

ANÁLISIS HIDROESTRUCTURAL Y ESTIMACIÓN DE RECARGA POTENCIAL
POR PRECIPITACIÓN DE LA DUNITA DE MEDELLÍN, SISTEMA ACUÍFERO
DEL VALLE DE ABURRÁ

Hydrostructural analysis and estimation of potential recharge by precipitation of the
Medellín Dunite, Aburra Valley Aquifer System

SANDRA MARÍA PATIÑO ROJAS

Proyecto de grado

Asesor, docente

MARCELA JARAMILLO URIBE

Geologist, MSc and PhD in Hydraulic Resources

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MEDELLÍN

2021

CONTENIDO

CONTENIDO	2
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	10
Abstract.....	10
Introduction	10
Study Area	12
Geology	12
Tectonic setting	13
Karstic geomorphology.....	14
Methodology	14
Information gathering	14
Field data collection.....	15
Histograms of strike trends.....	15
Drainages direction analysis	15
Lineament Analysis.....	15
Structural analysis of dolines	16
Hydrostructural polar diagrams construction	16
Results	17
Primary and secondary information.....	17
Histograms of strike trends.....	18
Hydrostructural polar diagrams	19
Structural zones.....	20

Discussion	24
Conclusions	27
Acknowledgments.....	28
Funding Information and Conflicts of Interest	28
CAPITULO 2.....	29
Resumen	29
Introducción	30
Zona de estudio	31
Localización.....	31
Clima e hidrografía.....	32
Geología.....	32
Hidrogeología	33
Marco conceptual – Métodos para estimación de la recarga.....	34
Dominio de modelación.....	35
Balance de humedad en el suelo SWB	35
Método de Schosinsky	37
Materiales y métodos.....	38
Datos hidrometeorológicos.....	39
Datos geomorfológicos.....	41
Modelo de elevación digital (DEM) y red de drenaje	41
Direcciones de flujo	42
Información de suelos, coberturas terrestres y geología.....	43
SWB	48
Schosinsky	49

Resultados.....	51
Distribución espacial de las variables climáticas.....	51
Precipitación.....	51
Temperatura.....	52
Evapotranspiración.....	53
SWB.....	53
Schosinsky (2006).....	54
Discusión.....	56
Conclusiones.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS.....	62
ANEXO. Base de datos estructurales del capítulo 1	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Locación del área de estudio. (a) Se observa Colombia y la ubicación del Valle de Aburrá en el país (National Geographic MapMaker Interactive) (b) Subregión del Valle de Aburrá con la división política de los municipios que la conforman, la unidad litológica Dunita de Medellín y en polígono achurado negro, zona de estudio (c) Área de estudio donde se resalta el cuerpo sur de la Dunita de Medellín tanto como unidad litológica como cuerpo sur de la unidad hidrogeológica A3-Dunita de Medellín.	32
Figura 2. Mapa hidrogeológico del Valle de Aburra. Modificado de UdeA & AMVA, 2016.....	34
Figura 3. Fronteras del dominio de modelación.	35
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología seguida en la determinación de recarga potencial por precipitación en la zona de estudio.	39
Figura 5. Distribución espacial de las estaciones de precipitación y temperatura disponibles. En color cian estaciones operadas por EPM, en color naranja estaciones operadas por IDEAM. Triángulos para estaciones de precipitación y circulo para estación de temperatura.....	41
Figura 6. DEM 12.5 x12.5 empleado en el estudio y red de drenajes del proyecto Sistema de Información Geográfica de Medellín y sus Alrededores -SIGMA-.....	42
Figura 7. Direcciones de flujo del área de estudio.	43
Figura 8. Unidades cartográficas de suelo abstraídas de los POMCAS de los ríos Aburrá y Negro. Nomenclatura según Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC-. Fuente: Modificado de Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, et al., 2018 y CPA Ingeniería et al., 2018.	44
Figura 9. Coberturas vegetales de la zona de estudio. Adaptado de CPA Ingeniería et al.,2018) y (Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño et al., 2018). Nomenclatura según IDEAM (2010) para nivel 3.	45
Figura 10. Texturas del suelo en la zona de estudio. Elaboración propia.	47

Figura 11. Grupo hidrológico del suelo en la zona de estudio de acuerdo con lo planteado por la NRCS. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 12. Ciclo promedio multianual y anomalías de precipitación para las estaciones en la zona de estudio.....	52
Figura 13. Distribución de la precipitación multianual en la zona de estudio obtenida con kriging ordinario.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Distribución espacial de la temperatura en la zona según método de Chaves y Jaramillo (1998)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Distribución de la EVR de la zona de estudio según metodología de Cenicafé-Budyko (A) y Turc (B) para año normal. ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Recarga potencial por precipitación en mm/año, metodología SWB. ..	54
Figura 17. Recarga potencial por precipitación en mm/año, metodología Schosinsky (2006)	56

LISTA DE TABLAS

Table 1. Basic statistics of the data on the joints sets.	20
Table 2. Basic statistics of the data on the structural zones.	22
Tabla 1. Estaciones hidrometeorológicas con información empleada en la determinación de la recarga	40
Tabla 2. Descripción de las coberturas del área en estudio definidas según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.	45
Tabla 3. Configuración general del modelo SWB.....	48
Tabla 4. Configuración general del modelo Schosinsky	50
Tabla 5. Metodología detallada Schosinsky	50
Tabla 6. Evapotranspiración real para los años de simulación; ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7. Resumen de la recarga potencial por precipitación (R) y relación con la precipitación (P)	56

INTRODUCCIÓN

Esta investigación consiste en estudiar el potencial hidrogeológico aún inexplorado de la unidad hidrogeológica A3-Dunita de Medellín del sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA). La Dunita de Medellín carece de porosidad primaria en sentido estricto, ya que se trata de una roca cristalina, y el flujo de agua a través de la unidad ocurre fundamentalmente a través de la red de fracturas y diaclasas. La zona de estudio se encuentra enmarcada entre las coordenadas -75.554, -75.494 W y 6.233, 6.149 N, y corresponde al miembro sur de la unidad litológica Dunita de Medellín, donde está ubicado el altiplano de Santa Elena, zona suroriental de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia. El área de interés se ubica por encima de 2,200 m.s.n.m. (2,830 m.s.n.m como altura máxima), y comprende un área de 36 km².

El sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA) viene siendo estudiado desde el año 2000 con la realización del primer inventario de captaciones de agua subterránea. Actualmente se cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual que comprende tres unidades hidrogeológicas (UHG): A1-acuífero libre, A2-acuífero semiconfinado y A3-Dunita de Medellín. El acuífero libre es el más aprovechado y estudiado, pero aún no se cuenta con estudios exploratorios hidrogeológicos de la A3-Dunita de Medellín que permitan establecer la dinámica del agua subterránea en el Valle de Aburrá y la relación existe entre la unidad A3 con las unidades A1 y A2.

El uso del agua subterránea en los últimos años en el Valle de Aburrá se ha intensificado; y en la actualidad, se cuenta con más de 800 captaciones inventariadas por la autoridad ambiental, entre aljibes y pozos, que extraen agua no sólo para satisfacer necesidades de los sectores comercial e industrial, sino también para deprimir niveles freáticos en obras civiles (UdeA & AMVA, 2016).

Debido al uso intensivo que se le da al acuífero libre, y entendiéndose que en un futuro el agua subterránea podría ser usada para el consumo humano, es de gran importancia entender las diferentes formas en que el agua llega a este acuífero, proceso conocido como recarga. Uno de estos tipos de recarga está relacionado con la infiltración de agua en zonas por fuera del acuífero y que llega a incorporarse al medio subterráneo, bien sea como flujo subsuperficial o a través de fracturas en la roca. Definir esas zonas de recarga indirecta ayudaría a establecer áreas que deberán ser protegidas para la gestión por parte de la autoridad ambiental, evitando con ello posibilidades de contaminación del recurso subterráneo. Además de mejorar las estimaciones del balance hídrico integral de dicho acuífero.

La importancia de la unidad A3-Dunita de Medellín radica en que presenta una porosidad secundaria “importante” debida al alto grado de fracturamiento que presenta la roca y a la presencia de geoformas kársticas formadas por la disolución de brucita, mineral producto de la meteorización del olivino (Herrera, 2003). El alto grado de fracturamiento es producto del régimen de esfuerzos del emplazamiento

de la Dunita de Medellín, generando una amplia variación en el tipo de estructuras que van desde estructuras de deformación de un nivel estructural dúctil (bandeamientos composicionales de la dunita), dúctil-frágil (zona de cizalla en el contacto con la Anfibolita subyacente) y nivel frágil con un alto fracturamiento (Solingral S.A & Alcaldía de Medellín, 2011). Datos de caudal de afloramientos y obras de control geotécnico en el área de la Dunita indican un almacenamiento de volúmenes “significativos” de agua subterránea que podrían ser empleados para abastecimiento de agua al área urbana o rural de los municipios de Bello, Medellín o Envigado (UNAL & AMVA, 2008).

Dado el desconocimiento hidrogeológico que se tiene de la UHG A3-Dunita de Medellín, con este proyecto se busca llevar a cabo una caracterización hidroestructural rigurosa, que permita conocer tanto las condiciones de fracturamiento del macizo rocoso como las direcciones preferentes del flujo de agua subterránea. Adicionalmente, estimar la recarga potencial por precipitación que permitirá conocer el posible aporte de esta zona de recarga a las unidades A1 y A2.

Los objetivos del estudio corresponden a realizar un levantamiento estructural del macizo rocoso de la Dunita de Medellín que permita conocer las características de las fracturas en esta unidad rocosa, las características hidráulicas del macizo y las direcciones preferentes de flujo. Construir un modelo geológico-estructural que permita robustecer el modelo hidrogeológico conceptual existente. Estimar la recarga potencial por precipitación empleando el modelo SWB y la metodología de Schosinsky (2006).

Para lograr los objetivos propuestos se propone la siguiente metodología:

- **Recolección de información secundaria**

En esta etapa se recopilará y analizará toda la información disponible que ha sido generada tanto a escala local como regional para el sistema acuífero del Valle de Aburrá en cuando a: cartografía, geología, geomorfología, climatología, hidrología, calidad de aguas, hidrogeología, registro de perforaciones geotécnicas de estudios geológicos y estructurales adelantados, entre otros. Se recurrirá a distintas fuentes de información pública y privada como lo son universidades, entidades públicas (Servicio Geológico Colombiano, alcaldías, autoridades ambientales, etc.), empresas de consultoría.

- **Modelo hidroestructural de la Dunita**

Después de efectuar un recorrido de campo para determinar áreas donde aflore el macizo rocoso de la Dunita de Medellín, se realizará un levantamiento estructural riguroso, para la definición de las características de la roca y elaborar un modelo hidroestructural, con el fin de determinar las direcciones preferentes de flujo de agua subterránea.

