)

Condición	Humedad del suelo	Temporada inactiva	Temporada de crecimiento
I	Seco	< 0.05	<1.4

II	Intermedio	0.5 – 1.1	1.4 -2.1
III	Casi saturado	>1.1	>2.1

La condición II determina la III ya que a partir de la primera se ajusta el valor hacia arriba para una celda, como se muestra en la siguiente ecuación (Mishra y Singh, 2003):

$$CN = \frac{CNARC(II)}{(0.427 + 0.00573 * CNARC(II))}$$

Para el caso de la condición I los valores de curva se ajustan hacia abajo desde la condición II como se muestra en la siguiente ecuación (Mishra y Singh, 2003).

$$CN = \frac{CNARC(II)}{(2.281 + 0.01281 * CNARC(II))}$$

3.3.2. Flujos de salida del modelo

Evapotranspiración (ET): El código cuenta con cinco de los métodos más usados para el cálculo de evapotranspiración potencial: Thornthwaite-Mather (1957); Jensen-Haise (1963); Blaney-Criddle (1966); Turc (1961); Hargreaves y Samani (1985).

Según Westenbroek et al. (2010) los cinco métodos requieren la entrada de temperaturas mínimas y máximas diarias, a excepción del Thornthwaite-Mather y Hargreaves-Samani, los demás métodos requieren humedad relativa, velocidad del viento y el porcentaje de horas de sol diario.

Cambio en la humedad del suelo: En el método esta humedad se calcula con base en Thornthwaite (1948) y Thornthwaite y Mather (1957). Según lo planteado por Westenbroek et al. (2010) para llegar a obtener este valor se debe calcular otra información como:

P-PE: Consiste en restar la evapotranspiración potencial de la precipitación medida de forma diaria. Si el valor obtenido es positivo indica que existe un exceso de potencial de agua, de ser negativo representa un déficit.

Pérdida potencial acumulada de agua (APWL): Se obtiene con la suma de los valores negativos diarios calculados en el numeral anterior (P-PE) (Westenbroek et al., 2010). La humedad del suelo está determinada por la diferencia entre la precipitación y la

evapotranspiración, si el valor sobrepasa la capacidad máxima de retención de agua, el exceso de humedad se convierte en recarga.

Evapotranspiración real (ET real): Para el modelo, según Westenbroek et al. (2010) la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial cuando $P-PE$ es positivo, de ser negativo la ET real es igual al cambio en la humedad del suelo.

4. Área de estudio

La zona de estudio cuenta con una extensión de 207 km², se encuentra localizada en el departamento del Huila (Figura 33) y hace parte del área definida como distrito regional de manejo integrado de La Tatacoa (CAM, 2015).

Inicialmente el área de interés que fue propuesto para la elaboración del proyecto involucra el río Magdalena al occidente, río Cabrera al noreste y la quebrada Las Lajas al sur, pero debido a las limitaciones específicamente en el mapa de textura y usos. Por lo que finalmente se trabajó con el área ilustrada en el recuadro de color rojo en la figura 3.

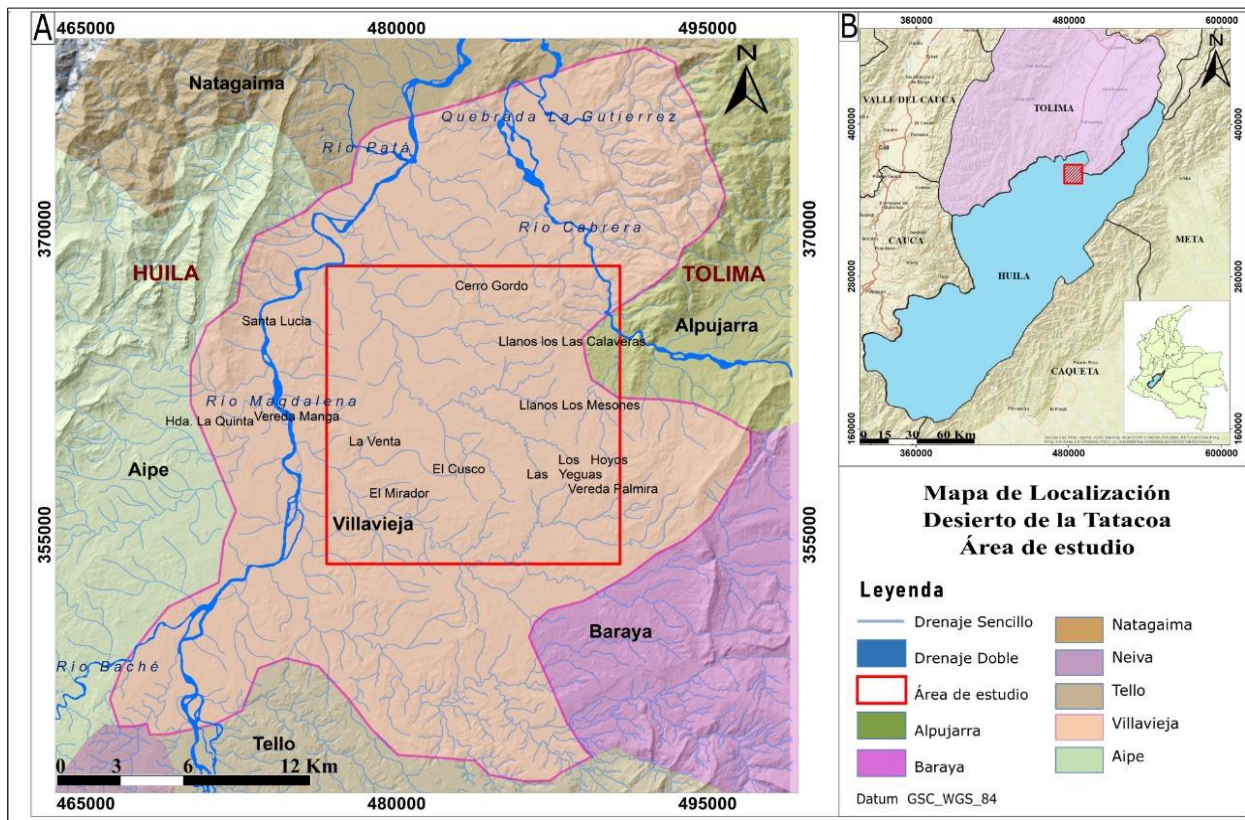


Figura 3. Localización geográfica del área de estudio. Elaboración propia. (Información tomada del IGAC)

El desierto tiene una altura promedio de 500 m.s.n.m. y de acuerdo con los registros meteorológicos, la temperatura presenta valores extremos entre 19,2 y 40 °C. La precipitación promedio de la zona varía entre 1000 y 1300 mm/año, estos valores debido a la condición de bosque seco tropical CAM (2015). Sin embargo, esta zona se conoce

comúnmente como desierto de La Tatacoa y es como será llamado durante el desarrollo del proyecto.

En cuanto a la hidrografía de la zona existen varias corrientes principales como el río Magdalena y el río Cabrera, ubicados al occidente y nororiente respectivamente. Además, cuenta con varias quebradas con un flujo de agua permanente como las quebradas Las Lajas, La Venta, La Tatacoa, entre otras. (Figura 44).

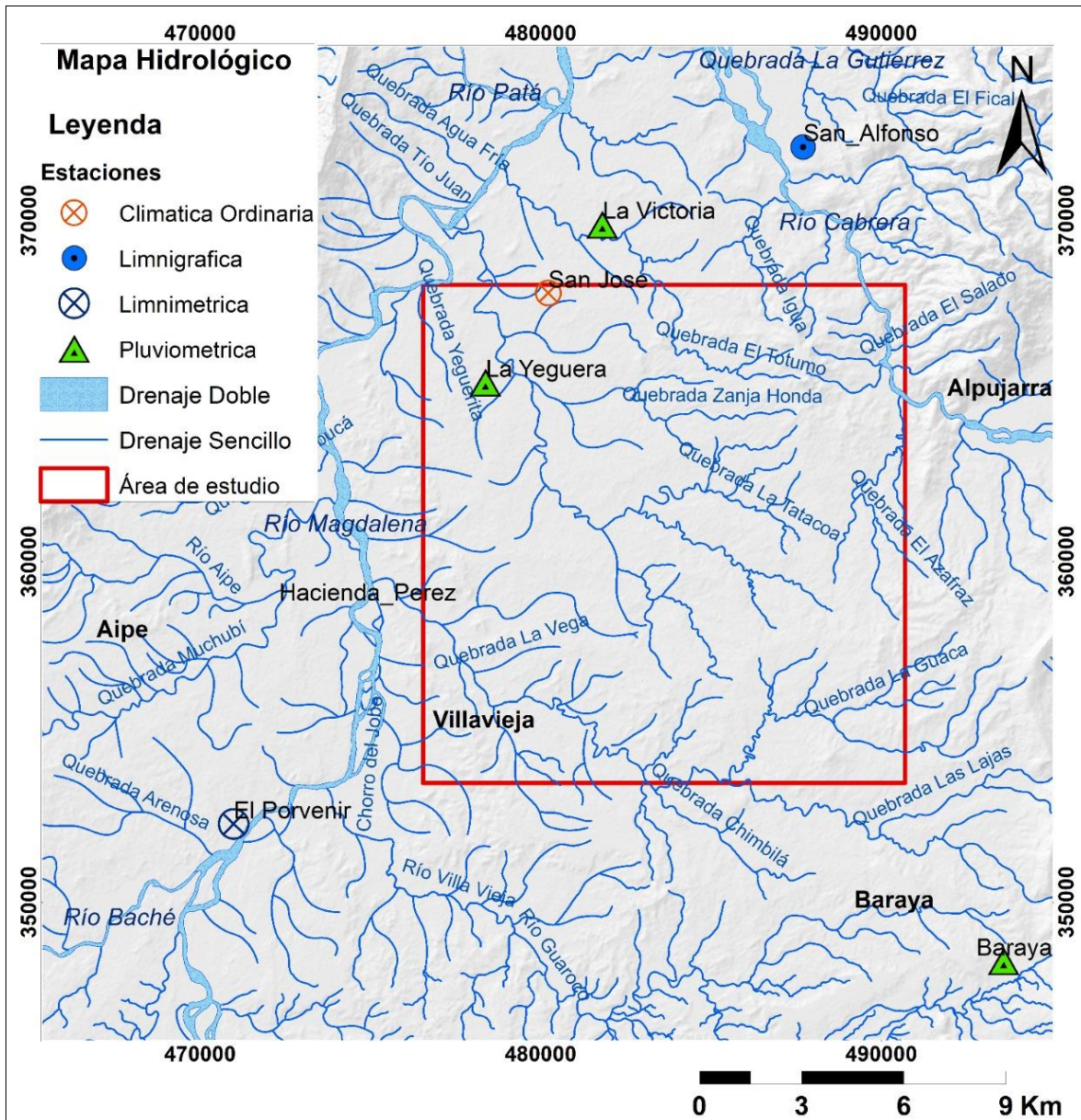


Figura 4. Mapa hidrológico del área de estudio con las principales corrientes superficiales.

4.1. Geología del desierto

La geología regional del área es descrita a partir de las memorias explicativas de la plancha 302 de 1989 (Rodríguez y Fuquen, 1989) y plancha 303 de 2002 (Fuquen y Osorno, 2002) escala 1:100.00 del SGC. (Figura 55) (Tabla 9).

Tabla 9. Resumen de la geología regional del Desierto de la Tatacoa.

Geología Regional del Desierto de la Tatacoa		
Grupo	Formación	Descripción
	Formación Saldaña (T3J2slv - T3J2slp)	Miembro volcano-sedimentario (T3J2slv): Tobas vitreo-cristalinas de color gris a rosado, aglomerados color pardo con algunas intercalaciones de limolitas.
		Miembro hipoabisal (T3J2slp): Tobas vitreo cristalinas, porfiríticas de color grisáceo a rosadas.
	Formación Caballos (K1K2cb)	Capas de arenisca conglomerática grano-decreciente con estratificación cruzada separadas por lodolitas grises oscuras ferruginosas.
	Formación Hondita (Ksh)	Lodolitas grises oscuras con intercalaciones de arenitas finas de cuarzo, con cemento calcáreo y silíceo.
Grupo Honda (Ths)	Formación La Victoria (N1iv):	Gruesos paquetes de lodolitas y arcillolitas intercaladas con capas gruesas de areniscas y conglomerados.
	Formación Villavieja (N1vl):	Lodolitas grises y rojas que alternan con capas menores de litoarenitas volcánicas de grano fino a medio.
	Depósitos Aluviales (Qal)	Aluviones y terrazas recientes.

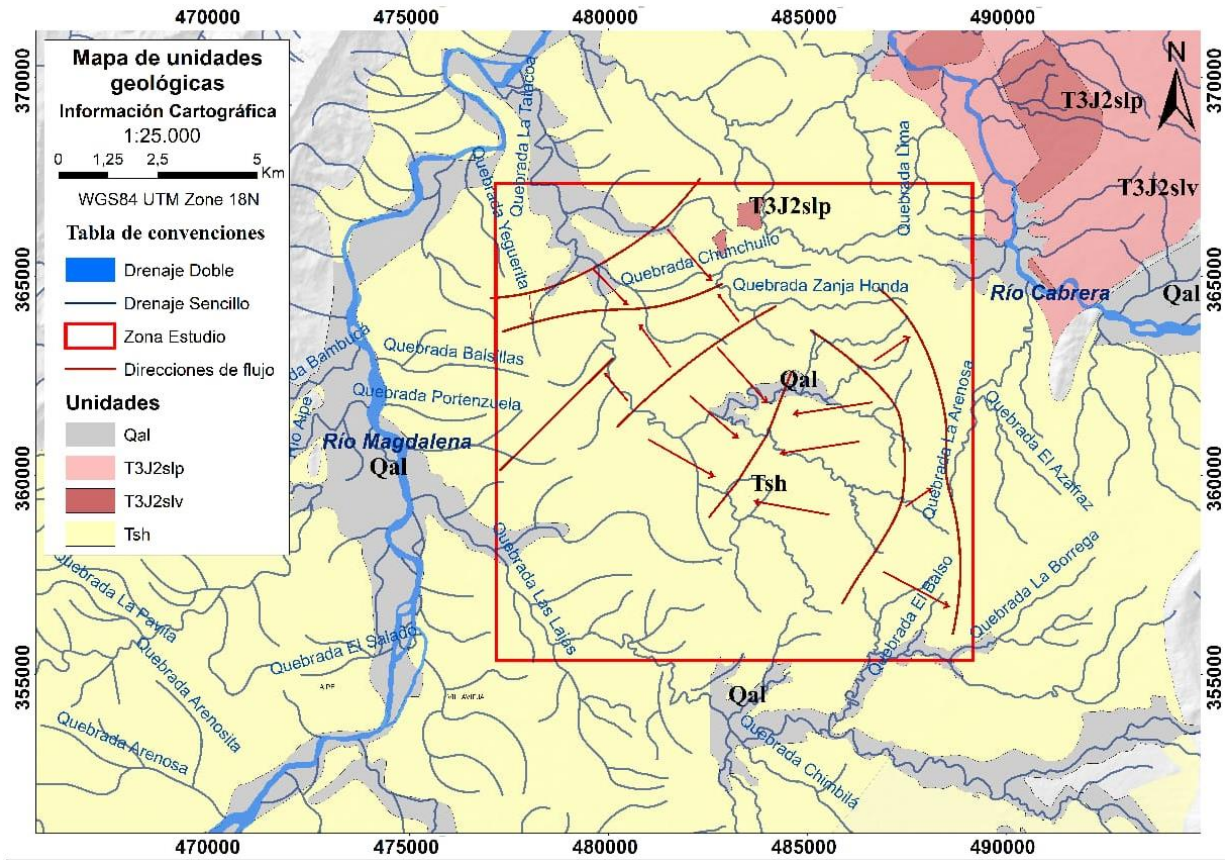


Figura 5. Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de (SGC, 1998; SGC, 2002; Vélez et al., 2006)

4.2. Geología estructural

En la zona de estudio existe un complejo control tectónico y estructural por la combinación de pliegues y fallas (Fuquen y Osorno, 2002; Rodríguez y Fuquen, 1989). A continuación, se describen las principales fallas cercanas al área de estudio.