- **Estimación de la recarga potencial por precipitación en la Dunita**

Se emplearán dos metodologías de balance de humedad en el suelo: el Soil Water Balance (SWB) desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) a escala diaria, y la metodología propuesta por Schosinsky (2006) a escala mensual. Ambas metodologías permiten obtener de manera simple y práctica la cualificación y cuantificación de la recarga potencial por precipitación para zonas que no cuentan con información primaria de la recarga real como esta, pero se aclara que la recarga potencial se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon et al., 2002; Rushton & Ward, 1979), por lo tanto, esta estimación no cuantifica el valor real de recarga que se obtiene únicamente con mediciones directas de niveles piezométricos (Vélez & Rhenals, 2008).

Este trabajo esta dividido en dos capítulos, el capítulo 1 es una transcripción del artículo "Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America" sometido a la revista internacional Hydrogeology Journal el 31 de octubre de 2020 y actualmente se encuentra en Scientific-technical (peer) reviews. Y el capítulo 2 es una transcripción del artículo "Determinación espacio temporal de la recarga potencial por precipitación en la Dunita de Medellín, Sistema acuífero del Valle de Aburrá, Colombia pendiente para ser enviado a revista de circulación internacional. Posteriormente se presentan las conclusiones generales del trabajo y las referencias.

CAPÍTULO 1

Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America

Sandra Patino ⁽¹⁾, Marcela Jaramillo ^{*(1)}, Cesar A. Espinosa ⁽¹⁾ & Manuel Arias ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Department of Earth Sciences, EAFIT University, Medellin, Colombia

* Corresponding author: majaram9@eafit.edu.co

ABSTRACT

The correct identification of recharge zones and understanding groundwater flow through fractured and karstic media are some of the main issues in hydrogeology and of utmost importance in managing groundwater resources. The Aburrá Valley in Colombia is an excellent example of a promising aquifer system for future water supply with recharge zones and hydrogeological units (HGU) still not well understood. One of those HGUs, the Medellín Dunite, is an ultramafic igneous rock with significant secondary porosity due to the high grade of fracturing and the presence of a pseudokarst system formed by the dissolution of magnesium-rich minerals. In this study, we aimed for the first approximation of this unit's hydrogeologic characteristics by performing a hydrostructural analysis based on a systematic collection of structural data in rock outcrops and karstic landforms available secondary information. The main objective was to calculate the hydraulic weight of discontinuities, and to determine the associated preferential groundwater flow directions, in order to improve the understanding of the relations between the analyzed HGU and the other units in the Valley. The results showed that the predominant directions of groundwater flow are WNW and ENE, which imply that lateral flows from the Dunite not only recharge the alluvial aquifers of the Aburrá Valley Aquifer System (AVAS) but could also be recharging the San Nicolás Valley Aquifer System (SNVAS), another rapidly developing and populating region. This study's findings show the importance of studying the Medellín Dunite and implementing management and protection measures for this aquifer unit.

KEYWORDS: recharge zones, fractured rocks, field techniques, igneous rocks, Colombia, hydro-structural characterization of rock masses

INTRODUCTION

The availability of most water resources around the world continues to decline due to inadequate environmental management practices. Thus, understanding the dynamics of aquifer systems is the starting point, as mentioned by World Water

Assessment Programme (WWAP) for the competent environmental authorities to implement strategies focused on the efficient use of water resources (WWAP, 2019). Colombia (South America), as reported by Instituto de Hidrogeología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) has a high groundwater potential; approximately 75% of its territory presents favorable conditions for groundwater storage (IDEAM, 2015; 2019). However, due to the country's high superficial water yield, groundwater resources have not been required to face supply needs. Therefore, the knowledge of the 64 aquifer systems identified is insufficient (IDEAM, 2010; 2019).

One of those systems is the Aburrá Valley, the hydrographic basin of the Medellín River, and one of the most populated valleys in Colombia with over 3.7 million inhabitants and an expected annual increase of 1.02% (Departamento administrativo Nacional de Estadísticas, DANE, 2018). The Valley encompasses ten (10) different cities, including Medellín, the second largest city in the country. In 2014, the water demand in the Valley was approximately 174 m³ per year per dwelling, and 83% of the potable water supply comes from superficial sources located outside the hydrographic basin, which implies a limitation in the offer for future demand (Universidad de Antioquia (UdeA) & Empresas Públicas de Medellín (EPM), 2014). Hence the importance of characterizing the hydrogeological environment, both the aquifers and recharge zones in the region, in order to use groundwater as an alternative supply source.

The Aburrá Valley Aquifer System (AVAS) is composed of three (3) hydrogeological units (HGU): HGU1-unconfined aquifer, HGU2-semiconfined aquifer, and HGU3-Medellín Dunite. The first HGU, where most of the studies have focused since 2002, represent the alluvial aquifers associated with the Medellín River's sedimentary dynamics. The third unit, and the focus of our study, is still very poorly understood.

The Medellín Dunite -HGU3- is an ultramafic igneous rock of Triassic age, with secondary porosity that has been enhanced by dissolution processes favored by its high fracturing degree, creating an underground drainage network and superficial characteristics that allow classifying it as a pseudokarst system (Herrera, 2003). Data of spring discharge reported in outcrops, and geotechnical studies in the Dunite area, indicate the storage of "significant" volumes of groundwater that could be used to supply the urban area of the Aburrá Valley through wells (IDEAM, 2015; 2019). However, there are not enough studies to understand its role in the aquifer system (e.g., aquifer, recharge zone of HGUs 1 and 2, or both).

There are three primary natural recharge sources in a river valley aquifer system: i) direct diffuse recharge by rainfall in the alluvial aquifers, ii) focus recharge through the riverbed and banks, and iii) indirect distant recharge from regional flows from the rocks that surround the Valley (UdeA & AMVA, 2016). Our hypothesis is that groundwater flow from the Medellín Dunite through the fracture system could represent an essential distant recharge source of the alluvial aquifers (HGUs 1 and 2), especially considering the extensive soil impermeabilization of the alluvial

aquifers due to urbanization processes in the AVAS, and the reduced interaction between the river and the alluvial aquifers due to the canalization of the former.

We performed a hydrostructural analysis based on a systematic collection of structural data in rock outcrops and karstic landforms and available secondary information to test our hypothesis. The main objective was to determine the general groundwater flow directions from the Medellín Dunite and its relationship with the other two HGUs within the AVAS.

STUDY AREA

The Aburrá Valley is in the western flank of Colombia's Central Cordillera. Specifically, our focus of study is the most southern body of the Medellín Dunite, in the high plains of Santa Elena, a locality east of Medellín. The area lays between coordinates 6.224, -75.552, and 6.156, -75.485, has an extension of 28 km², and the elevations range from 1,600 and 2,800 m.a.s.l. (Figure 1). The average annual rainfall is 2,600 mm, and the average annual temperature is 18°C.

GEOLOGY

The Medellín Dunite is an elongated body part of the Aburrá Ophiolitic Complex (Correa & Martens, 2000; Toussaint, 1996), with orientation of 350° (Figure 1). It is 35 km long and 5 km wide, with a total area of about 71 km², dismembered into three segments: the southern segment (the target area) with a length of 10 km, the middle segment with a length of 11 km, and the northern segment with a length of 14 km (Consortio de Microzonificación Sísmica & AMVA, 2007). The Dunite has a maximum thickness of approximately 600 m (Henao & Monsalve, 2018). The Medellín Dunite has a subhorizontal failed contact with the Medellín Amphibolite through the Acuarela fault due to the Dunite's thrusting on the Amphibolite. This event imprinted a high degree of fracturing in the rock, originated fault rocks, banded structures, shear zones, low geomechanical quality, and high secondary permeability (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011).

The Dunite is composed mainly of olivine, with chromite and magnetite in lesser proportion. Serpentinization processes have favored the presence of antigorite and brucite. Likewise, there is evidence of dynamic metamorphism (Herrera, 2013), shear zones, and joints presence (Consortio de Microzonificación Sísmica & AMVA, 2007). Overlaying this unit is a volcanic ash layer of thicknesses between 10 and 20 m, characterized by being porous and permeable, favoring the water infiltration and circulation in the soil (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011).

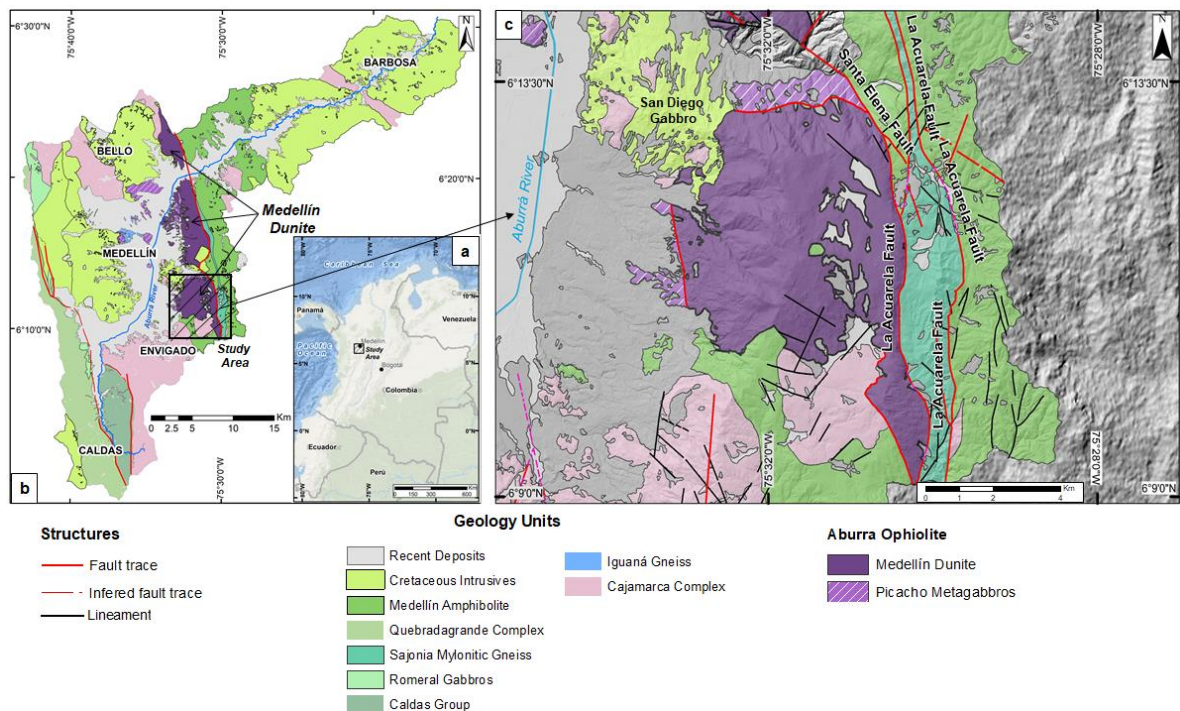


Figure 1. Location of the study area. **(a)** Map of northwestern South America (National Geographic MapMaker Interactive) with indication of the study area. **(b)** Simplified geological map of the Aburrá Valley adapted from Rodríguez and Correa–Martínez (2015); the area enclosed in the black square is the study area. **(c)** Local geological map of study area adapted of AMVA (2007); the study area corresponds to the southern body of the Medellín Dunite.

TECTONIC SETTING

The zone, framed in the complex tectonic setting of northern Andes, is characterized by the plateau-continent collision on the Caribbean margin, the active arc-continent collision, and the oblique subduction of the Nazca plate on the Pacific margin (Cediél et al., 2003; Vallejo et al., 2006; Kellogg et al., 2019; Mora-Páez et al., 2019). Consequently, there are two main stress directions: east-southeast for the Caribbean margin and east-northeast for the Pacific margin (Mora-Páez et al., 2019). The Northern Andean Block (NAB) is under this stress regime as a differentiable segment, which presents a displacement in a northeast direction (060°) from the South American plate (Mora-Páez et al., 2019). Moreover, the displacement direction towards the northeast of the Panama Block (BP) is a relevant component that controls the deformation of NAB as a result of tectonic scape due to the Cocos Ridge in Central America (Kobayashi et al., 2014; Mora-Páez et al., 2019).

NAB's geologic history during the Mesozoic-Cenozoic shows a series of accreted oceanic affinity terrains divided by large fault systems (Cediél et al., 2003). In the northwestern section of this geologic block is the Aburrá Valley region, subject to a dextral regime dominated by two fault systems with a south-north direction (Rodríguez et al., 2005; Casas & Monsalve, 2018): the Cauca-Romeral Fault System (CRFS) to the west, and the Palestina Fault System (PFS) to the east. Studies have

shown that the SFCR, the closest of the fault systems to the Aburrá Valley, has had a polykinematic behavior over time (dextral and sinistral) due to changes in the geodynamics setting (Ego et al., 1995; Taboada et al., 2000; Pulido, 2003; Ordoñez et al., 2005; Restrepo et al., 2016). In the Central Cordillera's eastern flank, the PFS presents dextral kinematics (Garcia-Delgado & Velandia, 2020).

Under this stress regime the Medellín Dunite emplacement took place, originating a broad set of structures ranging from ductile deformation structures (compositional banding) to ductile-brittle (shear zones) and brittle structures (significant presence of fractures) (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011).

KARSTIC GEOMORPHOLOGY

Currently, pseudokarst occurrence (pseudokarst landforms) has only been reported in the southern segment of the Medellín Dunite. This landform development is due to climatic, lithologic, and structural controls. However, the pseudokarst system in the area is typically structurally driven because of the fractures and joints widening inside the rocky massif (Herrera, 2003).

The presence of brucite in hand samples indicates the dissolution of magnesium-rich minerals from the Dunite under atmospheric conditions. Additionally, the structural controls and the thinness of the saprolite and humidity-retaining volcanic ashes facilitate the meteoric water infiltration and the pseudokarst development in the rock (Herrera, 2003; Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011). According to the same sources, the typically karst landforms reported in the Dunite are dolines (804), ponors (457), karrens (52), uvalas (39), small caverns of less than 1m height x 1m width (27), and springs (22).

METHODOLOGY

INFORMATION COLLECTION

The bibliographic information available for the study area was consulted and compiled in geology, karstic geomorphology, structural geology, tectonics, and cartography (roads, drainages, topography). In this study, we use structural data collected in the framework of three previous studies: i) the seismic microzoning study of the Aburrá Valley (Consortio de Microzonificación Sísmica & AMVA, 2007), ii) the hydrogeological model of Medellín's southeastern hillside (Solingral S.A & Alcaldía de Medellín, 2011), and iii) the technical report for the tunnel that connects Medellín with the international airport to the east (Consortio Conexión Túnel Aburrá-Oriente (CTO), 2013).

FIELD DATA COLLECTION

During April and October 2019, the work team collected 1099 structural data in the field in 50 points located in outcrops over road cuts and creeks. Each structural data has information such as georeferencing, strike, dip, persistence, free opening, aperture filling, roughness, density of fracturing (number of fractures per lineal meter), weathering condition associated with the rock, number of fracture sets per outcrop, and water presence. The structural information collected in the field can be found in the supplementary material.

HISTOGRAMS OF STRIKE TRENDS

Statistical analysis was done to the collected structural data employing rose diagrams or frequency histograms using the software Dips 6.0 (Rocscience Inc, 2020), also used to perform geomechanics analysis. Only the strike was considered for the construction of diagrams. This procedure sought to determine the set of joints' predominant strike in the massif, regional structures (faults and lineaments), drainage network, and pseudokarst structures.

Drainages direction analysis

The drainage network of the study area was segmented into straight sections of 200 m. To each straight segment, we determine its length and strike using GIS tools. Finally, the data was plotted in rose diagrams in Dips 6.0 (Rocscience Inc, 2020). With the drainage and structures direction analysis, the influence of fractures and faults in the drainage network development could be determined. This analysis applies to crystalline rock masses, where the development of drainage and stream incision is often controlled by zones of structural weakness

Lineament Analysis

All data found in the bibliographic search were used to carry out the lineament analysis. The automatic extraction of lineaments was made using ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, 1969) from a multidirectional hill shade map made using a 12.5 m DEM (Digital Elevation Model). This procedure simulates the terrain's natural look, including the diffuse sky illumination (Nagi, 2014). Afterward, we use the Geomatica® software and the LINE algorithm to highlight the linear features of the multidirectional hill shade map (PCI Geomatics, 2005). A manual selection of lineaments in geological units present in the area was made, and the coordinates of the initial and final points in each polyline were obtained. After the initial automatic filtering, a manual selection of lineaments according to geofoms was performed.

Finally, we use the RockWorks® software (RockWare Inc., 1983), which takes as input the coordinates of the initial and final points to calculate each line's direction. Once the directions were obtained, these were plotted in a rose diagram of

frequency to visualize the structural tendencies. The analysis helped us visualize the secondary permeability areas that could be a relevant factor for the infiltration and the relation of these structures with the regional structural pattern.

Structural analysis of dolines

The location of the 804 dolines from previous studies and 20 new ones found during our fieldwork was used to perform a geospatial analysis of the dolines. Because the dolines tend to concentrate in different zones following a preferential direction, we decided to group them according to the high-density points areas. For each area, a linear trend curve was adjusted using GIS tools and interpretation of the field data, and finally, each line's strike was extracted. This analysis aimed to determine the relationship between karstic landforms and the structural controls in the area.

HYDROSTRUCTURAL POLAR DIAGRAMS CONSTRUCTION

A hydrostructural polar diagram is a geostatistical frequency polar diagram, which seeks to evaluate the importance of discontinuity sets according to their potential to allow water to flow through them. For the construction of these diagrams, the methodology proposed by authors such as Louis (1974), Chica (1979), and Scesi and Gattioni (2009) was followed.

Initially, a polar representation of the sampled structures in an equatorial equal-area net was plotted, considering the strike and dip data. Subsequently, the hydrostructural polar diagram was constructed as a geostatistical frequency polar diagram that evaluates the order of importance of families of discontinuities according to their potential as water conductors. The same procedure must be carried out to make the fracture frequency diagram. However, each pole in the polar hydro-structural diagram has a hydraulic weight (H.W) that depends on geometric parameters of the discontinuity (Chica, 1979), as shown below.

$$HW = 1 + \frac{RF * P * fd * fa}{X}$$

Where, *HW* is hydraulic weight, *RF* is a roughness factor (values between 0.1 and 1.0, where 1.0 indicates smooth surface and 0.1 indicates very rough surface), *P* is persistence (cm), *fd*: fracture density (number of discontinuities per set per meter), *fa*: free aperture of the discontinuity (mm), *X*: normalizing factor to control the scale of *HW* values, allowing better visualization of the data. All parameters, except those specified otherwise, are dimensionless.

According to the methodology proposed by Chica (1979), each discontinuity is associated with its respective hydraulic weight, and the frequency isolines are traced the same way as it was done for the poles, where the primary concentration areas

will represent the areas (into the diagram) with the highest HW. The fractures with higher HW are considered the most transmissive and do not necessarily coincide with the most recurrent fracture sets. Finally, the potential preferential directions of groundwater flow in the rock mass are obtained.

The knowledge of the physical and geometric properties of surface discontinuities can be used to obtain partial results on the preferential directions of groundwater flow in a rock mass (Chica, 1979). However, because the approach used here does not consider the interconnection between discontinuities, the fractured medium's groundwater flow could be occurring in both the direction and the dip of the structures' planes. The most appropriate approach is the combination of hydraulic weight and density diagrams to determine which direction is actually most important in terms of flow.

RESULTS

PRIMARY AND SECONDARY INFORMATION

A total of 1,550 structural data of joints were gathered; our work team collected 1,099, 99 came from Solingral S.A. and Alcaldía de Medellín (2011), and the remaining 357 came from CTO (2013). Additionally, 107 fault data were available: 18 collected by us, 18 from CTO (2013), and 71 from Consorcio de Microzonificación Sísmica and AMVA (2007). Also, we had a total of 118 lineaments: 30 automatically traced, as was explained in the methodology, and 88 from the seismic microzoning study (Consorcio de Microzonificación Sísmica & AMVA, 2007). We also used 18 striation data collected in this study and 824 karst landforms: 20 inventoried in this study, 310 from Solingral S.A. and Alcaldía de Medellín (2011), and 494 from Herrera (2003). See Figure 2 for the location of all the data points used in this study.

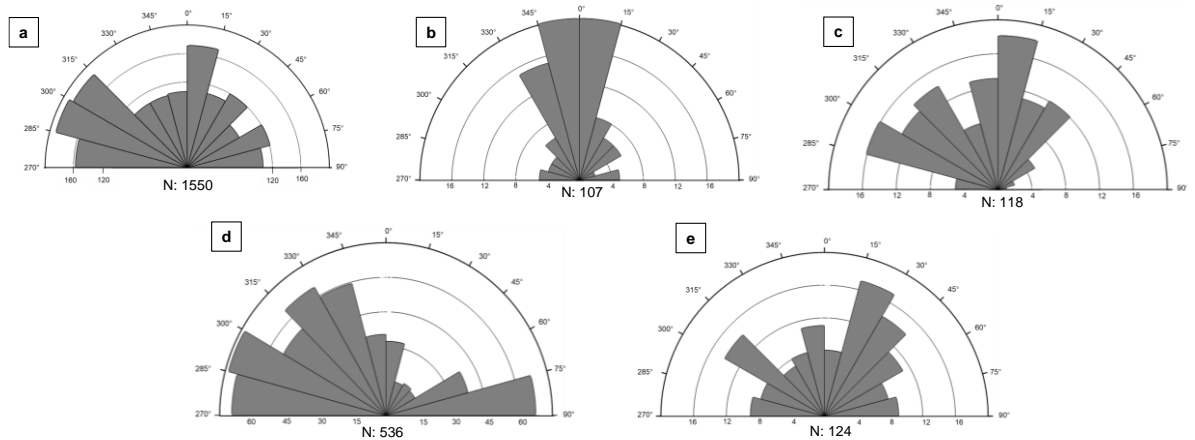


Figure 3. Rose diagrams of structures: (a) joints, (b) faults, (c) lineament, (d) drainage directions, (e) dolines.