4.2.1. Falla de Baraya

Esta se encuentra al este de la zona de estudio es una falla de tipo inverso con un rumbo N-S a N45°E buzando hacia el este, forma parte del Sistema de fallas Algeciras-Garzón (Fuquen y Osorno, 2002; Rodríguez y Fuquen, 1989).

4.2.2. Falla La Chusma

Esta falla limita la cuenca de Neiva con la Cordillera Central con un rumbo de N30°E en la zona de Aipe y N70°E cuando corta el Sinclinal de La Medialuna. Esta hace parte del

Sistema de fallas del Oeste del Magdalena (La Plata – La Chusma) (Fuquen y Osorno, 2002; Rodríguez y Fuquen, 1989).

4.2.3. Falla Andalucía

Esta se observa hacia el este en el desierto de La Tatacoa, es una falla inversa con un rumbo de N30°E. Buza de manera abrupta hacia el oeste, y hace parte del Sistema de fallas del Oeste del Magdalena (La Plata–Chusma) (Fuquen y Osorno, 2002; Rodríguez y Fuquen, 1989).

4.3. Hidrogeología

A continuación, se presentará una breve descripción de la hidrogeología del área de estudio principalmente de documentos como IDEAM (2010); IDEAM (2015); IDEAM (2019); Vélez et al. (2006).

4.3.1. Provincia hidrogeológica y sistema acuífero

En el IDEAM (2010), se dividió el país en 16 provincias hidrogeológicas (PHG), dentro de las que se encuentra la PHG del Valle Alto de Magdalena. Esta PHG está delimitada al norte y oeste por las rocas precretácicas de la Cordillera Central, al sureste parcialmente por el Sistema de fallas Algeciras-Garzón y al noreste el Sistema de fallas Bituima-La Salina (Figura 66).

Dentro del PHG del Valle Alto del Magdalena, se encuentra localizado el Sistema Acuífero Neiva-Tatacoa-Garzón (SAM 2.3) (IDEAM, 2015). El SAM 2.3 tiene un área superficial de 4277km^2 y espesores que pueden alcanzar los 800 m. Está formado por varios acuíferos libres, semiconfinados y confinados (IDEAM, 2015).

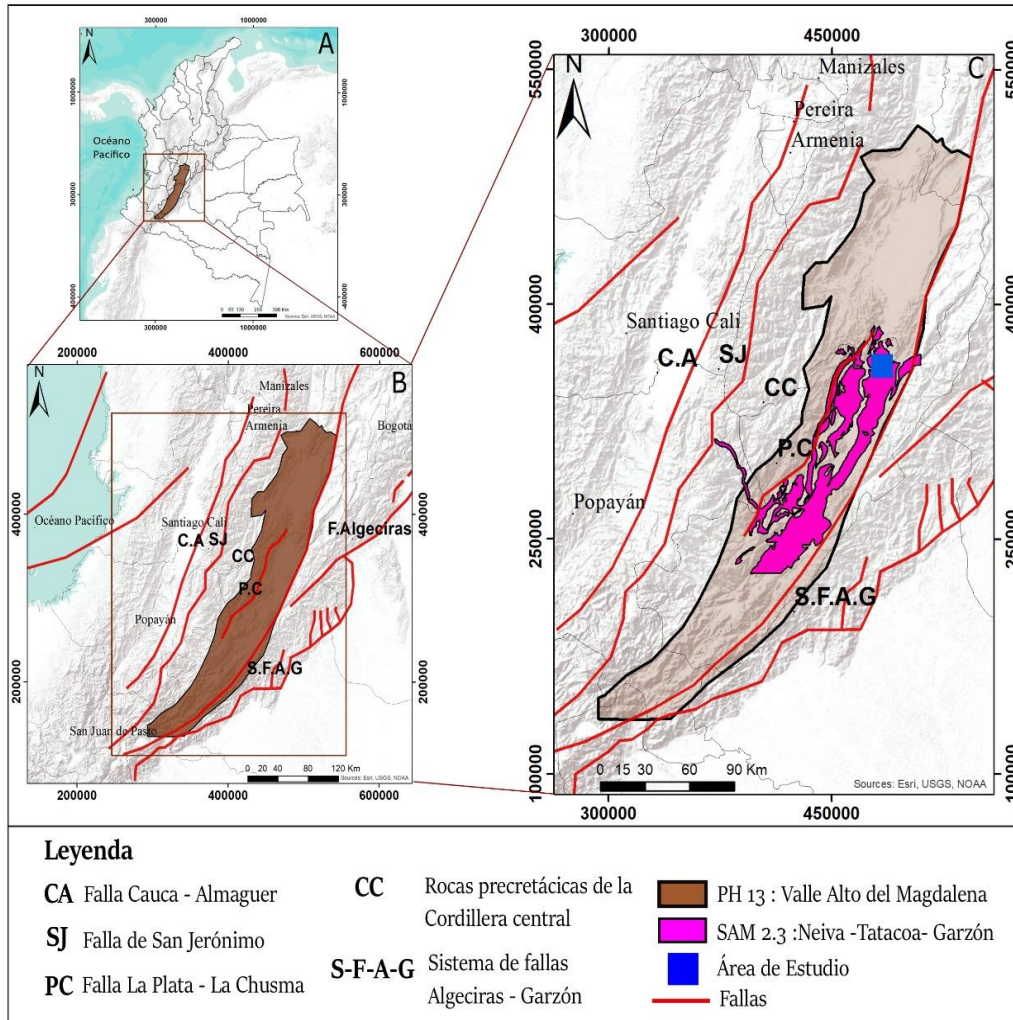


Figura 6. Mapa de localización de la provincia hidrogeológica y Sistema Acuífero Neiva-Tatacoa-Garzón. Adaptado de (ENA, 2010; ENA, 2015; ENA, 2019)

4.3.2. Modelo hidrogeológico

En el Estudio Nacional del Agua (2010) se propone un modelo hidrogeológico básico para la cuenca del Alto Magdalena en el que se describe al Grupo Honda como parte de un acuífero de porosidad primaria (IDEAM, 2010), Grupo que es descrito por Vélez et., al (2006) en el modelo hidrogeológico realizado específicamente para el desierto de La Tatacoa. Este modelo planteado por Vélez et al. (2006) clasifica la zona de estudio en dos unidades hidrogeológicas (Figura 77) de acuerdo con las formaciones que hacen parte del Grupo Honda definiéndolas así:

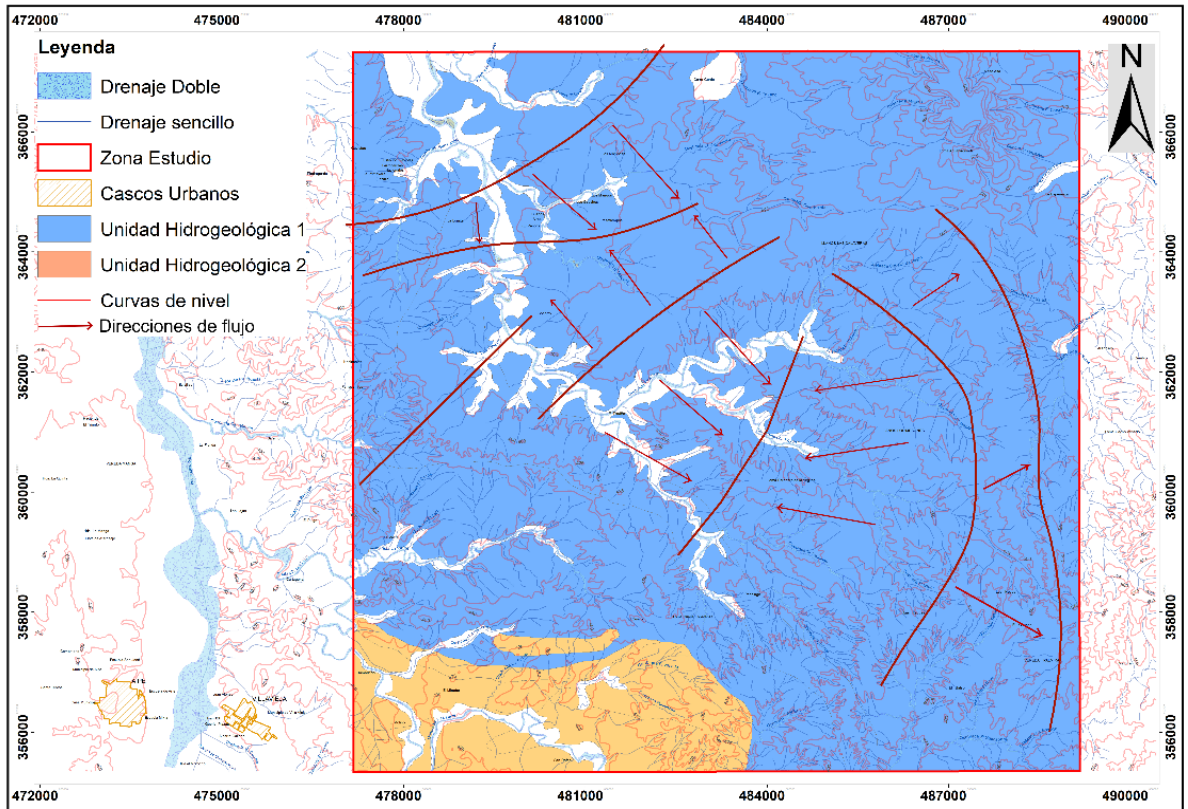


Figura 7. Mapa de unidades hidrogeológicas del desierto de La Tatacoa. Subdivide el área de interés en dos zonas con potencial hidrogeológico. Además, presenta direcciones de flujo de la zona de estudio. Adaptado de (Vélez et al., 2006).

- **Unidad Hidrogeológica 1:** corresponde a la Formación La Victoria del Grupo Honda, en él se definen 3 estratos limitados por limolitas arenosas que por su baja permeabilidad y leve presencia de partículas de arena le confieren la característica de semiconfinados (Vélez et., al 2006). En la Figura 88 se observa la secuencia característica de esta unidad.
- **Unidad Hidrogeológica 2:** corresponde a la Formación Villavieja del Grupo Honda, compuesta por limolitas arenosas y arcillas que por su baja permeabilidad y leve presencia de partículas de arena inhiben la fácil extracción del agua.

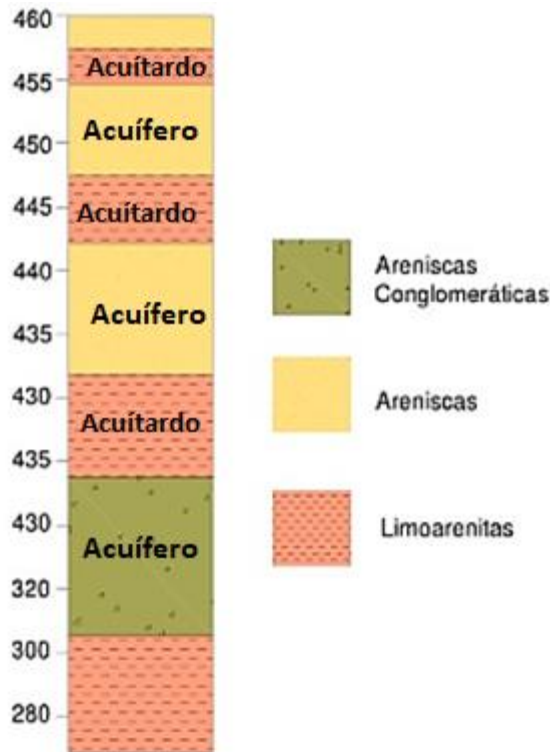


Figura 8. Secuencia estratigráfica para los acuíferos de la Unidad Hidrogeológica 1. (Tomado de Vélez et al., 2006).

De base a tope Vélez et al. (2006) describen para la unidad hidrogeológica 1:

Capa 1: Areniscas conglomeráticas que se localizan en los niveles medios y superiores de la Formación La Victoria, con espesor variable (20-40 m) en el centro y suroeste del área de estudio. Su máximo espesor se localiza al sureste, alcanzando 50 metros alrededor de la quebrada El Pachingo, entre 350 y 400 m.s.n.m.

Capa 2. Delimitada en su parte superior e inferior por limolitas arenosas, esta presenta un espesor variable entre 20 y 40 m, en las cotas 300 y 340 m.s.n.m. Esta capa tiene buena continuidad en toda el área de estudio. En la parte central se hace menos profunda con un espesor entre 10 y 20 metros, a los 380 y 400 m.s.n.m.

Capa 3: Paquete de areniscas infrayacidas por limolitas. En la región noroeste, el espesor medio es de 20 m, entre 320 y 340 m.s.n.m, al suroeste, la capa varía entre 10 y 40 m. Hacia la parte central esta capa es menos espesa (10-20 m) a una altura de 380 y 400 m.s.n.m.

Vélez et al. (2006) realizaron una serie de perfiles hidrogeológicos (Figura 99) por medio de perfiles geoelectricos, geología y topografía de la zona, atravesando perpendicularmente los ejes axiales de los pliegues.