In the histogram of the joint's orientation, the largest orientations peak shows predominant strikes towards 285°-315° with a concentration of more than 145 data. There is a second trend with 000°-015° strikes composed of 140 data (Figure 3a). These planes have a preferential dip direction towards NE, with a high dip angle (70°-90°). Regarding the faults, there is an N-S preferential orientation (which is influenced by the predominant regional fault systems in the area), with 26 faults in a range of strikes between 340°-360° and 30 between 000°-010° (Figure 3b). Preferential orientation of the lineaments, with more than 20 of the data in the 000°-020° strike range, was identified from the rose diagram (Figure 3c). There is another trend of lineament orientation with 18 planes in a 320°-340° range. The rose diagrams of the drainages' orientations show a preferent direction of 260°-300° with 90 data in this orientation range. There is another significant trend with 80 data in a range strike between 320°-340° (Figure 3d). Finally, in the doline-type landforms' structural trend analysis, a preferential direction was found at 020°-030° with more than 15 data in this direction (Figure 3e).

HYDROSTRUCTURAL POLAR DIAGRAMS

The joints were classified into families or sets according to their dip direction and dipping angle to identify the different structures that control the water flow. 1,193 data out of the collected 1,550 were used to carry out this analysis; 357 from previous studies were dismissed because they did not have any geomechanical parameters measurements. Six sets of discontinuities were classified, where set 1 has the highest hydraulic weight (HW), and set 6 has the lowest HW (Figure 4 y Table 1).

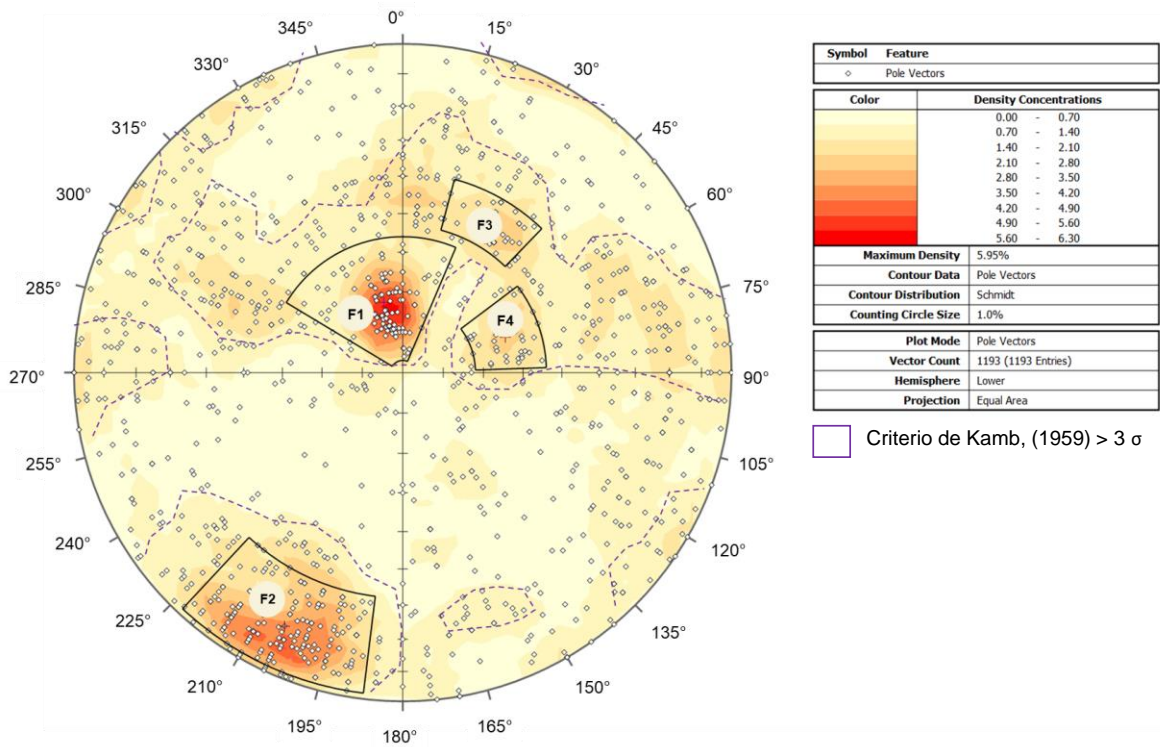


Figure 4. Pole vector display with green polygons highlighting the different joints sets.

Table 1. Basic statistics of the data on the joints sets.

Parameter	F1	F2	F3	F4
N	164	025	211	251
% of data	18	78	43	27
Dip direction (°)	3.1	2.8	3.9	3.3
Dip (°)	2.1	1.5	1.2	3.2
Aperture (mm)*	4.5	4.8	3.7	6.3
Persistence (m)*	0.7	0.7	0.8	0.4
Density (# fractures/meter) *	6.1	3.9	5.1	5.7
Roughness *	164	025	211	251
Average hydraulic weight	18	78	43	27

*The values presented correspond to the average

Structural zones

Four structural zones were defined to make a local interpretation of drainage behavior and structural directions. The parameters considered for such classification were: structural patterns, trends of the drainage network, lineaments, textures (undulations in the terrain or vegetation changes that can be seen from a satellite image or GIS product), and the distribution of dolines concentration (Figure 5). For all zones, the parameters with the most significant influence in the hydraulic weight

values are persistence, followed by fracture density, roughness, and aperture (Figure 6).

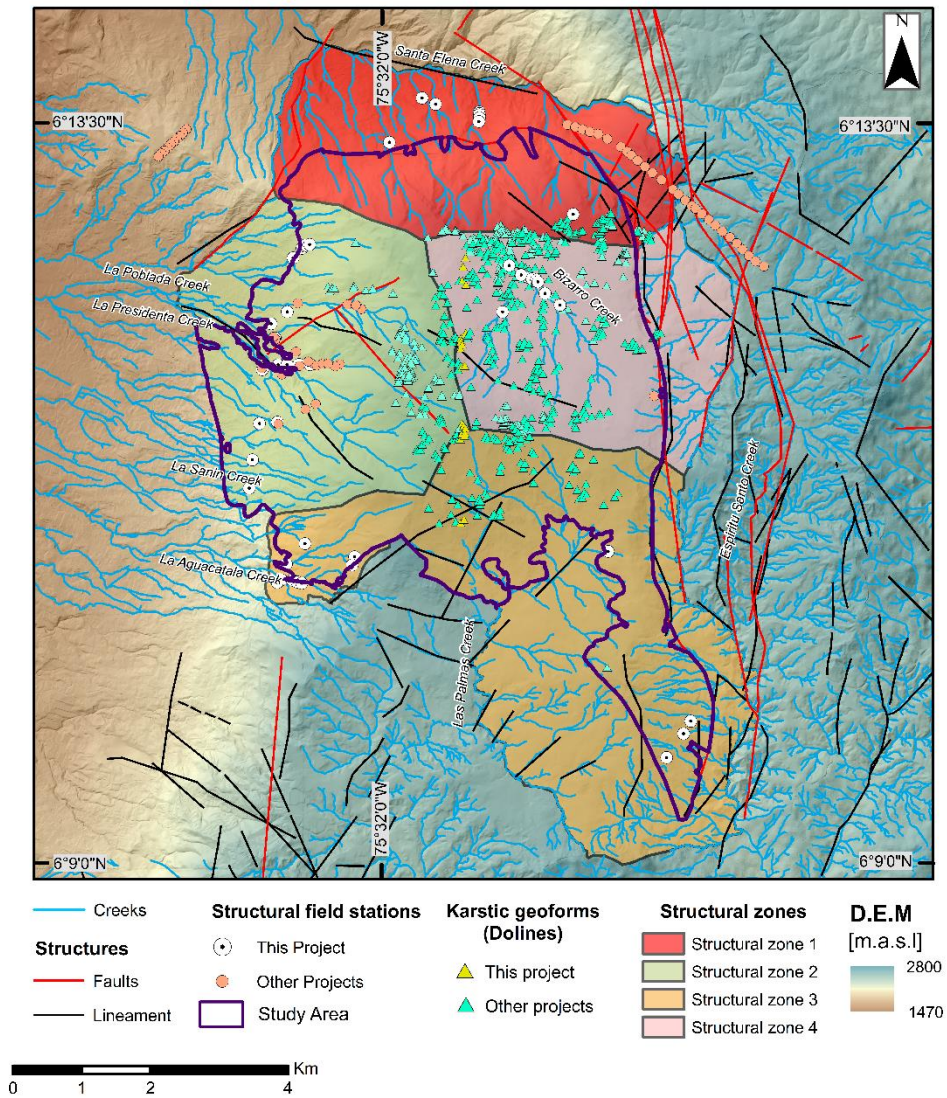


Figure 5. Map of distribution of structural zones. Structural zone 1 in red, structural zone 2 in green, structural zone 3 in orange, structural zone 4 in yellow.