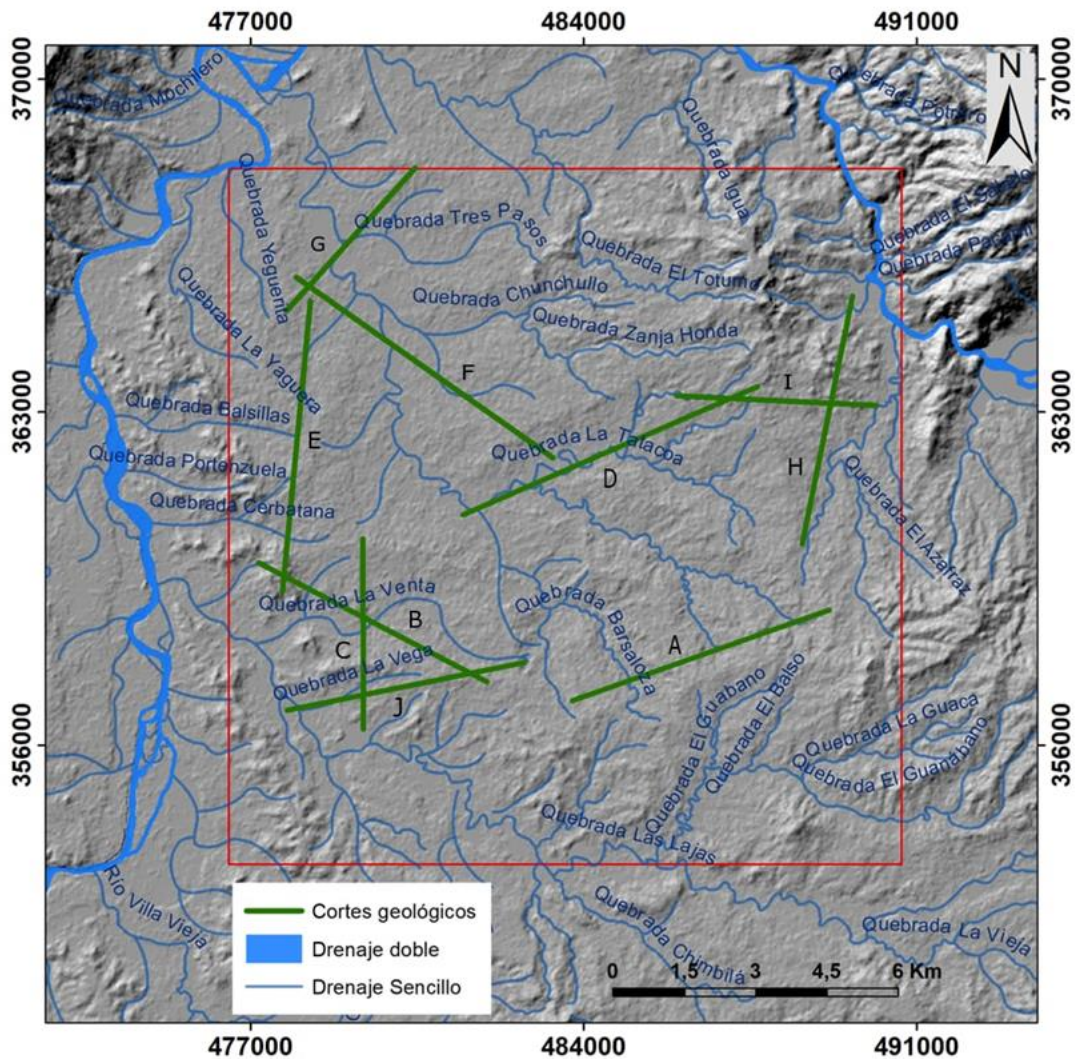


Figura 9. Mapa de localización de los cortes geológicos levantados a partir de información geofísica y topográfica. Adaptado de Vélez et al. (2006).

A continuación se presenta un par de perfiles hidrogeológicos realizados por Vélez et al. (2006) en la unidad hidrogeológica 1. Para más información revisar Anexo 1.

El perfil A-A' describe la parte suroriental de la zona, tiene una orientación NE-SW y en su parte central se encuentra el eje de un anticlinal. En este perfil se observa una serie

de limolitas arenosas intercaladas con areniscas de espesor variable entre 200 m hacia los costados este y oeste, hasta 250 m en la zona centro. Suprayaciendo este paquete, se encuentra una capa de arenisca media a conglomerática de 40 a 60 m de espesor confinada por limoarenitas, sobre la cual se encuentra una capa de areniscas y limolitas arenosas de 10 metros de espesor medio (Figura 1010) (Vélez et al., 2006).

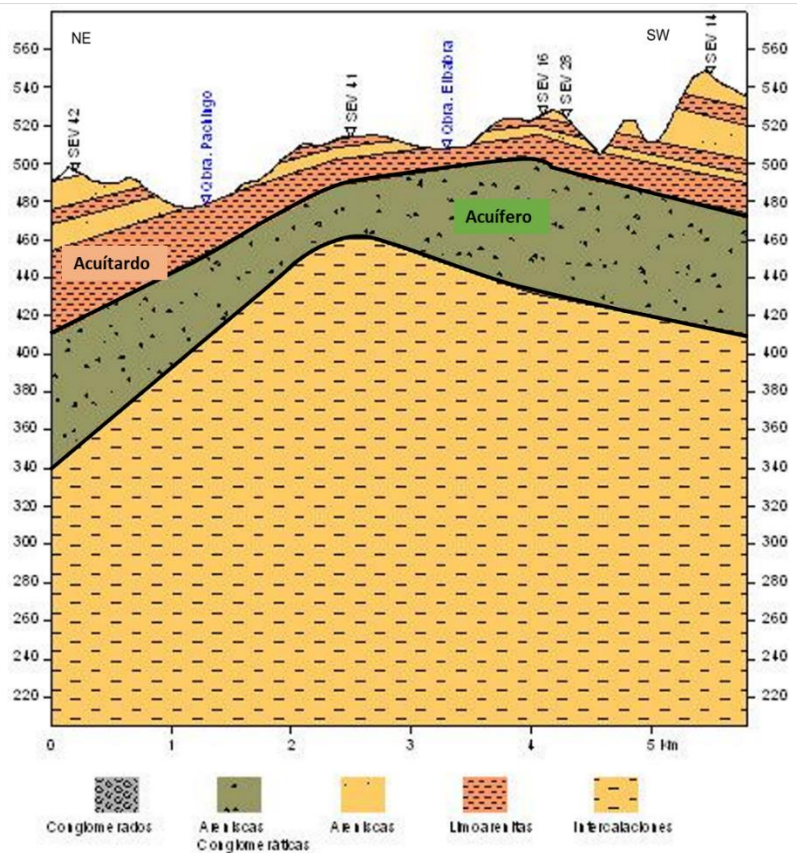


Figura 10. Perfil hidrogeológico A-A' en dirección NE-SW de la Unidad Hidrogeológica 1. (Tomado de Vélez et al., 2006)

El perfil D-D' representa el centro de la zona de estudio con una orientación NE – SW. En él se observa un anticlinal en el área de la quebrada Los Hoyos y un sinclinal hacia el oeste.

En la parte más profunda se observan limolitas arenosas y areniscas de 120 m de espesor, seguido de unas areniscas intercaladas con limoarenitas de 10 a 40 m que suprayacen unas areniscas de aproximadamente 20 m. En el lado SW los dos últimos paquetes presentan lentes conglomeráticos de arenisca de 40 y 10 m de espesor, que están presentando pinchamiento hacia el noroeste (Vélez et al., 2006) (Figura 111).

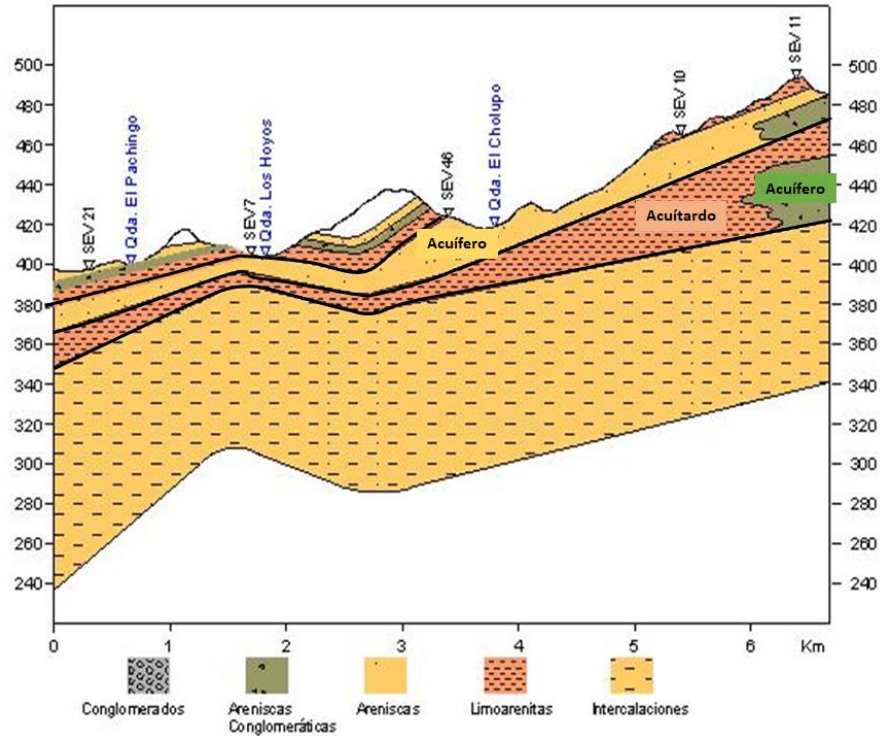


Figura 11. Perfil hidrogeológico D-D' en dirección NE-SW de la Unidad Hidrogeológica 1. (Tomado de Vélez et al., 2006)

Por otra parte, Vélez et al. (2006) realizaron 6 pruebas de bombeo que, comparados con los resultados de recuperación presentan un mismo orden de magnitud (Tabla 10) (Vélez et., al 2006). En cuanto a los datos de bombeo en el Aljibe El Cuzco no se reporta en el informe, por qué no se obtienen valores.

Tabla 10. Resultados análisis pruebas de bombeo y recuperación. Tomado de (Vélez et., al 2006).

Aljibe	Transmisividad (m ² /d)	
	Bombeo	Recuperación
El Cuzco	-	12.18
Las Margaritas	20.65	17.53
El observatorio	11.32	16.07
El Molino	16.33	14.69
Gaviotas	14.08	6.12
Buenos Aires	9.07	16.16

En este estudio desarrollado por Vélez et al. (2006) se construyó un mapa de isopiezas regional (Figura 122) mediante 46 puntos de agua distribuidos en el área de estudio. La toma de datos se realizó en verano en los meses de enero y febrero del 2006, en un periodo de pocas lluvias. En cuanto al método de interpolación, no se especifica cual de estos fue empleado. De manera general en el mapa se observa que a escala regional, el flujo del agua va de sureste a noroeste.

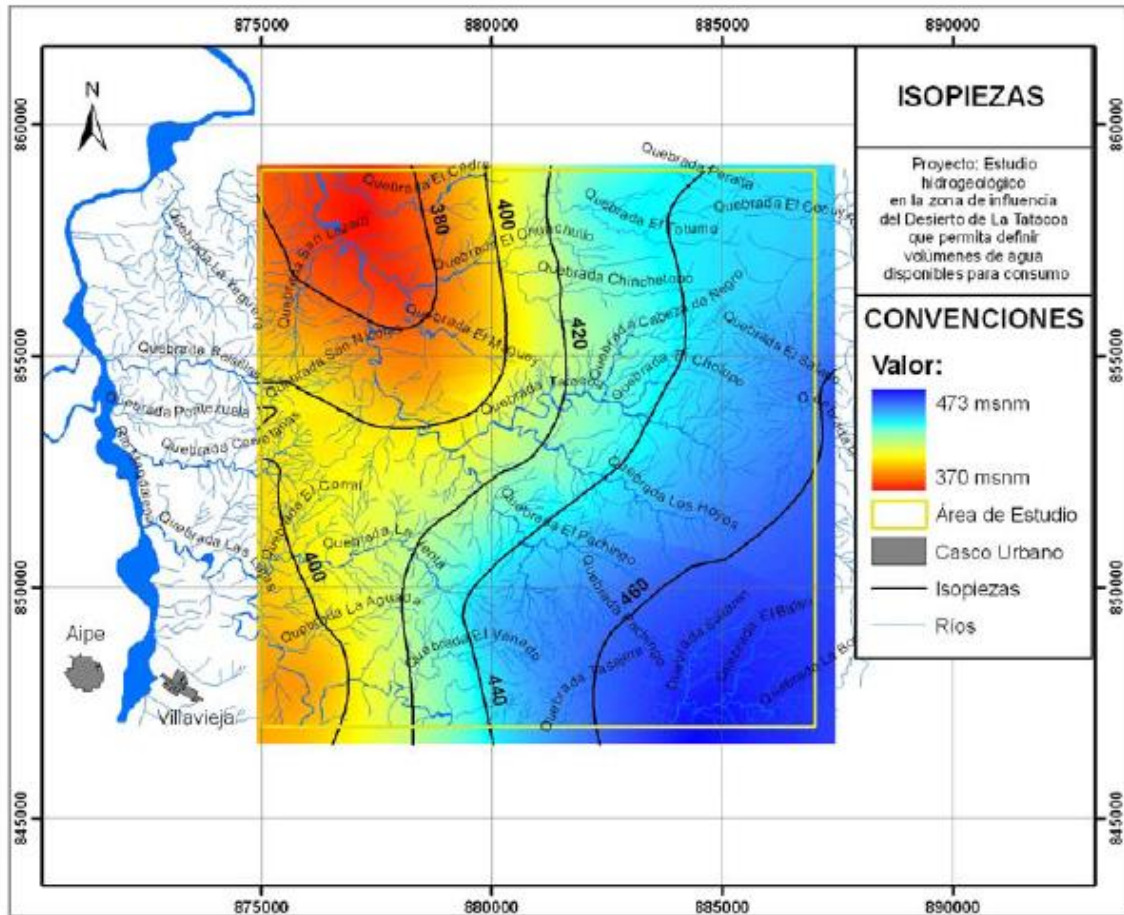


Figura 12. Mapa de isopiezas del área de estudio. Tomado de (Vélez et al., 2006)

4.3.3. Modelo existente de recarga por precipitación

Vélez et al. (2006) realizan un modelo en el que estiman la recarga para las diferentes condiciones climáticas, el periodo de registro fue de 1978 a 2003 y cada serie de tiempo seleccionada comienza en octubre con el fin de evaluar el modelo en condición saturada. Como resultado en el estudio Vélez et al. (2006) obtienen un solo valor de recarga para

toda el área de estudio de 257-258 mm/año (Normal) evaluado en el periodo 2000-2001, 337-338 mm/año en el periodo 1996-1997 (Niño), 408 mm/año en el periodo 1998-1999 (Niña). Esta estimación presenta algunas limitaciones ya que no muestra variación espacial de la recarga y tampoco justifican en el informe por qué obtienen estos resultados, si empleando la metodología de Bradbury se esperaría un modelo de recarga distribuido.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

5.1. Diagnóstico de la información disponible en el área de estudio.

Como resultado se generó una tabla con la recopilación de los trabajos geológicos, ambientales, hidrológicos e hidrogeológicos con información del área de estudio. Estos resultados se almacenaron en el Anexo 2.

5.2. Análisis de la precipitación

El análisis de la calidad de series a partir de los datos faltantes en los años de registro entre el periodo 1990-2017 y el índice de continuidad muestra que en general los datos para todas las estaciones de precipitación cercanas a la zona de interés son buenos debido a que presentan pocos datos faltantes (Figura 133). La estación La Yegüera presenta el mayor porcentaje de datos faltantes 1.12%, seguido de la estación La Victoria 0.35%, Baraya 0.30% y San José con la menor cantidad de datos faltantes 0.06%, siendo esta última la estación a trabajar durante el proyecto, por su cercanía al área de estudio, y la estación con el menor de datos faltantes y mayor índice de continuidad (IC).

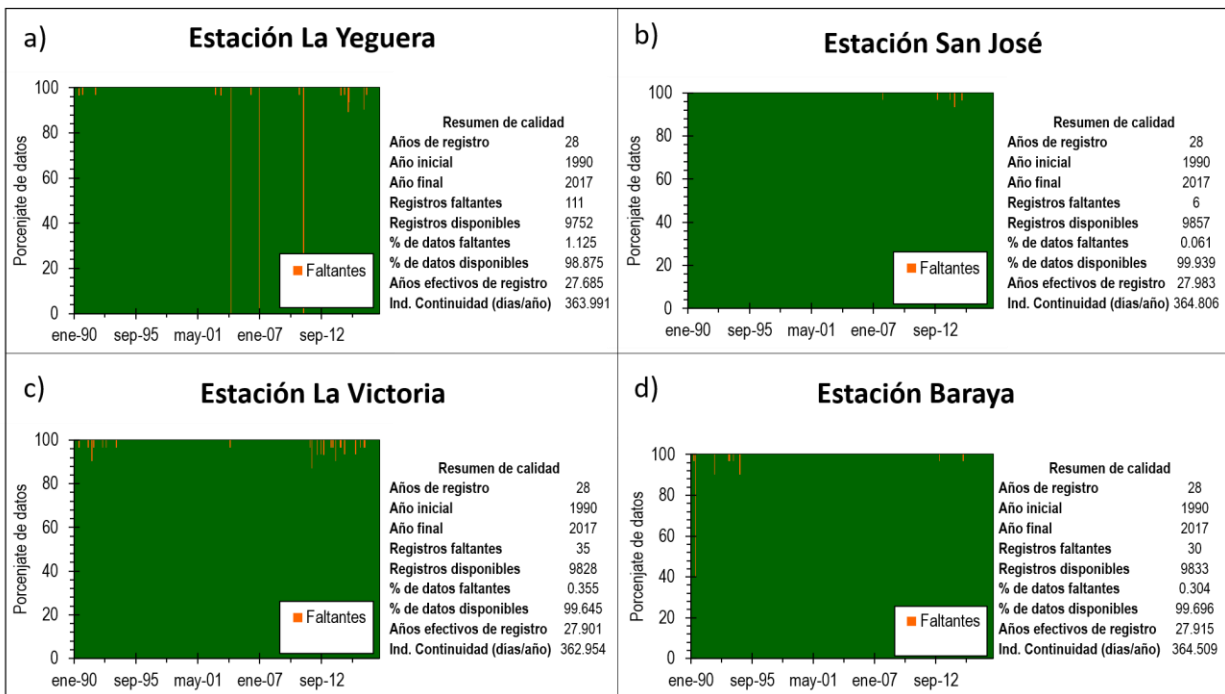


Figura 13. Estadísticos de datos faltantes de las estaciones climatológicas del desierto de La Tatacoa.

Al evaluar los resultados del análisis de series de tiempo (Figura 144) en escala mensual (Figura 144a) y anual (Figura 144b) se observa que en los años de 1997-1998 destaca el pico más alto en color rojo, el cual corresponde al fenómeno del Niño más intenso de las últimas décadas. Así mismo para las condiciones Niña se aprecia que en los años 2010-2011 se presentan los datos de precipitación más altos para la serie de tiempo de la estación San José, y que, además, coinciden con uno de los picos para el periodo Niña más fuerte en los últimos años. Por último, los años 2012-2013 en color verde corresponden a condiciones climatológicas Normales.

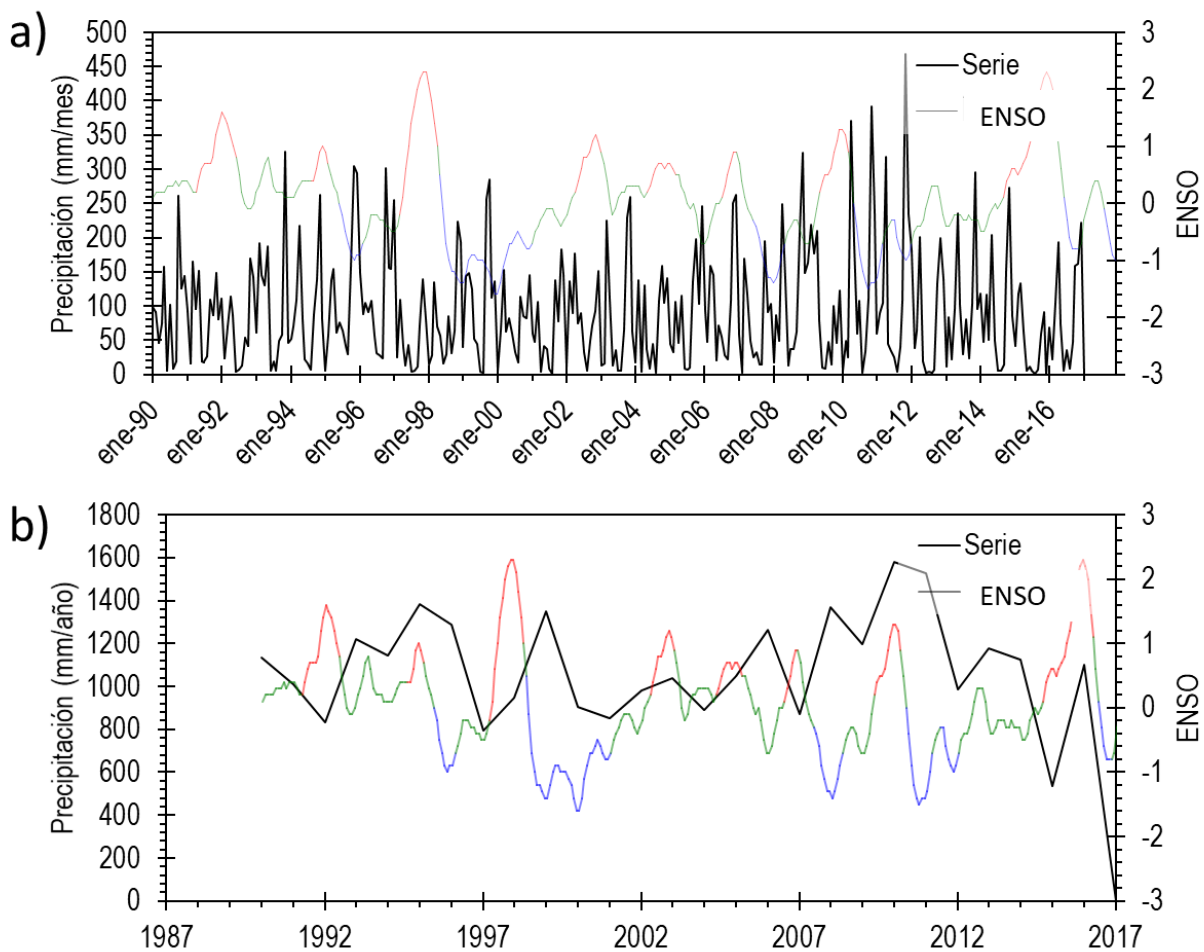


Figura 14. Gráficas de análisis entre la serie de precipitación de la estación San José y el fenómeno climatológico ENOS. La gráfica a) muestra la serie de precipitación a escala mensual en relación con el ENOS. La gráfica b) muestra la serie de precipitación a escala anual en relación con el ENOS.

A partir del pico máximo para condición Niño (1997-1998) se evalúa la serie de precipitación de la estación San José (Figura 15). Se obtiene como resultado que el intervalo entre 1 de abril de 1997 y 31 de marzo de 1998 corresponde a un periodo Niño según los valores del ENOS tomado de la NOAA. Por esto se define ese intervalo para evaluar el modelo SWB en condiciones climáticas Niño.

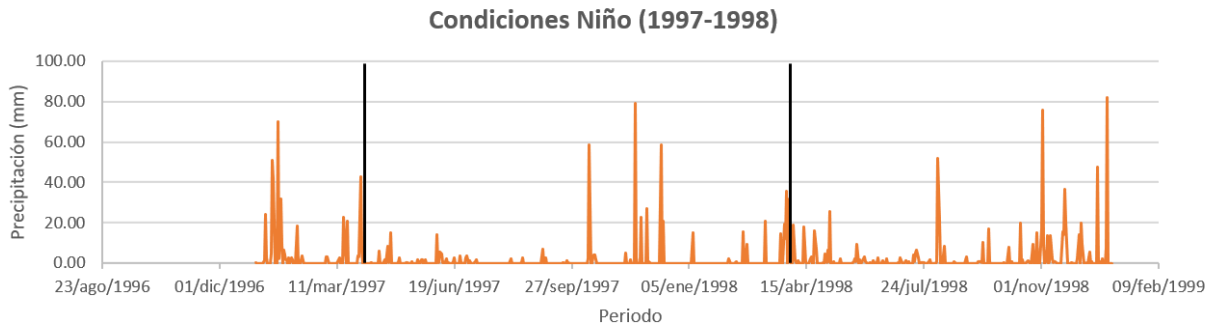


Figura 15. Serie de precipitación en el periodo 1997-1998 para condiciones Niño.

Por medio del pico máximo para condición Niña (2010-2011) se analiza la serie de precipitación de la estación San José (Figura 16). Para esta serie el intervalo entre 1 de abril de 2010 y 31 de marzo de 2011 corresponde a un periodo Niña según los valores del ENOS tomado de la NOAA. Por esto se define ese intervalo para evaluar el modelo SWB en condiciones climáticas Niña.

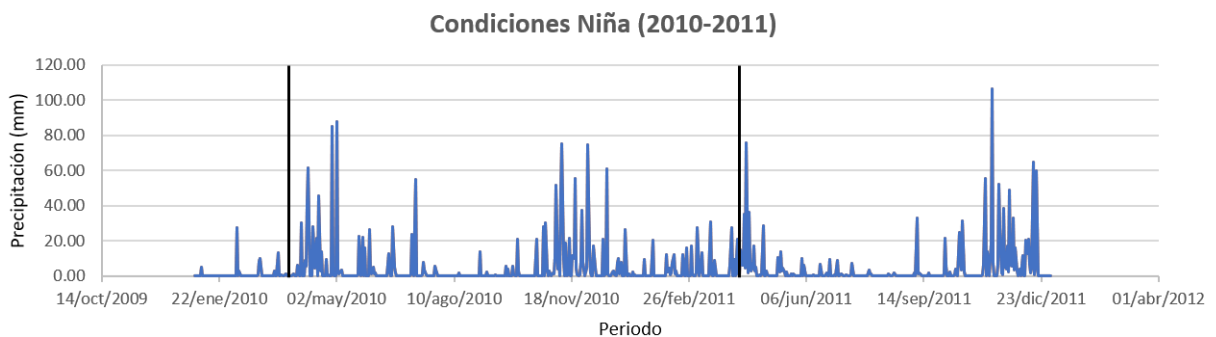


Figura 16. Serie de precipitación en el periodo 2010-2011 para condiciones Niña.

Al analizar la serie de precipitación para las condiciones Normales (2012-2013) de la estación San José. Se obtiene como resultado que el intervalo entre 1 de enero de 2013 y 31 de diciembre de 2013 corresponde a un periodo Normal según los valores del ENOS

tomado de la NOAA, siendo este el factor determinante ya que la Figura 177, no permite definir claramente si el comportamiento que está mostrando representa una condición climática Normal. Por esto se define ese intervalo de enero a diciembre del año 2013 para evaluar el modelo SWB en condiciones climáticas Normales.

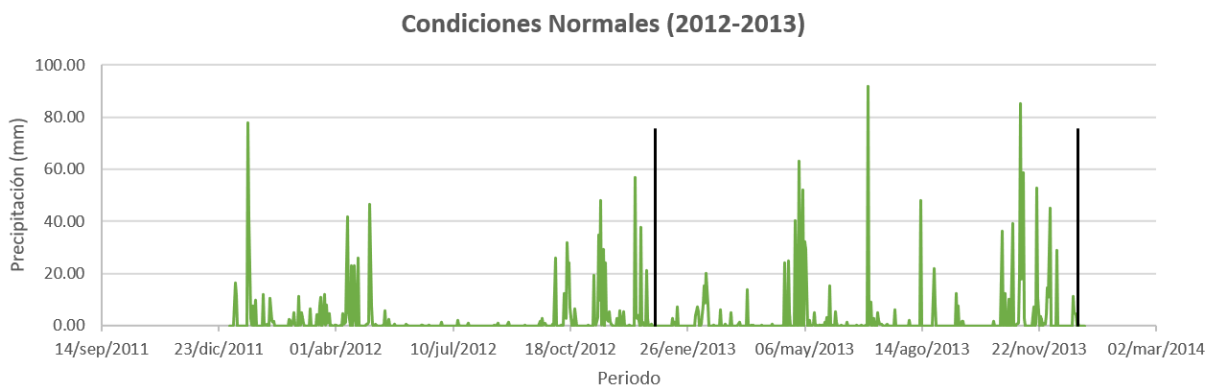


Figura 17. Serie de precipitación en el periodo 2012-2013 para condiciones Normales.