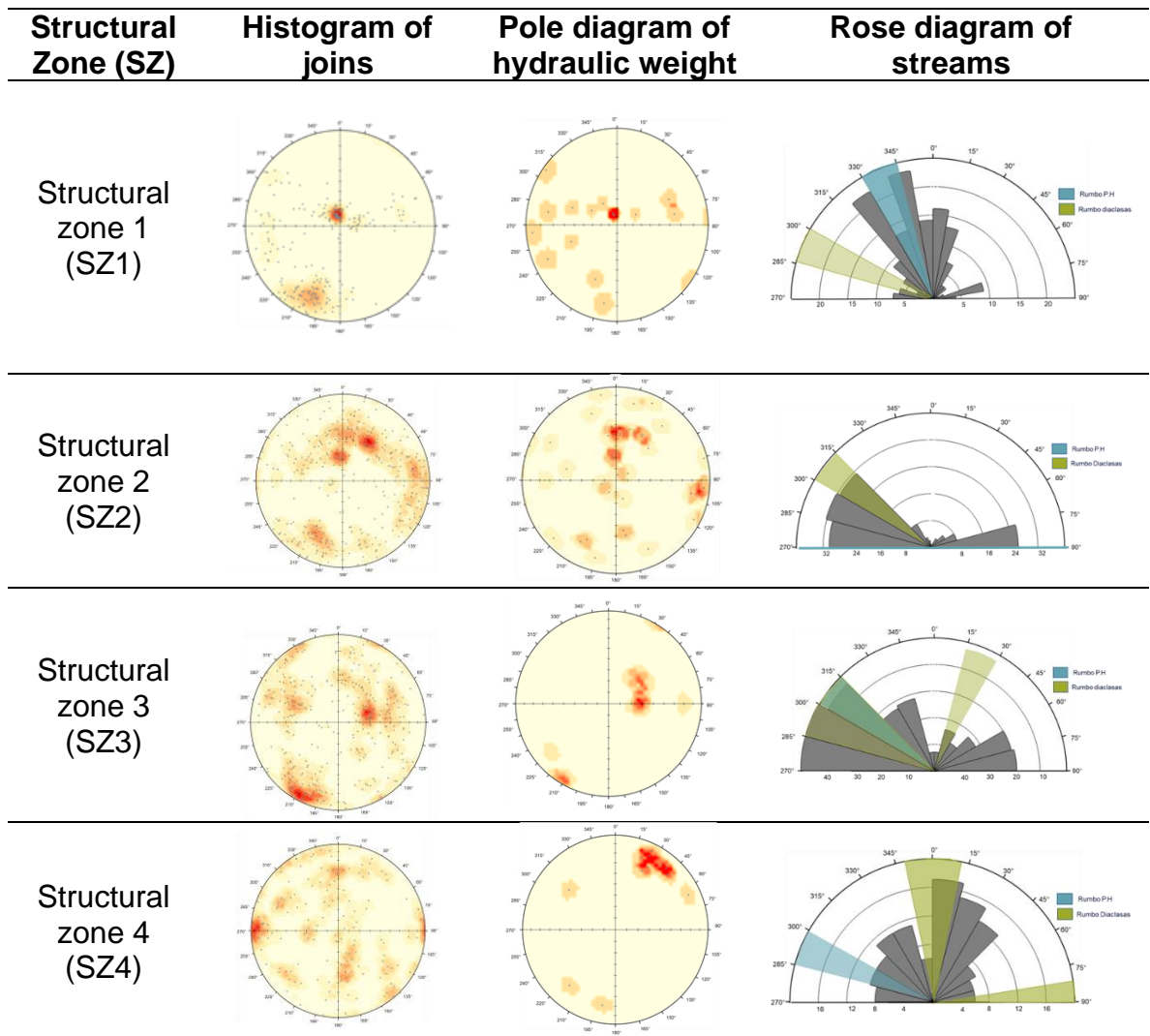


Figure 6. Structural zones of the study area with their characteristics.

Table 2. Basic statistics of the data on the structural zones.

	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4
Dip (°) / Dip direction (°) (dominant sets)	75/020-030	46/220-235	(i) 25/230-240, (ii) 80/020-040	85/000°-010°
Dominant joint set	F4	F3	F3	F5
Aperture (mm)*	1	1	1	1
Persistence (m)*	2.6	2	0.3	0.2
Density (# fractures/meter)*	3	4	4	3
Roughness*	Little rough	Smooth	Smooth	Little rough

	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4
Hydraulic weight (HW)*	2.5	1.2	1.1	1.1
Presence of water in joint	Very little (drip in 3% of the planes)	Little (drip in 10% of the planes)	Null	Null
Dominant factor of HW values	Roughness and persistence	Persistence and fracture density	Aperture and roughness	Persistence and fracture density
Dominant Dip/Dip direction (°) of HW	15/164	35/180	29/254	71/210
Dominant Dip/Direction (°) of density	79°/025°	20°/172°	82°/032°	72°/210°
Dominant strikes (°) of streams	320°-360°	280°-290°	280°-300°	000°-020°

*The values presented correspond to the mode

- **Structural zone 1**

SZ1 is located in the northernmost part of the study area (Figure 5). The most conductive fractures (those with the highest hydraulic weight) have a predominant direction 320°-350° dipping slightly (<20°) toward S-SE. The joints with the highest fracture density are dipping towards the northeast with inclination angles of 70°. The joints and drainages have an NW direction (Figure 6). More specifically, in SZ1, groundwater moves predominantly in NW-SE or SE-NW directions, depending on the regional hydraulic gradient.

- **Structural zone 2**

The joints of zone 2, located to the west of the study area (Figure 5), are characterized by presenting scattered data; only 35 data is in the preferred bearing. The most conductive fractures in this area showing a preferential strike trend towards 280°-320°, dipping predominantly to the southwest with an inclination of 35°. The joints with the highest fracture density are dipping to the southeast with low inclination angles (20°-25°) (Figure 6). Therefore, in SZ2, there are preferent E-W, so the groundwater flow would preferentially be in those same directions.

- **Structural zone 3**

Structural zone 3 is the southernmost zone in the study area (Figure 5). The joints with the highest fracture density are dipping towards the northeast with high dip angles (80°), and those with the highest hydraulic weight are dipping to the

southwest with medium dip angles (30°-40 °) (Figure 6). The most conductive fractures in this zone show a preferential trend towards 280°-300°. In conclusion, in SZ3, there is only one preferential flow direction, the first NW-SE. The drainage network in SZ3 has an NW-SE direction, nearly W-E, contrary to the flow direction in structural zones 1 and 2.

- **Structural zone 4**

This zone is located in the central-eastern part of the study area (Figure 5). There is a marked E-W strike trend of the joints, dipping towards N and S directions with high and medium angles (35°-80°). There is another marked set of joints in this zone with 85/000°-010° orientation. In this zone the family of joints with the highest hydraulic weight also exhibits the highest fracture density, and dips towards the southwest with dip angles between 70° and 75°. The drainages have a trend towards NNE (Figure 6). In this SZ4, the groundwater flow would have a predominant direction towards NW and SE (the one with the highest hydraulic weight). It is essential to highlight that drainage density is very low in this area, which indicates that water infiltration is more significant than in the rest of the study area due to karst features. This may be indicating high water circulation through the rock due to the pseudo-karst system in this region, as Herrera (2003) reported.

DISCUSSION

This study consisted of a hydrostructural analysis based on a systematic collection of structural data in rock outcrops and karstic landforms and available secondary information to determine the general groundwater flow directions from the Medellín Dunite and its relationship with the other two HGUs within the AVAS. From the analysis of the results, a conceptual model of the general groundwater flow directions and the relation between the Dunite and the other AVAS hydrogeologic units was built (Figure 7). The predominant flow directions are WNW and ENE.

It is important to keep in mind that the implemented methodology does not consider the interconnection of fractures, an essential factor in determining groundwater flow directions in the area. Therefore, the proposed flow paths are described concerning the strike, but these could also occur by the dip of the structure's plane.

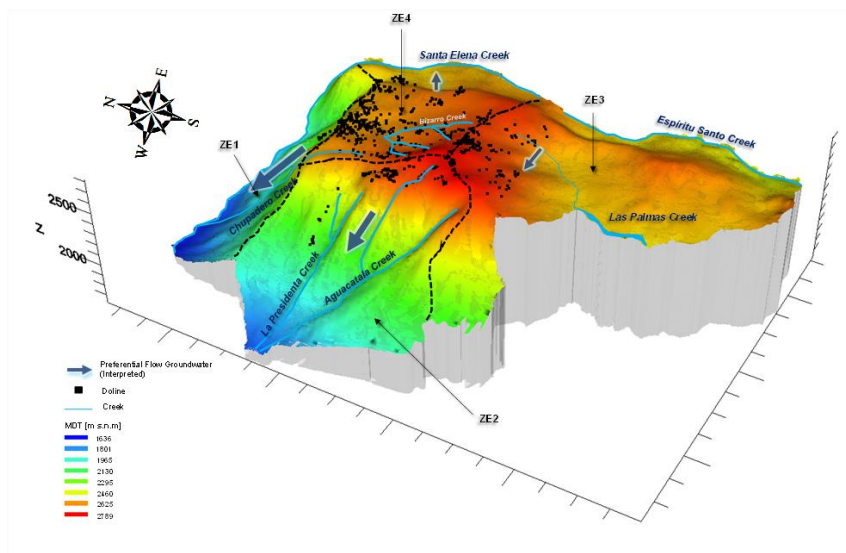
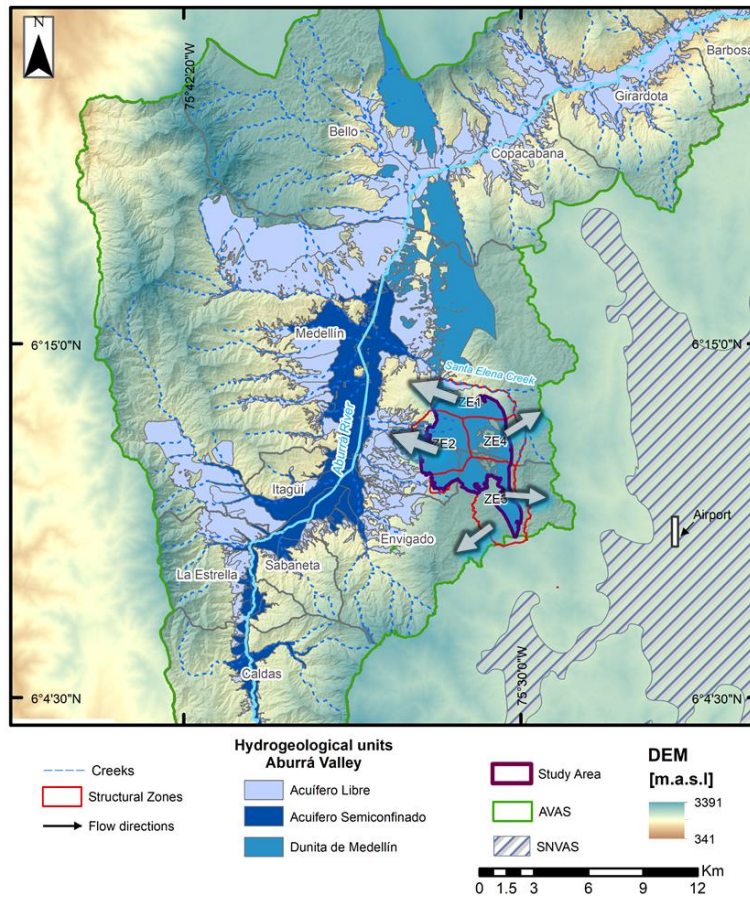


Figure 7. Predominant groundwater flow directions in the study area. (a) Map of groundwater directions, (b) block diagram of groundwater directions.

In the study area, the fractures with higher density, hydraulic weight, and aperture (i.e., the fractures with highest potential to transmit water) exhibit a predominant

northwesterly azimuth pattern towards Aburrá Valley, where HGUs 1 and 2 of the AVAS are located. Due to abrupt changes in slope, the water flow paths in some parts of the Dunite (SZ2 to the east) would be short, generating mid-slope springs, evidenced in geotechnical studies out in this area (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011).

The Dunite's groundwater flow is influenced by the intrinsic conditions of the rock and a strong component in terms of fracturing and the pseudokarst system. These conditions can generate preferential fast flows along the pseudokarst conduits and slower flow through the rock matrix, producing a point-recharge on the dolines, or diffuse recharge through either the volcanic ash or the weathering profile of the Dunite, as reported by Solingral S.A. and Alcaldía de Medellín (2011).