En cuanto al análisis de los histogramas de precipitación (Figura 188) de las macros desarrolladas por Rendón-Álvarez (2020) y al evaluar la frecuencia relativa se puede observar en la Figura 188a, en la estación San José el 90% de las lluvias no superan los 4,2 mm de precipitación. En cuanto al análisis mensual (Figura 188b), se puede observar que las precipitaciones más frecuentes son de 26 (40%), 78 (23%) y 130 (18%) mm/mes. Sin embargo, precipitaciones de 180 mm/mes tienen un porcentaje de frecuencia considerable de casi 10%. Por último, en cuanto a la evaluación de frecuencia relativa anual (Figura 188c), se puede observar que la precipitación mm/año más frecuente varía en los siguientes rangos: 500-890 (33%), 890-1090 (27%) y 1090-1290 (25%) mm/año.

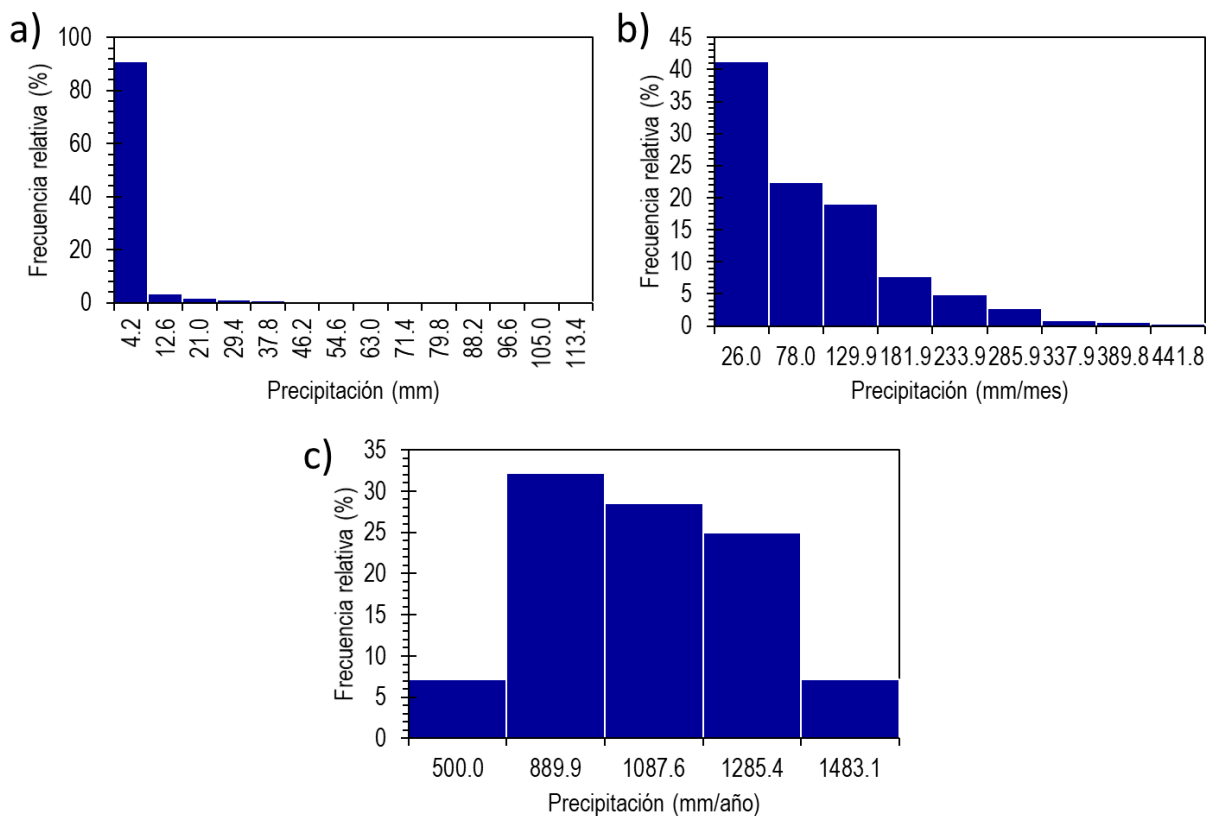


Figura 18. Estadísticos de barras que representan el % de la frecuencia relativa (f_i) de la estación San José a escala diaria, mensual y anual. La gráfica a) muestra la f_i de la precipitación diaria. La gráfica b) presenta la f_i de la lluvia mensual. La gráfica c) muestra los valores de f_i para la precipitación anual.

Sin embargo, aunque en general las precipitaciones son altas, en el registro se encuentran lluvias anuales que tienen valores por debajo de 500 mm/año con una frecuencia del 7%.

Los resultados de las precipitaciones promedio de la estación San José para los años Normal, Niño y Niña (Figura 199) muestran el comportamiento bimodal característico de la precipitación en grandes zonas de Colombia con los picos más altos para las tres condiciones climáticas en el mes de noviembre (Figura 199a). Por otra parte, analizando la Figura 199b se observa que la estación San José responde a los cambios en los regímenes de precipitación en periodos Niño y Niña ya que el promedio de la lluvia en año Niña es mayor que en condiciones Normales, y el promedio en condición Niño es inferior al Normal.

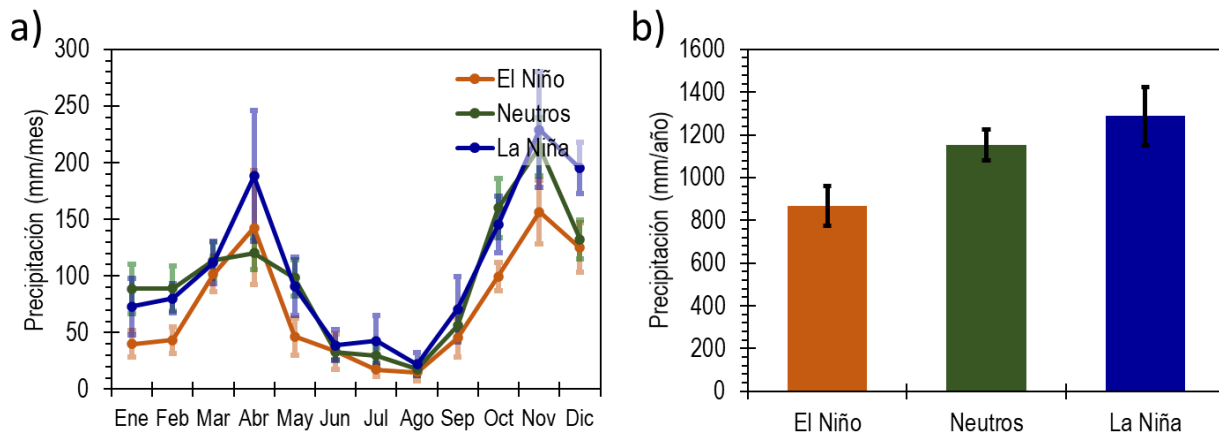


Figura 19. Estadísticos que permiten analizar la respuesta de la estación San José a las condiciones climáticas, Niña, Niño y Normal. La gráfica a) muestra el comportamiento promedio de las condiciones climáticas ENOS 1990-2017 mes a mes durante un año. La gráfica b) muestra la precipitación promedio anual entre 1990-2017 para condiciones ENOS.

5.3. Cartografía temática y archivos ASCII

A continuación, se presentan los análisis de los resultados cartográficos obtenidos durante el desarrollo del proyecto de grado.

5.3.1. Mapa de precipitación

En la Figura 2020 se observan los resultados de la interpolación de la precipitación para la zona de estudio, mediante el método de Kriging con deriva externa el cual arrojó el menor valor de R^2 .

La precipitación en la zona según lo estimado varía entre 800 y 1700 mm/año. Las mayores precipitaciones representadas en colores azules se concentran el parte oriental posiblemente relacionado con las zonas de mayor altura en el área de estudio. Por otra parte, las zonas con menor precipitación representadas en colores rojos se localizan en la esquina noroccidental.

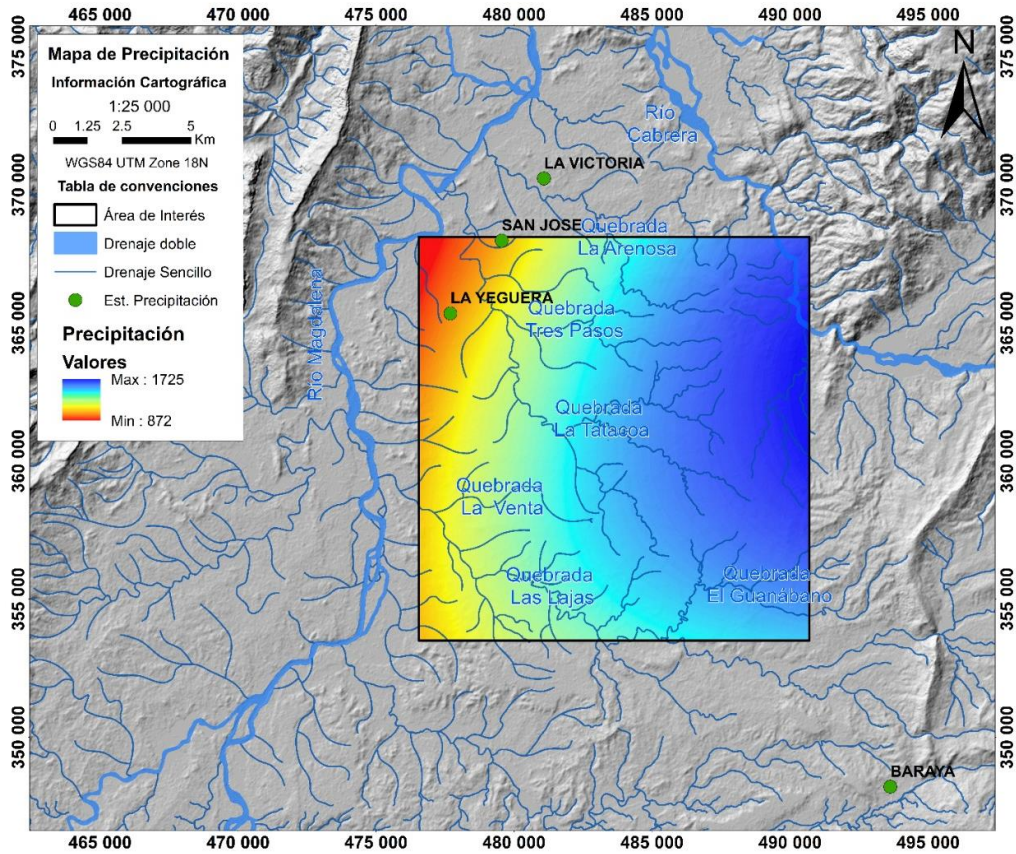


Figura 20. Mapa de precipitación usando como base el Chirps y un procesamiento con interpolación Kriging de deriva externa.

Teniendo en cuenta las estaciones del IDEAM, sus respectivos valores promedios de precipitación (Tabla 11), y los resultados obtenidos por el método de interpolación en cada uno de los puntos con el CHIRPS se encuentra que no existe una relación entre ellos ya que algunos resultados presentan un margen de error de hasta 22%, lo que permite establecer que el modelo de interpolación no se ajusta a las condiciones de la zona y, por el contrario, excede o subestima los valores de precipitación. Esto está relacionado al tamaño de píxel de los datos del CHIRPS (5333m) el cual es muy grande para el área de estudio y a la falta de estaciones del IDEAM para mejorar la calidad de la interpolación. Considerando esto, es favorable para el estudio trabajar con los datos tabulares de la estación San José, que por el momento es el mejor insumo, ya que cuenta con buen registro, buena continuidad en la toma de datos, además de adaptarse y responder a los cambios climáticos del ENOS.

Tabla 11. Información de los resultados de la precipitación tanto de las estaciones IDEAM como la interpolación con CHIRPS.

Código	Nombre de la estación	Categoría	Altura	Precipitación Estaciones IDEAM (mm/año)	Precipitación CHIRPS (mm/año)
21110290	La Victoria	Pluviométrica	400	1218.74	1333.61
21110120	La Yequera	Pluviométrica	400	1049.06	1349.96
21115060	San José	Climática Ordinaria	400	1108	1333.35
21110070	Baraya	Pluviométrica	615	1135.68	1341.21

5.3.2. Mapa de direcciones de flujo superficial

En cuanto a las direcciones de flujo superficial, según lo observado en la Figura 211, la dirección este es dominante con el 24% del área total, esto se debe a que la mayoría de las cuencas están drenando al río Magdalena ubicado en el flanco occidental del área de interés, el cual presenta una relación con el mapa de isopiezas elaborado por Vélez et al., 2006 que muestra una tendencia del flujo del agua subterránea hacia el oeste y noroeste.

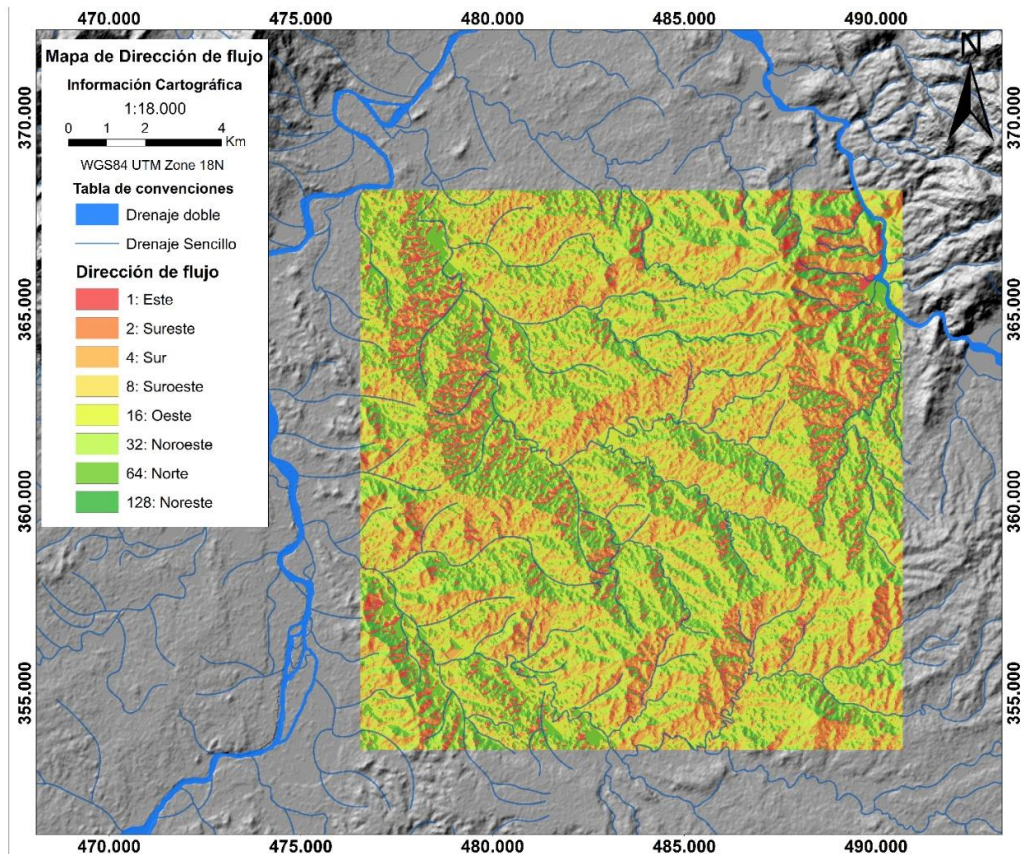


Figura 21. Mapa de direcciones de estudio de la zona de estudio.

5.3.3. Mapa de cobertura vegetal

Se definieron dos zonas principales: la cobertura de pastos y arbustos representados en color beige, que ocupan un 63% del área de estudio, y los suelos desnudos representados en color café que se concentran en la zona central y ocupan un 37% del territorio (Figura 22). Esto es importante porque coberturas como la de pastos y arbustos interfieren en la capacidad de infiltración y evapotranspiración, particularmente en épocas de sequía, donde estas captan casi toda el agua para suplir sus necesidades.

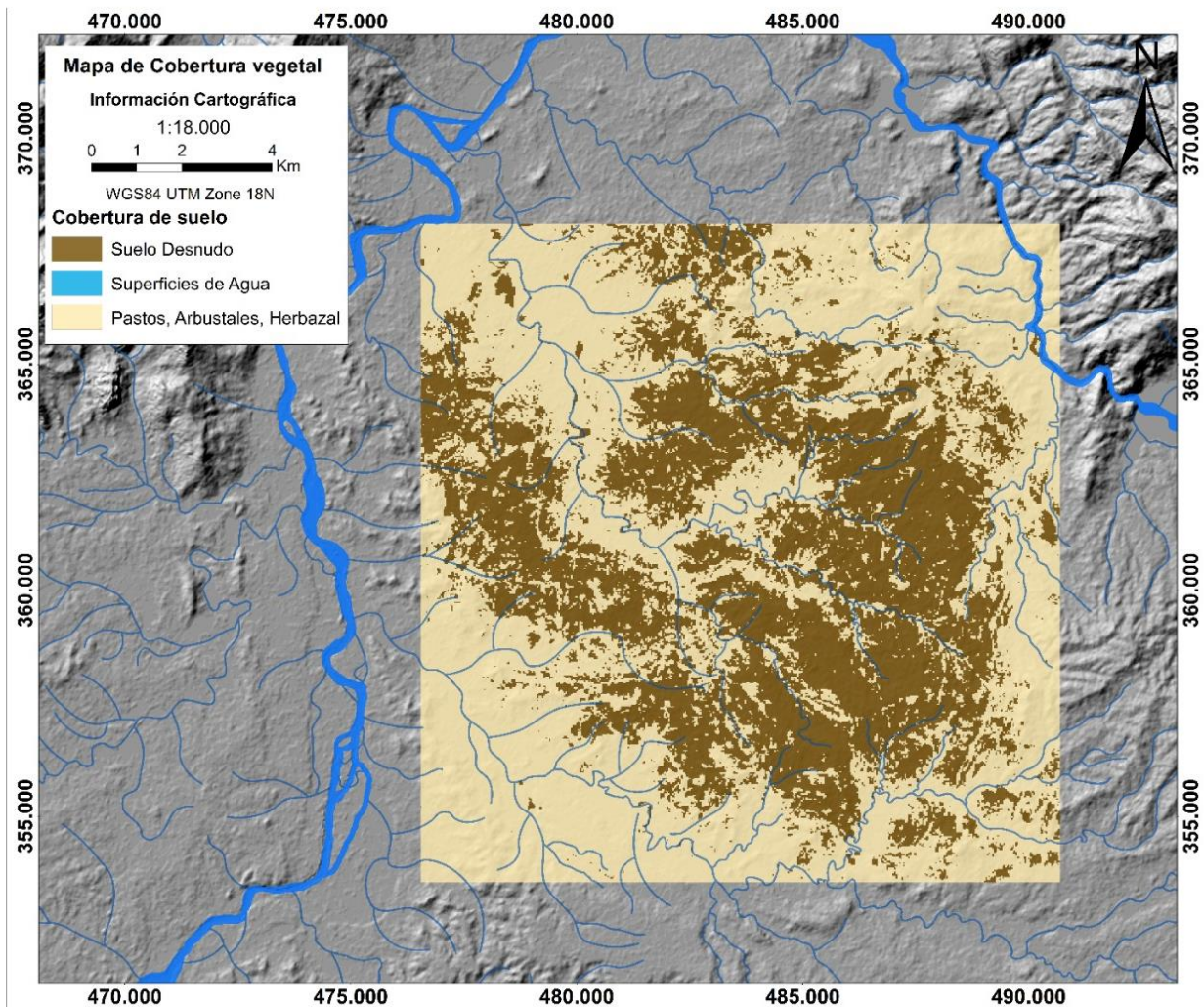


Figura 22. Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio.

5.3.4. Mapa de capacidad de retención del suelo

Los suelos en el desierto son predominantemente franco arenosos representados en la Figura 233 por el color anaranjado (70%) con capacidad de retención de 1.6 (in/ft); seguido por los suelos franco arenosos arcilloso (15%) en color beige y capacidad de retención de 2.7 (in/ft); arenas (9%) en un tono café con la capacidad de retención más baja 1.2 (in/ft); y por último suelos arcilloso arenosos (6%) en color amarillo claro, los cuales presentan la mejor capacidad de retención de agua en el suelo 3.7 (in/ft).

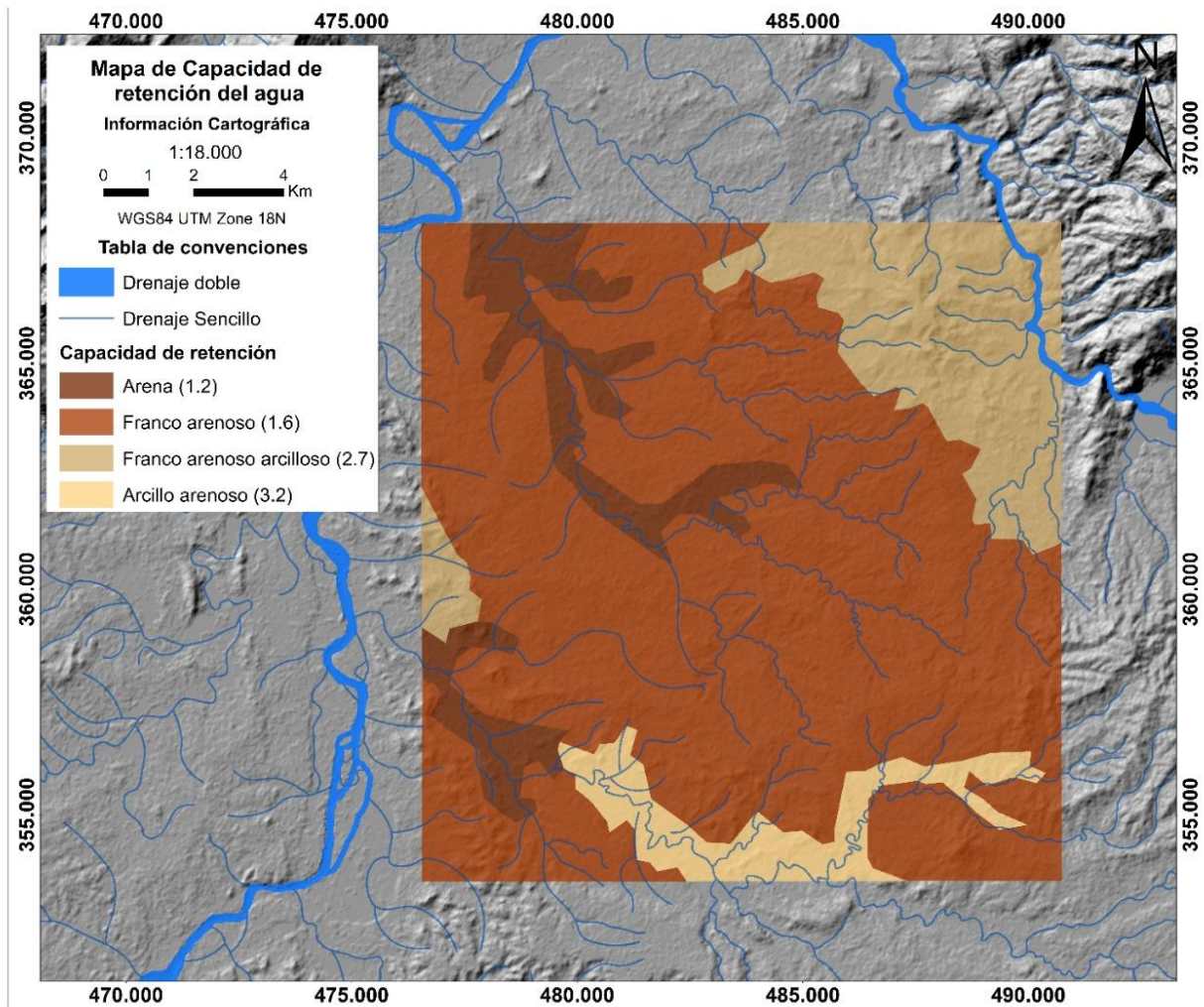


Figura 23. Mapa de capacidad de retención del suelo. Adaptado de (Vélez et al., 2006)

5.3.5. Mapa de grupo hidrológico

Para la clasificación del grupo hidrológico, el A corresponde a zonas con infiltración rápida y domina el área de estudio con 79% del total (Figura 244), seguido por el grupo B que presenta una infiltración moderada con un 14% y por último el grupo C con infiltración lenta en un 7% del territorio. Para la zona no se encontraron suelos con características de infiltración muy lenta correspondientes al grupo D.

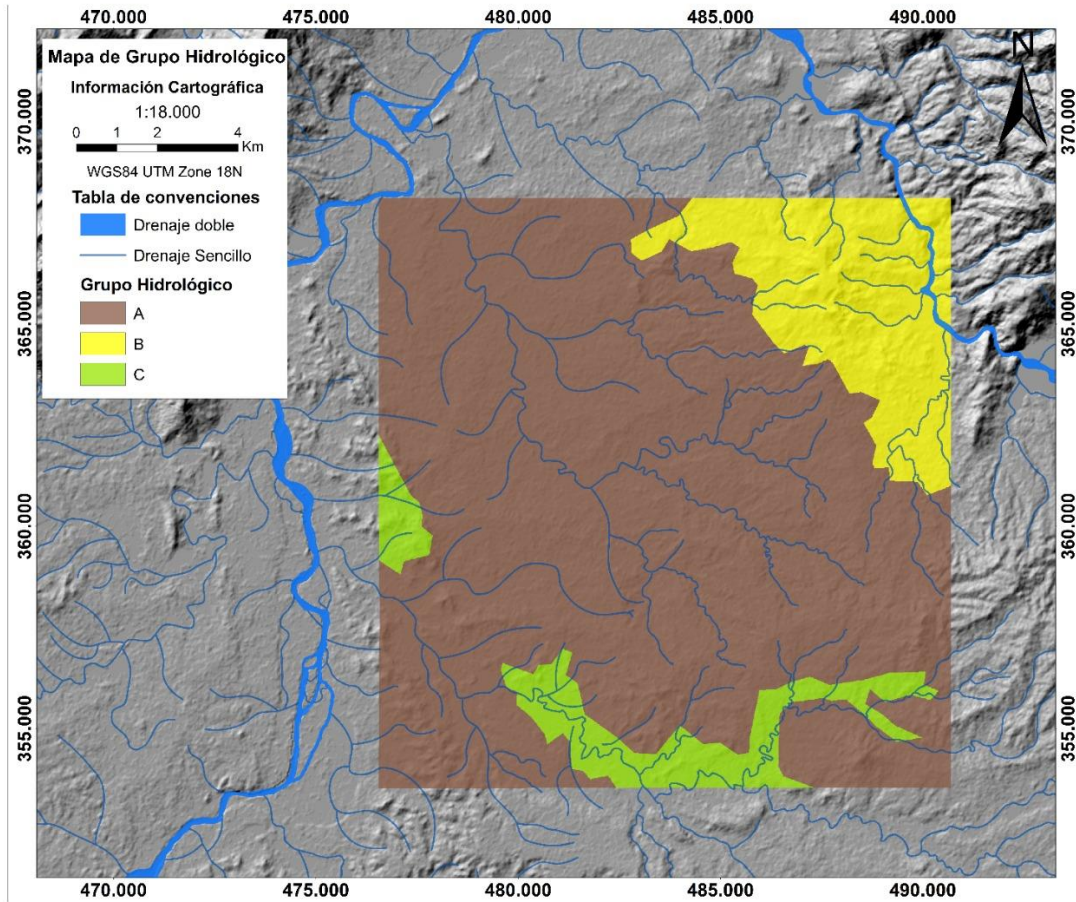


Figura 24. Mapa de grupos hidrológico en el área de estudio.

5.4. Modelo SWB estimación de evapotranspiración real y recarga potencial.

A continuación, se presentan los mapas de evapotranspiración real y recarga potencial generados a partir de la ejecución del modelo SWB.

5.4.1. Condiciones Normales

La evapotranspiración como se observa en la Figura 255 presenta valores más bajos en las zonas de color amarillo 0-100 mm/año, las cuales corresponden al 58% del área total

y de color rojo zonas con valores mayores a 700 mm/año que ocupan un 37%. Según el cálculo del SWB el valor medio de la evapotranspiración real del área es 379 mm/año con un máximo de 1556 mm/año.

Para condiciones climáticas Normales (2013), el mapa de recarga potencial presenta una recarga entre 0-50 mm/año en aproximadamente el 63% del área de estudio (área de color rojo) (Figura 255), las zonas verdes en el centro abarcan un 24% y representan zonas con recarga entre 250 y 350 mm/año, un 10% corresponde a los valores que superan los 400 mm/año. La recarga promedio para el año Normal es de 143 mm/año con un máximo de 1718 mm/año.