The high fracturing in the Dunite, related to the faulting and distension processes in the region, results from a tectonic predisposition to karst formation in a massif with almost zero interstitial porosity. The channels and lineaments of streams are generally controlled by geological structures (faults and fractures) (Singhal & Gupta, 2010), which is evident in the structural zones where the drainage network presents the same structural tendency as the joint sets. It can be inferred that the total infiltration of the surface drainage in specific areas is through macropores, caused by both fracturing and dissolution, forming underground streams that recharge the creeks located in the western zone (creeks as La Presidenta and La Poblada). Furthermore, we propose a main stress (σ_1) in a northwest-southeast direction for the study area. The structural characteristics present are representative of a sinister kinematic transcurrent stress regime, which coincides with the qualities of the CRFS (Cauca-Romeral Fault System), to which a sinister and dextral polykinematics is attributed (Ego et al., 1995; Taboada et al., 2000; Pulido, 2003; Ordoñez et al., 2005; Restrepo et al., 2016). Mora et al. (2019), also suggest a σ_1 direction towards the east-southeast on the northwestern Colombian margin during the Pliocene-Pleistocene due to the collision of the Panama-Chocó Block (PCB) with the NAB.

Consequently, our results support the hypothesis of other authors such as Herrera (2003) related to the tectonic predisposition to karst formation in the Medellín Dunite. Several factors (e.g., the orientation of discontinuities and the distribution of their geomechanical characteristics) allow identifying a system of compressive forces with an NW-SE direction. Furthermore, the development of shear structures with directions NNE favors the circulation of water and a more intense chemical weathering matching the karstic landforms (sinkholes) in the area. This arrangement of stresses in the NE zone of South America would be relatively recent (Pliocene-Pleistocene) as explained by Mora et al. (2019), implying that the formation of karst features in the area would have only developed during the Quaternary under favorable tectonic and climatic conditions (high humidity)

Finally, the hydrostructural analysis allowed us to support our hypothesis that the Medellín Dunite is a recharge zone for the alluvial aquifers (hydrogeological units

HGU 1 and 2) of the Aburrá Valley Aquifer System (AVAS). Unexpected results were also obtained in this study. The most significant one is that the Medellín Dunite might also be recharging another aquifer system in the region, the San Nicolás Valley Aquifer System (SNVAS). This can be implied by another set of groundwater flow directions with a southeastern trend, i.e., a direction opposite to the AVAS. The San Nicolás Valley is another rapidly growing economic and urban area, which is experiencing deficits in water supply and might need to rely on groundwater or conjunctive use of surface water-groundwater in the near future (Restrepo-Correa et al., 2018).

Due to the apparent role of the Medellín Dunite as a recharge zone for both valleys, further studies are necessary to quantify recharge rates so that the environmental agencies in each region can be more prepared for the proper management of groundwater resources. Such studies might include environmental isotopes, instrumentation of the Dunite and monitoring of piezometric heads, and numerical groundwater flow modeling.

CONCLUSIONS

A hydrostructural analysis was performed to understand the regional groundwater flow in the Medellín Dunite, one of the hydrogeologic units of the Aburrá Valley Aquifer System. The main sets of fractures were graphed in hydraulic weight (PH) diagrams, which helped identify the structures that conduct more water within the rocky massif, i.e. those that allow passage of water through them to their physical conditions. Subsequently, these data were correlated with the surface drainage network and the superficial and subsurface karst features present in the study area to finally obtain the interpretation of groundwater flow directions in the Medellín Dunite.

With the division of the study area into four structural zones, it was evident that there are different flow directions marked by the patterns of the structures, the trends of the drainage network, the lineaments, the soil textures, and the contrasts in the concentrations of sinkholes points: 320° - 350° for SZ1, 280° - 320° for SZ2, 280° - 300° for SZ3, and 000° - 010° for SZ4.

As a result of this study, WNW and ENE flow directions are proposed, based on the intrinsic conditions of the HGU3-Medellín Dunite (fracturing, pseudo-karst landforms, and the marked elevation gradients). These directions show a possible groundwater contribution to the Aburrá Valley aquifer system and the San Nicolás Valley aquifer system (to the southeast, where the Medellín city airport is located). Thus, the HGU3-Medellín Dunite could represent a potential recharge zone for both systems, for which protection and regulation policies must be implemented, seeking to minimize anthropic impacts for both contamination and decrease of the groundwater resource.

This research is an initial, pioneering study on a regional scale about the HGU3-Medellín Dunite's hydrogeological potential, which reflects the importance of this unit in the AVAS. This work should be complemented with the quantification of available groundwater volumes through direct measurement methods such as observation or abstraction wells and followed by numerical modeling of groundwater flow. Also, hydrochemical and isotopic studies are essential to understand the groundwater flow directions in the region and define recharge zones to prioritize the use of water and avoid actions that deteriorate the quality of the water being recharged.

ACKNOWLEDGMENTS

We want to thank EAFIT University for funding this research, and the Consortium Connection Tunnel Aburrá-Oriente and Medellín's Mayor's Office for providing us with data that complemented this study. Finally, we want to express our gratitude to the Undergraduate Groundwater Research Group (SIAS by its Spanish acronym) of the Geology program at the Department of Earth Sciences of EAFIT University for all their help during fieldwork.

FUNDING INFORMATION AND CONFLICTS OF INTEREST

This work was funded by EAFIT University, Medellín, Colombia, South America. The authors confirm no conflict of interest in connection to the material being submitted.

CAPITULO 2

DETERMINACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA RECARGA POTENCIAL POR PRECIPITACIÓN EN LA DUNITA DE MEDELLÍN, SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA

Sandra, M. Patino ⁽¹⁾ & Marcela Jaramillo ⁽¹⁾ *

⁽¹⁾ Department of Earth Sciences, Eafit University, Medellín, Colombia.

* Corresponding author: majaram9@eafit.edu.co

RESUMEN

La zona de interés está enmarcada por la unidad hidrogeológica Dunita de Medellín, que hace parte del sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA), y se caracteriza por presentar una porosidad secundaria dada por el alto grado de fracturamiento del macizo rocoso, y la disolución de minerales por la meteorización dando origen a un sistema pseudokárstico que facilita la infiltración del agua lluvia, y la convierte en una unidad con potencial hidrogeológico aun inexplorado, en la que faltan estudios que permitan establecer la dinámica regional del agua subterránea en el Valle de Aburrá. En esta investigación se determinó la distribución espacio temporal de la recarga potencial por precipitación, empleando dos métodos de balance de humedad en el suelo: el Soil Water Balance (SWB) desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) a escala diaria, y la metodología propuesta por Schosinsky (2006) a escala mensual. Ambas metodologías permiten obtener de manera simple y práctica la cualificación y cuantificación de la recarga potencial por precipitación para zonas que no cuentan con información primaria de la recarga real como esta. La principal diferencia de los métodos empleados es la escala temporal de aplicación, la parametrización de los modelos, y los submodelos de estimación de escorrentía directa (Bastidas, 2019), donde para Schosinsky, la variable principal es el coeficiente de infiltración y para el SWB es número de curva. Se evaluaron 3 escenarios climáticos: año seco-El Niño (2015-2016) con valores de recarga promedios entre 1,114 mm/año (48% de la precipitación) por SWB y 612 mm/año (27% de la precipitación) por Schosinsky, año húmedo-La Niña (2010-2011) con valores de recarga promedios entre 2,077 mm/año (59% de la precipitación) por SWB y 1,214 mm/año (35% de la precipitación) por Schosinsky, y año normal (2013-2014) con valores promedio entre 1,392 mm/año (53% de la precipitación) por SWB y 775 mm/año (30% de la precipitación) por Schosinsky. Los hallazgos de esta investigación evidencian que la Dunita de Medellín representa una zona de recarga potencial importante para el SAVA, además que se requieren estudios de exploración hidrogeológica de detalle en la zona que involucren la construcción de pozos de observación para el levantamiento sistemático de información de niveles freáticos (que permitirían cuantificar la recarga real) además de datos de series de caudales en las principales

corrientes de la región de estudio, que permitirían realizar una calibración de los valores de recarga estimados aquí.

PALABRAS CLAVE: Zonas de recarga, Recarga de agua subterránea, Dunita de Medellín, Acuífero Valle de Aburrá, Hidrogeología

INTRODUCCIÓN

A nivel global los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, se encuentran bajo amenaza debido al aumento constante de la demanda, los malos usos, la contaminación y la alteración de los patrones hidrológicos asociada al cambio climático y global. Por tanto, la implementación de planes de gestión y prácticas de buen manejo del agua se convierten en un desafío, al igual que la ejecución de estudios de aguas subterráneas que permitan determinar cantidad y calidad (WWAP, 2019).

En Colombia, las aguas subterráneas adquieren relevancia a partir del año 2010 con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico -PNGIRH- del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2010) y el Estudio Nacional del Agua -ENA- 2010 (IDEAM, 2010), donde se determinó que aproximadamente el 70% del recurso hídrico del país se encontraba en el subsuelo.

Hasta la fecha, se han identificado 64 sistemas acuíferos en el territorio nacional, distribuidos en 16 provincias hidrogeológicas (IDEAM, 2010; 2013; 2015; 2018). En el departamento de Antioquia, específicamente en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, comprendida por Medellín y 9 municipios más, se tiene conocimiento del Sistema Acuífero del Valle de Aburrá (SAVA) (código 6.3 del IDEAM). El SAVA está comprendido por tres unidades hidrogeológicas: A1-Acuífero libre, A2-Acuífero semiconfinado y A3-Dunita de Medellín. La primera unidad es la más explorada y estudiada (UdeA & AMVA, 2010-2019; UdeA & AMVA, 2012; UdeA & AMVA, 2016), mientras que la unidad A3 aún no cuenta con estudios hidrogeológicos que permitan establecer de forma detallada la dinámica del agua subterránea en el Valle, y los aportes de recarga de la unidad A3 al SAVA.

La Dunita de Medellín (A3) es una roca ígnea ultramáfica compuesta en un 90% por olivino que, al meteorizarse, forma brucita que, a su vez, puede disolverse en presencia de agua y generar paisajes kársticos. El resultado de la disolución de la brucita, sumado al alto grado de fracturamiento de la Dunita, le imprimen una porosidad secundaria (Herrera, 2003) a esta unidad. Datos de caudal reportados en afloramientos y obras de control geotécnico en el área de la Dunita indican un almacenamiento de volúmenes “significativos” de agua subterránea que podrían ser empleados para abastecimiento de agua al área urbana o rural de los municipios de Bello, Medellín o Envigado (UNAL & AMVA, 2008).

Existen diferentes tipos de recarga para el sistema acuífero del Valle de Aburrá (UdeA y AMVA, 2016): i) recarga directa por precipitación, ii) recarga producto de la interacción hidráulica con el río Medellín y sus afluentes, y iii) recarga por flujos regionales procedentes de las vertientes, con aportes laterales. En el Valle de Aburrá, debido a la impermeabilización del suelo por la expansión urbana y a la canalización del río Medellín, los dos primeros tipos de recarga han disminuido, aunque no se sabe con certeza en qué porcentaje. Por lo tanto, la hipótesis que se tiene es que la Dunita de Medellín (A3), además de ser una unidad hidrogeológica con viabilidad para almacenar y transmitir agua, es una zona de recarga por flujos regionales para las unidades A1 y A2.