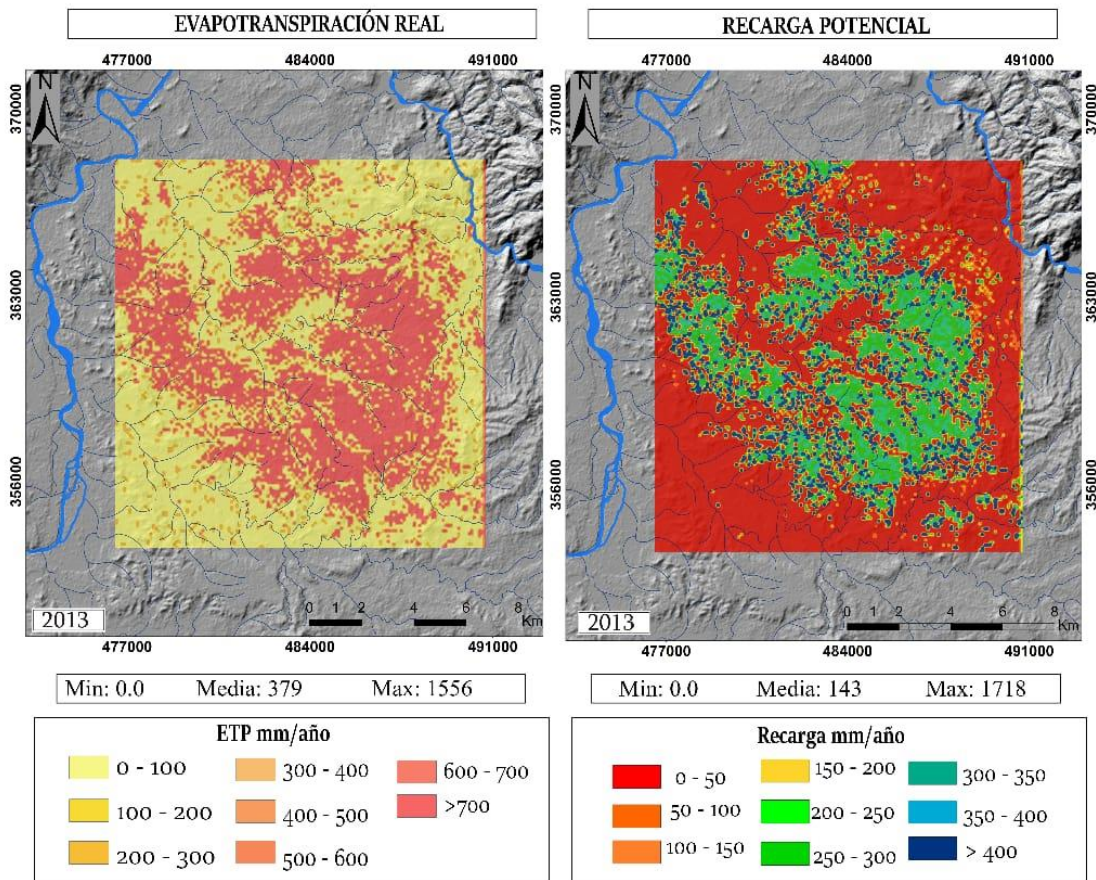


Figura 25. Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Normales

5.4.2. Condiciones Niño

La evapotranspiración para estos años presenta un contraste entre las zonas amarillas con valores de 0-100 mm/año con el 58% del área, que además coincide en gran parte

con las zonas donde la cobertura vegetal eran pastos y arbustos. El otro rango dominante que destaca en la Figura 266, son las zonas de color naranja, que muestran que el 37% de la evapotranspiración se localiza en la zona central y los rangos oscilan entre 400-700 mm/año. El 5% restante se encuentra entre los rangos 100-200 mm/año. Según el cálculo del SWB el valor medio de la evapotranspiración real del área es 183 mm/año con un máximo de 970 mm/año.

El mapa de recarga potencial para condiciones climáticas Niño (Figura 26) en los años 1997-1998, presenta una recarga entre 0-50 mm/año en aproximadamente el 92% del área de estudio (área de color rojo); una concentración de tonalidades naranjas a amarillas desde los 50 a los 200 mm/año con aproximadamente el 4%; y tonalidades verdes dispersas en el área que simbolizan una recarga entre 200 y 250 mm/año con el 4%. Con estos resultados se obtiene que la recarga potencial para el año Niño (1997-1998) en promedio es de 23 mm/año con un máximo de 440 mm/año.

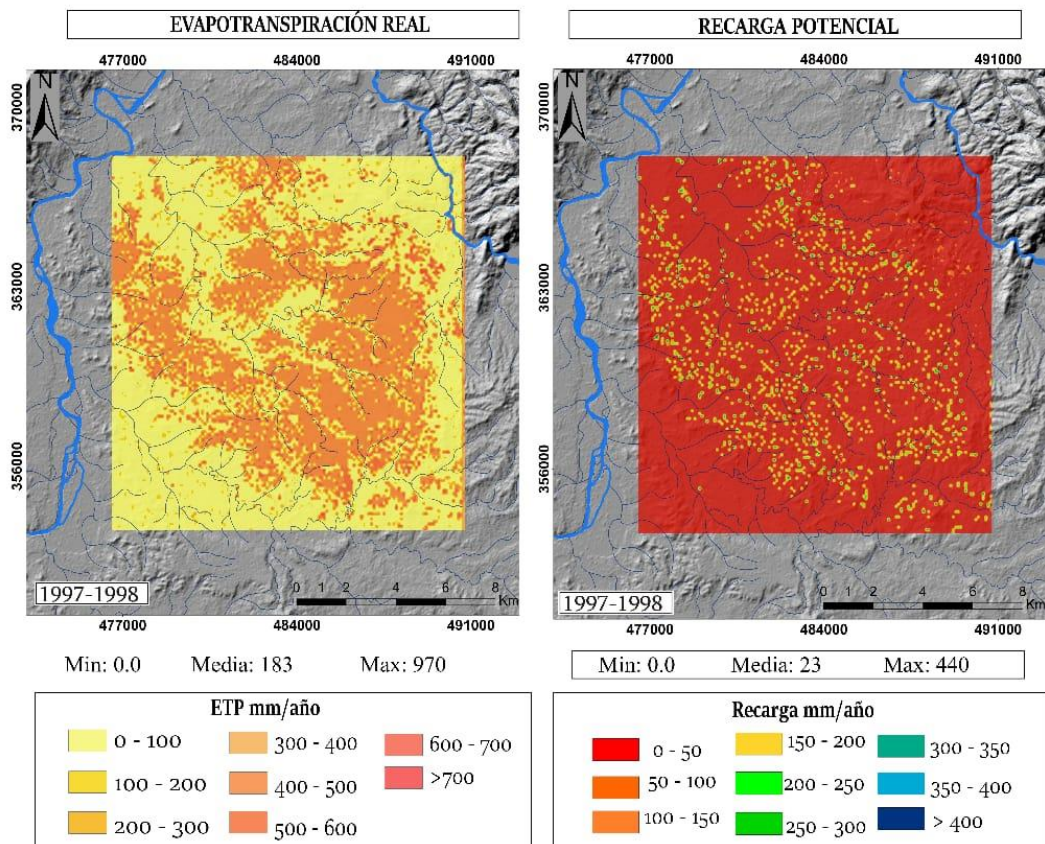


Figura 26. Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Niño.

5.4.3. Condiciones Niña

La evapotranspiración para estos años presenta valores de 0-100 mm/año con el 58% del área (zonas amarillas), que además coincide en gran parte con las zonas donde la cobertura vegetal eran pastos y arbustos. Otro rango dominante que destaca en la Figura 277, son las zonas de color rosado, que muestran que el 37% de la evapotranspiración se localiza en la zona central y los rangos oscilan entre 700 y 1172 mm/año. Un 5% se encuentra entre 300 y 400 mm/año. Según el cálculo del SWB el valor medio de la evapotranspiración real del área es 338 mm/año con un máximo de 1172 mm/año.

Para condiciones climáticas Niña, el mapa de recarga potencial evaluado en los años 2010-2011 presenta una recarga entre 0-50 mm/año de aproximadamente el 63% del área de estudio (área de color rojo) (Figura 277), las zonas azules en el centro abarcan un 35% y representan zonas con recarga mayor a 400 mm/año. El otro 2% se encuentra entre 50 a 400 mm/año. El cálculo arroja que para el año Niña el valor de recarga potencial promedio es de 266 mm/año con un máximo de 2429 mm/año.

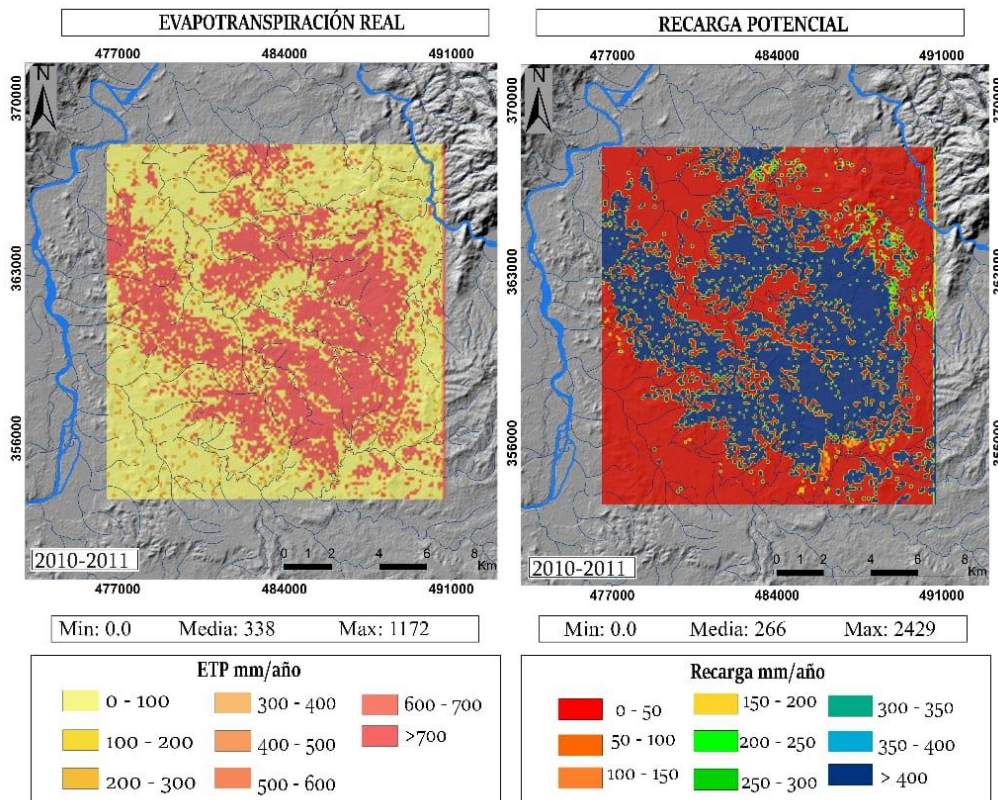


Figura 27. Mapa de recarga potencial y evapotranspiración real para condiciones Niña.

A continuación, se presenta una tabla resumen donde se compara la precipitación con la información obtenida a partir del modelo SWB (Tabla 12).

Tabla 12. Resumen de los resultados arrojados por el modelo SWB.

Estación San José					
Condición Climática	Periodo años	Precipitación mm/año	Evapotranspiración mm/año	Recarga mm/año	% de precipitación recargada
Normal	2013	1175.2	379	143	12.2
Niño	1997-1998	584.8	183	23	3.9
Niña	2010-2011	1757	338	266	15.1

De la tabla anterior podemos observar que existe una diferencia en los valores de recarga para las diferentes condiciones climáticas. Si analizamos los resultados con el año en condición Normal como referencia, se observa que la recarga aumenta un 86% en condiciones Niña, y disminuye un 84% en condiciones Niño.

6. Discusión

En este estudio aplicamos el modelo de estimación de recarga potencial SWB para calcular los valores de recarga y evapotranspiración permite validar parcialmente la hipótesis de trabajo en la cual se buscaba probar que la principal fuente de recarga en el desierto de la Tatacoa no se da por precipitación ya que nuestro primer hallazgo es que la recarga directa potencial presenta porcentajes para condición Normal 12%, Niño 4% y Niña de 15% con respecto a la precipitación. Estos resultados confirman lo encontrado por Álvarez et al. (2013) quien propone que, en regiones áridas, el porcentaje de recarga versus precipitación es muy bajo, con aproximadamente el 10%. Sin embargo, estos resultados no garantizan que la recarga principal no se esté dando por precipitación.

Los datos obtenidos para la recarga por Vélez et al. (2006) arrojan obtienen valores de recarga de 257-258 mm/año (Normal), 337-338 mm/año (Niño), 408 mm/año (Niña) para la zona y se encontraron diferencias significativas en nuestros modelos de recarga, tanto espacial como temporalmente.

En cuanto a la distribución espacial, Vélez et al. (2006) obtienen un único valor de recarga para toda el área, mientras que, en nuestro modelo, los resultados en la espacialidad de la recarga se ven influenciados principalmente por la cobertura vegetal y la textura del suelo obteniendo mayores valores de recarga en zonas con suelos desnudos y textura franco-arenosa. La distribución espacial en los modelos obtenidos por Vélez et al. (2006) posiblemente arroja un único valor debido al código de ejecución del modelo usado, el cual fundamenta sus bases en el balance hídrico del suelo, pero no profundiza en la interfaz de programación que maneja el código, por lo que no se sabe con exactitud por qué no se obtienen resultados distribuidos.

En los resultados temporales, Vélez et al. (2006) obtienen valores más bajos de recarga en años Normales que en años en condición Niño, lo que no tiene sentido ya que se esperarían datos de recarga más altos para años Normales, como sucede en nuestro modelo el cual responde a los fenómenos climáticos del ENOS siendo Niña el de mayor porcentaje de recarga, y el Niño con el menor resultado.

Según lo justificado por Vélez et al. (2006) sus resultados difieren con el ENOS debido a que "...los años modelados corresponden a eventos anuales y a que la definición de eventos extremos como lo es el ENOS es definido teniendo en cuenta las anomalías medidas a partir de condiciones promedias en la hidrología interanual...". Sin embargo, no estamos de acuerdo con esta justificación ya que los datos de la NOAA se toman trimestralmente. Estas inconsistencias en los datos pueden asociarse a que hubo un error en la selección de los periodos por parte de Vélez et al., (2006) en el cual para el año hidrológico en condición Niño (octubre de 1996 a 1997), tomaron meses en los que según la NOAA eran condiciones normales lo que genera valores de precipitación más altos que no están asociados a condiciones climáticas Niño.

En el presente estudio se encontró que las zonas de pastizales del desierto de La Tatacoa no presentan variaciones significativas en la recarga ya que para las tres condiciones climáticas se obtienen valores entre 0 y 100 mm/año. Esto puede asociarse principalmente a la cobertura de tipo pastizal que debido al déficit de agua en el desierto capta gran parte de la precipitación para suplir sus necesidades biológicas inhibiendo la disponibilidad de agua para la recarga de la zona.

Vries y Simmers (2002) afirman que incluso en las áreas más secas la recarga ocurrirá, y a medida que aumenta la sequía, la recarga indirecta adquiere más importancia que la directa, lo que abre la posibilidad a una fuente de recarga indirecta. Por esto, se plantean dos posibles escenarios: el primero es que existe una recarga indirecta procedente de los ríos y quebradas permanentes de la zona de estudio como son el río Magdalena y el río Cabrera, y el segundo es que el agua disponible en el acuífero corresponde a reservorios antiguos que no se están recargando.

Para evaluar el primer escenario se realizó un análisis de los perfiles geológicos e hidrogeológicos propuestos por Vélez et al. (2006). Sin embargo, debido a la complejidad tectónica y estructural, extrapolar estos perfiles no garantiza una aproximación real de la geología de la zona. Ejemplo de esto son los perfiles B-B' (Figura 288) y F-F' (Figura 299) que no pueden correlacionarse a pesar de tener la misma orientación puesto que muestran estructuras diferentes, lo que no permite establecer una continuidad en la geología e hidrogeológica de la zona.

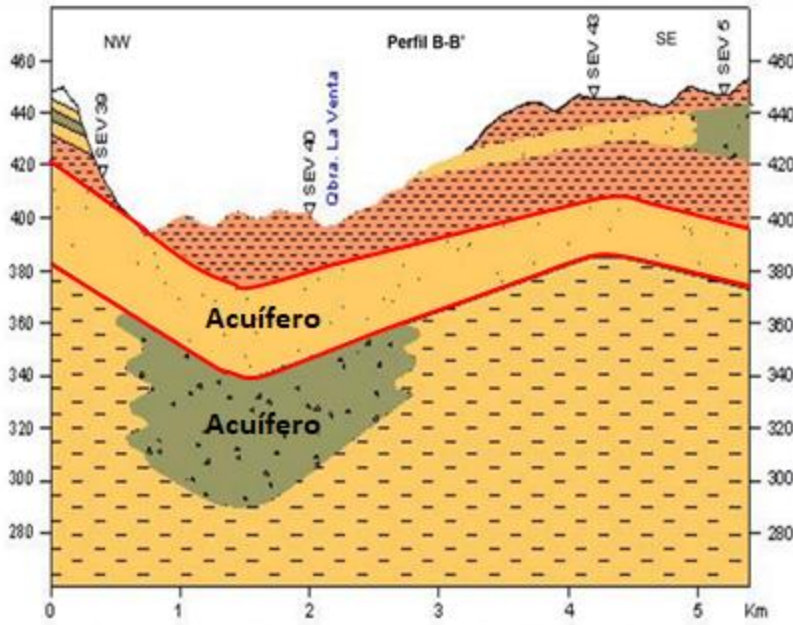


Figura 28. Perfil hidrogeológico B-B' en dirección NW-SE de la Unidad Hidrogeológica 1. (Tomado de Vélez et al., 2006)

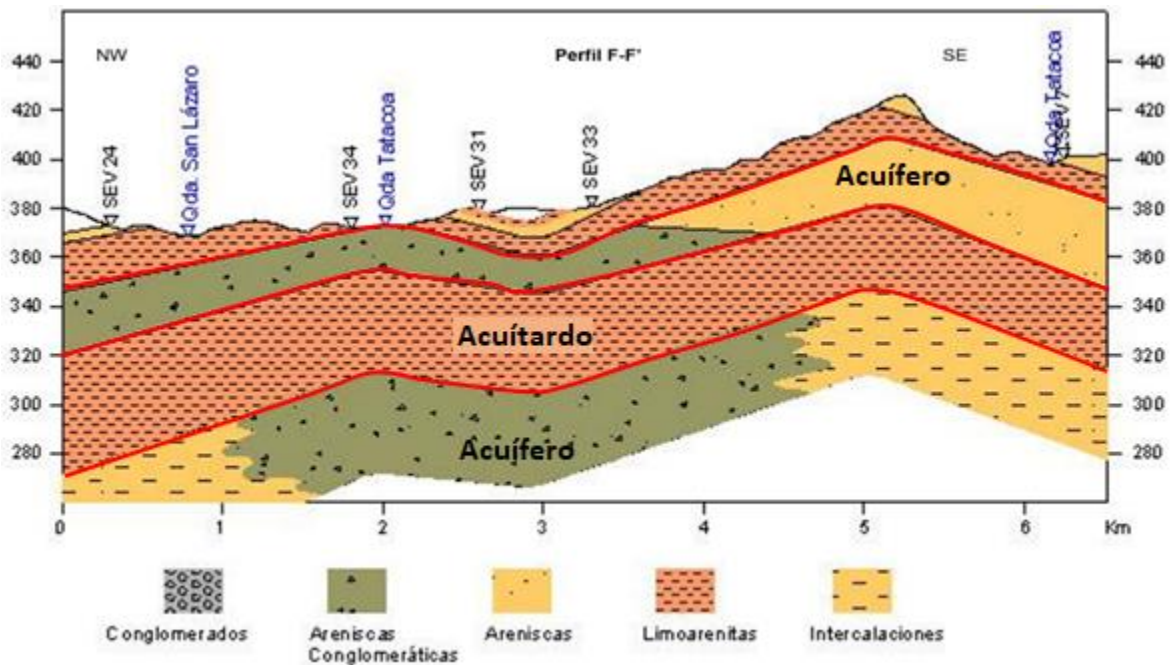


Figura 29. Perfil hidrogeológico F-F' en dirección NW-SE de la Unidad Hidrogeológica 1. (Tomado de Vélez et al., 2006)

Se sugiere realizar más estudios geológicos y geofísicos con el fin de entender la disposición de las capas en zonas cercanas a los ríos, y establecer si existe una conexión entre estos y los acuíferos semiconfinados. Además, se propone realizar estudios

isotópicos estables hidrogeno y oxígeno para determinar con mayor precisión la principal fuente de recarga de este acuífero.

Para el segundo escenario se propone realizar estudios hidroquímicos y de isotopía ambiental en pozos, que permitan caracterizar las propiedades físicas como temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales; la composición iónica y el equilibrio de carbonatos, con el fin de definir la antigüedad del agua subterránea de los acuíferos.

7. Conclusiones

La recarga directa potencial es de aproximadamente el 12% de la precipitación resultado que permite suponer otra fuente de recarga indirecta proveniente de las corrientes cercanas al Desierto o que el acuífero no se está recargando y las aguas de este con muy antiguas. Esto es de suma importancia para conocer mejor la hidrogeología de la zona ya que en época de estiaje el 90% de las corrientes superficiales tipo quebrada se secan, y es el agua subterránea la que provee una fuente alternativa de abastecimiento.

El análisis de precipitación en la estación San José, reveló que el comportamiento de la lluvia en la zona es bimodal, con los picos de precipitación en abril y noviembre. Además, se concluye que la interpolación de precipitación de la zona, usando como base los datos del CHIRPS no representan las condiciones del área, la cual está limitada por la poca información de estaciones. Se sugiere ampliar la zona de estudio con el fin de captar más estaciones climatológicas y así reducir la incertidumbre en su interpolación.

Se sugiere para futuras investigaciones realizar una caracterización de la textura del suelo ya que la geología no permite definir que permita ampliar el área de estudio y así, definir límites hidrogeológicos como el río Magdalena al oeste, el río Cabrera al noreste, y la quebrada Las Lajas al sur, ya que una de las limitaciones de nuestro estudio fue la capa de textura del suelo, puesto que la información solo contaba con polígonos sin la descripción de los datos requeridos.

La información del desierto de La Tatacoa no es suficiente para generar un buen modelo hidrogeológico conceptual puesto que la información geológica se encuentra desactualizada y son muy pocos los documentos que contienen información específica del desierto; solo se encuentra un estudio hidrogeológico local elaborado por Vélez et al. (2006) el cual recomienda revisar y fortalecer el modelo hidrogeológico con base en nueva información disponible. Se sugieren realizar perfiles geológicos y geofísicos cercanos a corrientes de agua permanente y obtener información de perforaciones que permitan una buena correlación entre estos. Además, estudios hidroquímicos e isotópicos para determinar con exactitud la fuente de recarga principal del desierto.

8. Referencias

- Alcaldía de Villavieja (2016). Plan Básico de Análisis de Amenaza Vulnerabilidad y Riesgo. 106 p.
- Álvarez, M., Trovatto, M., Hernández, M., González, N. (2013). Estimación de recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del sur de Península Valdés (provincia de Chubut). Agua subterránea recurso estratégico. 46–51 p.
- Balek, J. (1988). Groundwater recharge concepts. In: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston.
- Bastidas, B. (2019). Modelo conceptual de la recarga de aguas subterráneas en el nivel somero del sistema hidrogeológico Golfo de Urabá, evaluando su magnitud y variabilidad espacio – temporal (Magister en Ingeniería Ambiental.). Universidad de Antioquia.
- Blaney, H.F., and Criddle, W.D. (1966). Determining consumptive use for water developments, in Methods for Estimating Evapotranspiration—Irrigation and Drainage Specialty Conference, November 2–4, Las Vegas, Nev., Proceedings: New York, American Society of Civil Engineers, p. 1–34.
- Bradbury, R., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M., Potter, K. (2000). Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates. Final project report of Wisconsin Geological and Natural History Survey. University of Wisconsin, 84 pp.
- CAM (2015). Plan de Manejo Ambiental del Distrito Regional de Manejo Integrado -DRMI- La Tatacoa. 117 p.
- CAM (2016). Diagnóstico Ambiental, Plan de Acción 2016-2019, 46 p.
- Centro de predicción del clima espacial de NOAA / NWS . Swpc.noaa.gov. Consultado el 18 de septiembre de 2020 en <https://www.swpc.noaa.gov/>.
- Chc.ucsb.edu. n.d. CHIRPS: Rainfall Estimates From Rain Gauge And Satellite Observations | Climate Hazards Center - UC Santa Barbara. [online] Available at: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>

- Dripps, W.R., Bradbury, K.R. (2007). Un sencillo modelo diario de balance suelo-agua para estimar la distribución espacial y temporal de la recarga de agua subterránea en áreas templadas húmedas. *Revista de hidrogeología*. 433–444 p.
- Fuquen, J.; Osorno, J. (2002). Memoria explicativa Mapa geológico del Departamento del Huila, Tolima y Meta de la plancha 303. Ingeominas. Bogotá.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature: *Applied Engineering in Agriculture*, v. 1, no. 2, p. 96–99.
- Hendrickx, J.M., Walker, G.R. (1997). Recharge from precipitation. En: *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*. Róterdam: A.A. Balkema.
- IDEAM (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Informe técnico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Informe técnico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Informe técnico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Jensen, M.E., and Haise, R.H. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation: *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, v. 89, p. 15–41.
- Kendall, C., Caldwell, E.A. (1998). *Fundamentals of Isotope Geochemistry*. United States Geological Services (USGS).
- Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge*. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH.
- Mishra, S.K., and Singh, V.P.(2003). *Soil Conservation Service curve number (SCS-CN) methodology*: Dordrecht, Netherlands, and Boston, Mass., Kluwer Academic Publishers, Water Science Technology Library, 536 p.
- Núñez, E., & Toro, O. (2017). Desarrollo de un modelo espacial a partir de herramientas de procesamiento digital de imágenes para cuantificar la tendencia de la

- desertificación del desierto de la Tatacoa, en el departamento del Huila. (Maestría en teledetección). Universidad Católica de Manizales.
- O'Callaghan, J.F., and Mark, D.M., (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data: Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 323–344 p.
- Olivo, A. (2017). Clasificación de la vegetación del karst de Sierra de las Nieves utilizando imágenes Landsat (Máster en Ingeniería Geológica). Universidad politécnica de Madrid.
- Rendón-Alvárez, J.P. (2020). Comunicación personal.
- Rodríguez, G., Fuquen, J. (1989). Memoria explicativa levantamiento geológico de la Plancha 302 Aipe. Ingeominas. Bogotá.
- Rushton, K. (1988). Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series.
- Samper, F.J. (1997). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del seminario celebrado en las palmas de gran canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Santos, R., Koide, S., Santos, R. M. dos, & Koide, S. (2016). Avaliação da Recarga de Águas Subterrâneas em Ambiente de Cerrado com Base em Modelagem Numérica do Fluxo em Meio Poroso Saturado / Groundwater Recharge Evaluation in Brazilian Cerrado Biome Site by Saturated Zone Flow Numerical Modeling. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 451–465 p.
- Scanlon, B.R., Healy, P.G., Cook. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. En: Hydrogeology Journal. 18-39 p.
- Taylor, R., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T., Chen, J., Taniguchi, Bierkens, M., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R., Yechieli, Y., Gurdak, J., Allen, D.,

- Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P., Holman, I., Treidel, H. (2012). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change* 322–329 p.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance: Centerton, N.J., Laboratory of Climatology, *Publications in Climatology*, v. 10, no. 3, 185–311 p.
- Tucker, C.J. (1979). Combinaciones lineales de rojo e infrarrojo fotográfico para monitorear la vegetación. *Ambiente Sens. Remoto* 8, 127 – 150 p.
- Turc, L. (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour (In French; original unseen): *Annales Agronomiques*, v. 12 no. 1, p. 13–49.
- USGS: EarthExplorer. USGS: Science for a changing world. (2018). <https://earthexplorer.usgs.gov/> (último acceso: 28 agosto de 2020).
- Vélez, M., Caballero, H., Patiño, J., Suárez, D. (2006). Estudio hidrogeológico en la zona de influencia del desierto de la taca que permita definir volúmenes de agua disponibles para consumo. Instituto del agua. Informe técnico de la Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez, M., Vásquez L. (2019). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Trabajo de pregrado de la Universidad Nacional de Colombia.
- De Vries, J.J., Simmers, I. (2002) Groundwater Recharge: An Overview of Processes and Challenges. *Hydrogeology Journal*, 10, 5-17.
- Westenbroek, S.M., Kelson, V.A., Goto, W.R., Hunt, R.J., Bradbury, (2010) KRSWB: A modified Thornthwaite-Mather Soil Water- Balance Code for Estimating Groundwater Recharge; U.S. Geological Survey Techniques and Methods G-A31; U.S Reston, VA, EE. UU.
- Xie, Y., Cook, P. G., Simmons, C. T., Partington, D., Crosbie, R., & Batelaan, O. (2017). Uncertainty of groundwater recharge estimated from a water and energy balance model. *Journal of Hydrology*.