Para estimar la recarga existen varios métodos: medidas directas (empleando lisímetros y/o medidores de infiltración), balance hídrico (entradas, salidas y cambios de almacenamiento de agua), técnicas de trazadores (sustancias en el agua desde un punto a otro), ley de Darcy (cabezas hidráulicas) y métodos empíricos (relación de recarga con otras variables hidrológicas) (De Vries & Simmers, 2002; Vélez & Rhenals, 2008). Muchas de estas técnicas no cuantifican el valor real, sino que estiman la recarga potencial que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon et al., 2002; Rushton, 1979). En el SAVA, la Universidad de Antioquia-UdeA- y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA- aplicaron el método de balance hídrico por unidad de suelo (SWB por sus siglas en inglés) en 9 estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo del Valle, para la estimación de la recarga para el acuífero libre A1 en el año 2013 (UdeA & AMVA 2012). Sin embargo, no se incluyó a la Dunita de Medellín.

El objetivo de este estudio fue estimar el espacio temporal y la magnitud de la recarga potencial por precipitación en la Dunita de Medellín aplicando el método SWB (Soil Water Balance) y el modelo simplificado de Schosinsky (2006). Ambos métodos están basados en el balance de humedad en el suelo, pero difieren en sus desarrollos operacionales, por lo tanto, incide notablemente en los resultados finales y en la relevancia de los datos de entrada (Bogena et al. 2005; Xie et al. 2017). Se decidió implementar dos modelos diferentes debido a la incertidumbre asociada a los resultados de recarga entregados por un modelo, que dependen tanto de la parametrización como de los datos de entrada (Anderson et al., 2015), ya que los datos generalmente provienen de diferentes fuentes, métodos y escalas, y para realizar una comparación de los resultados.

ZONA DE ESTUDIO

LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra enmarcada entre las coordenadas -75.554, -75.494 W y 6.233, 6.149 N, y corresponde al miembro sur de la Dunita de Medellín, donde está ubicado el altiplano de Santa Elena, zona suroriental de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia. El área de interés se ubicada por encima de la cota 2,200. (2,830 m.s.n.m como altura máxima del DEM (Modelo de elevación digital de

terreno por sus siglas en ingles), y comprende un área de 36 km² limitada al Norte y al Occidente por el escarpe centro oriental del Valle de Aburrá, al Este por la quebrada Santa Elena y al Sur por la quebrada Las Palmas y el municipio de Rionegro. En la Figura 1a se presenta la localización del Valle de Aburrá, en Figura 1b se presenta la unidad litológica Dunita de Medellín en el Valle de Aburrá, y en la Figura 1c geología e hidrogeología específica del área de estudio.

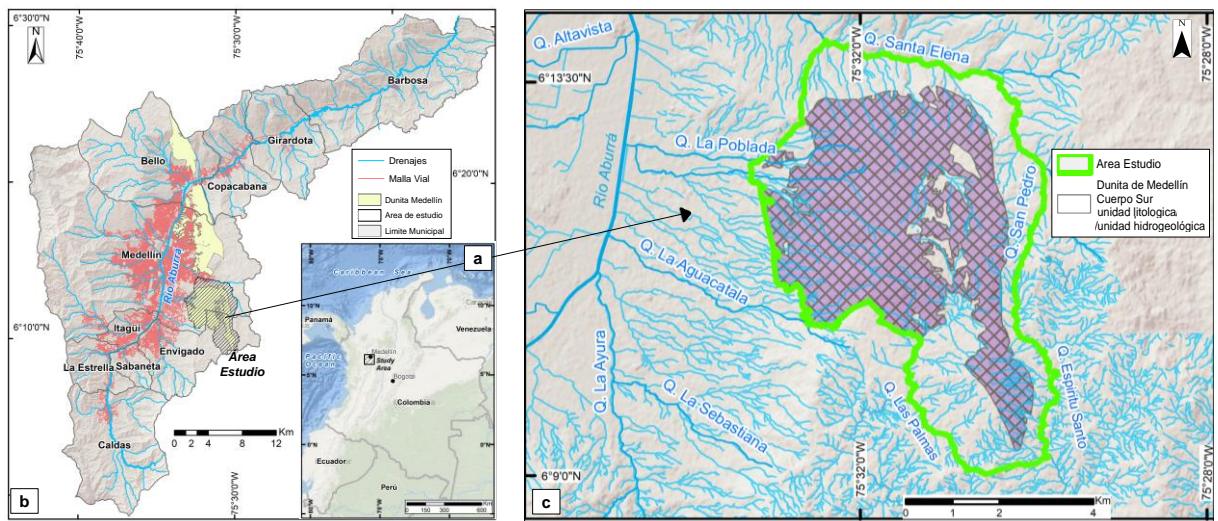


Figura 1. Locación del área de estudio. (a) Se observa Colombia y la ubicación del Valle de Aburrá en el país (National Geographic MapMaker Interactive) (b) Subregión del Valle de Aburrá con la división política de los municipios que la conforman, la unidad litológica Dunita de Medellín y en polígono achurado negro, zona de estudio (c) Área de estudio donde se resalta el cuerpo sur de la Dunita de Medellín tanto como unidad litológica como cuerpo sur de la unidad hidrogeológica A3-Dunita de Medellín.

CLIMA E HIDROGRAFÍA

La región de estudio presenta un régimen de precipitación bimodal con dos períodos mayores de lluvia entre abril–mayo y octubre–noviembre, intercalados con dos períodos menos húmedos entre diciembre–marzo y junio–septiembre. La precipitación media anual varía entre 2,300 y 3,400 mm/año y la temperatura media diaria varía entre 12.9°C y 22.3°C. Las fuentes hídricas más importantes en la zona corresponden a la Q. Santa Elena, Q. Santa Bárbara, Q. Espíritu Santo, Q. Las Palmas, Q. El Saladito, Q. La Aguacatala, Q. La Sanín, Q. La Poblada, Q. La Presidenta (Figura 1).

GEOLOGÍA

La zona de estudio está comprendida en un 90% por el cuerpo sur de la unidad litológica Dunita de Medellín (ver Figura 1b) que corresponde a una faja de rocas ultramáficas con dirección NNW, de 35 km de extensión aproximada, y 60 km² de área (Consortio de Microzonificación sísmica & AMVA, 2007). La faja se divide en tres cuerpos desmembrados, los cuerpos norte y centro, al parecer conectados por

debajo el río Medellín, y la parte sur (donde se encuentra el área interés) con 10 km de longitud (Consortio de Microzonificación sísmica & AMVA, 2007). La Dunita de Medellín es uniforme en composición, conformada por olivino (90%) y cromo-espinel (10%), es altamente magnésica y con grados variables de serpentización. En muestras de mano estas rocas son masivas, de grano fino, color muy oscuro (casi negro) cuando está fresca. Los minerales de alteración más comunes son los pertenecientes al grupo de la serpentinita (Rodríguez, 2009). El paso de dunita a serpentinita puede darse por adición de agua formando brucita ($[\text{OH}]_2\text{Mg}$) o por adición de agua y sílice. Según Álvarez (1982), es posible que durante la serpentización se haya presentado adición agua y remoción de magnesio y, en consecuencia, la Dunita del cuerpo sur es susceptible a la disolución y a la formación de un sistema pseudokárstico (Herrera, 2003). Además de esta unidad, en la zona se observan depósitos de vertiente tanto flujo de lodos y/o escombros, que cubren el otro 10% de la región de interés.

La Dunita de Medellín presenta contactos subhorizontales fallados con la Anfibolita de Medellín, por la falla La Acuarela, generados por el cabalgamiento de la Dunita sobre la Anfibolita. Este evento le imprimió a la roca un alto grado de fracturamiento, presencia de rocas de falla, estructuras bandeadas, zonas de cizalla, una baja calidad geomecánica y una alta permeabilidad secundaria (Solingral S.A & Alcaldía de Medellín, 2011).

HIDROGEOLOGÍA

El sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA) cubre el 80% del Valle, con una extensión mayor a 238.6 km², y está conformado por tres unidades hidrogeológicas (UdeA & AMVA, 2016). La unidad A1-Acuífero libre, conformada por los depósitos aluviales del río Aburrá - Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades del Neógeno o el Cuaternario. La unidad A2-Acuífero semiconfinado, que infrayace a A1, localizada en la parte central y sur del Valle y constituida por depósitos de origen aluvial separados del acuífero libre por una capa sellante de carácter arcilloso. Y la unidad A3- Dunita de Medellín (objeto de este estudio), la cual no ha sido explorada hidrogeológicamente. Ver Figura 2.

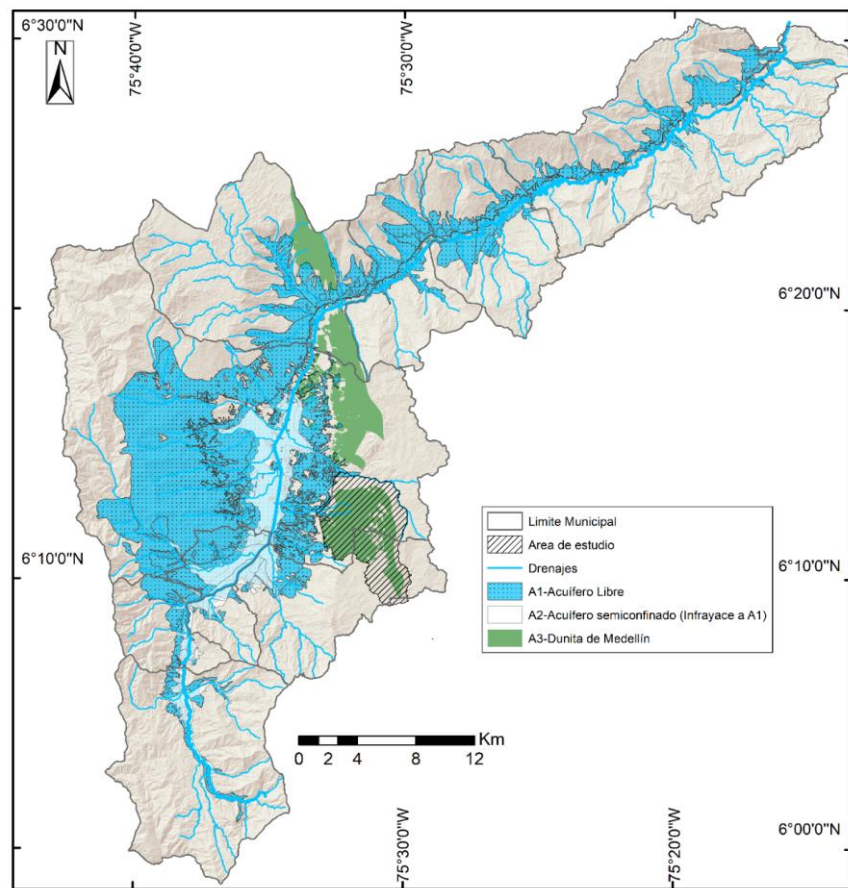


Figura 2. Mapa hidrogeológico del Valle de Aburra. Modificado de UdeA & AMVA, 2016.

MARCO CONCEPTUAL – MÉTODOS PARA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

Según Lerner et al. (1990), los métodos para estimación de recarga se clasifican en métodos de medición directa, balance hídrico, trazadores químicos e isotópicos y relaciones empíricas. El método más empleado es el basado en balances hídricos de humedad en el suelo (Xie et al., 2017) ya que permite estimar la recarga distribuida por precipitación y una aproximación de la respuesta del medio a los cambios en superficie (coberturas terrestres, usos del suelo, precipitación, evapotranspiración).

Los modelos de balance de humedad en el suelo se dividen en modelos de aproximación matemática tipo tanques y modelos de base física (Xie et al., 2017). Los primeros simplifican el medio en celdas verticales donde se almacena o se descarga agua, por flujos de entrada (precipitación), salida (evapotranspiración) y exceso en la capacidad de almacenamiento (recarga). Los modelos de base física representan el proceso de evapotranspiración como un sub-modelo (mayor refinamiento) y transitan la infiltración por la zona no saturada. (Ruiz et al., 2010; Turkeltaub et al., 2015, citados en Bastidas, 2019).

DOMINIO DE MODELACIÓN

El cálculo de recarga potencial parte de la delimitación del área a partir de las fronteras hidrogeológicas de la zona de estudio, la cual es el volumen de control para la cuantificación de los flujos de entrada y salida. Las fronteras corresponden a las subcuencas hidrográficas de las quebradas Santa Elena (al norte), Espíritu Santo (al este), Saladito (al Sur), Las Palmas (al suroeste), y la frontera de no flujo por la barrera geológica (al suroeste) dada por el contacto fallado impermeable entre la unidad geológica Dunita de Medellín, el Stock de San Diego y los Metagabros del Picacho, contacto geológico reportado por Consorcio de Microzonificación Sísmica y AMVA, (2007). Ver Figura 3.

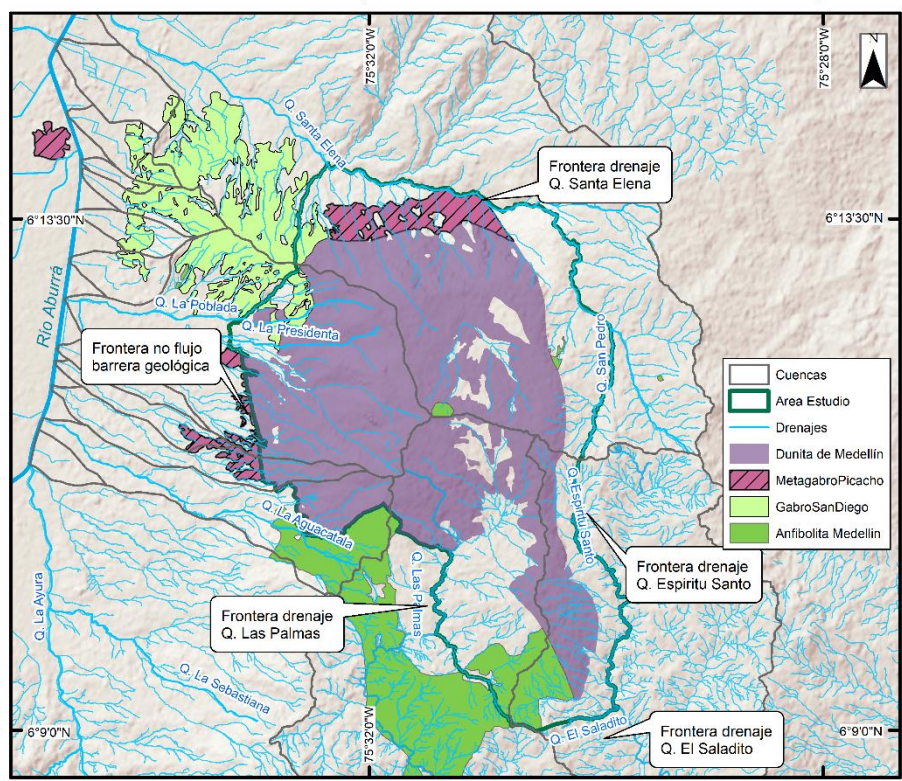


Figura 3. Fronteras del dominio de modelación.

BALANCE DE HUMEDAD EN EL SUELO SWB

El SWB fue desarrollado por el USGS en su versión 1.0 del año 2010. El modelo SWB es un código de uso libre escrito en Fortran 95, cabe destacar que ha sido ampliamente utilizado especialmente en Estados Unidos (Bradbury et al., 2010; Westenbroek et al., 2010; Mair et al., 2013; Engott et al., 2017; Westenbroek et al., 2018; Johnson et al., 2018, citados en Bastidas, 2019).

El modelo es determinístico, espacialmente distribuido y se aplica en pasos de tiempo diario. El SWB estima la recarga potencial de aguas subterráneas como el remanente del balance en un volumen de control definido donde la zona vadosa es conceptualizada como un conjunto de tanques con espesor variable. En esta investigación se utiliza una versión modificada de la ecuación de Westenbroek et al. (2010, citado en Bastidas, 2019) (Ec. 4), para determinar la humedad en el suelo y la evapotranspiración en cada paso de tiempo y en cada celda del dominio del modelo. Las bases teóricas detalladas de este modelo se encuentran en Dripps (2003) y Dripps y Bradbury (2007)

La evapotranspiración potencial se calcula por el método de Thornthwaite & Mather (1957), ya que esta metodología solo requiere como datos de entrada temperatura. Se calcula como se observa en la Ec. 1.

$$ETP = 1,6 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a \quad \text{Ec. 1}$$

Donde ETP es la evaporación potencial en cm/mes, T es la temperatura media mensual en °C, I es el índice calórico anual dado por (Ec. 2)

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1.514} \right) \quad \text{Ec. 2}$$

Y el exponente a esta dado en función de I mediante la siguiente ecuación (Ec. 3).

$$a = (675 * 10^{-9})I^3 - (771 * 10^{-7})I^2 + (179 * 10^{-4})I + 0,492 \quad \text{Ec. 3}$$

La representación en forma digital del área de estudio usa celdas de tamaño arbitrario que contienen información sobre las características del terreno y las variables hidrometeorológicas. Una vez dividida el área en celdas, el modelo aplica la ecuación de balance de humedad en el suelo en cada celda (Ec. 4), Bastidas, 2019:

$$RPD = (P + IF) - (Inp + ETR + ED) - \Delta H \quad \text{Ec. 4}$$

Donde, RPD es la recarga potencial directa, P es la precipitación, IF son los influjos desde otra celda, Inp es la intercepción en el follaje, ETR es la evapotranspiración Real, ED es la escorrentía superficial directa y ΔH son los cambios en el almacenamiento de humedad. Todas las variables están en milímetros por día [mm/d]. La escorrentía superficial (ED) que ingresa a una celda proveniente de las celdas vecinas (IF) y depende de las direcciones de flujo que son las que definen el recorrido que sigue la escorrentía durante su tránsito por el área de estudio. Además, en el ΔH se tiene en cuenta el agua producto de derretimiento de nieve, la cual para la zona de estudio no aplica, por lo que se dejará inhabilitado dicha estimación en el modelo SWB.

En el modelo SWB uno de los parámetros más sensibles corresponde al cálculo de escorrentía superficial, calculado en este modelo por el número de curva que difiere del cálculo que se realiza en el modelo de Schosinsky (2006), esta variable representa un factor de incertidumbre para el método (Cronshey et al., 1986). Los valores de recarga potencial diaria se agregan para obtener el valor de recarga potencial media multianual.

MÉTODO DE SCHOSINSKY

Se trata de un modelo agregado a escala mensual, desarrollado en 2006 por G. Schosinsky y aplicado en Costa Rica, país similar a Colombia por su ubicación en el trópico, por ello es elegido para aplicar en el área de estudio. Esta es la metodología oficial para cálculo de recarga en Costa Rica según el Reglamento de Metodologías Hidrogeológicas para la Evaluación del Recurso Hídrico y está programada en una hoja de cálculo en Excel de libre acceso.

El modelo se fundamenta en la ecuación de balance de masa al interior de una cuenca, es agregado y tiene la ventaja de requerir pocos parámetros. Para capturar la distribución espacial de la recarga, se identifican las zonas con características homogéneas tras realizar la superposición de las variables del terreno (pendiente, texturas del suelo, profundidad de raíces y cobertura) y para cada una de las posibles combinaciones de las variables mencionadas por zona se aplica el modelo, logrando así una variabilidad espacial en los valores de recarga.

Para el balance del suelo, en primera instancia se requiere la infiltración mensual, generada por la lluvia. Posteriormente, es necesario conocer la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM) del suelo, además de la evapotranspiración promedio de la cuenca y la capacidad de infiltración de los suelos. La ecuación que se resuelve en este modelo es la mostrada en la Ec. 5

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad \text{Ec. 5}$$

Donde, R_p es la recarga potencial mensual, P_i es la precipitación que infiltra, H_{Si} y H_{Sf} son la humedad del suelo al inicio y final del mes, respectivamente, y ETR es la evapotranspiración real. Todas las variables están en milímetros por mes [mm/mes].

El funcionamiento del modelo consiste en ingresar los valores de precipitación a la zona y determinar la cantidad de agua que se infiltra y se acumula en los poros del suelo para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima capacidad de agua que puede retener un suelo no saturado. Posteriormente, se cuantifica el proceso de evapotranspiración y, si la cantidad de infiltración es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y satisfacer la necesidad de evapotranspiración, el

excedente del agua que infiltra se percolará para recargar el acuífero (Schosinsky, 2006).

En el modelo influyen variables como la precipitación a escala mensual y su retención en el follaje, es decir, agua que precipita pero que nunca se infiltra debido a la retención que realiza la vegetación. El modelo considera un valor del 12% (Butler, 1957) de la precipitación para todas las coberturas, excepto para bosques densos donde la retención del follaje se considera del 20% (Lynsley et al., 1958). Por su parte, la infiltración es estimada a partir del coeficiente de infiltración desarrollado por Schosinsky y Losilla (2000), el cual es función de la cobertura, de la pendiente y de la permeabilidad del suelo saturado. La escorrentía se calcula como el excedente de la precipitación luego de extraer la retención en el follaje y la infiltración. La evapotranspiración es definida como la evaporación del suelo más la transpiración de las plantas, y será mayor mientras mayor sea la humedad en el suelo. Por lo anterior, en este modelo se asume que la evapotranspiración real será proporcional a la humedad del suelo, calculada como la diferencia de humedad entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM).

Finalmente, la humedad del suelo se calcula como la diferencia entre la infiltración y la evapotranspiración. Si el valor de HS es mayor que cero indica almacenamiento en la masa de suelo y la posibilidad de que haya recarga, pero si HS es negativo se concluye que la evapotranspiración es mayor que la infiltración, por lo cual hay disminución de la humedad del suelo y no habría recarga. En este modelo el parámetro más sensible corresponde al coeficiente de infiltración o de separación de flujos, que difiere del método SWB, que puede variar en la complejidad de su estimación, siendo dependientes de los suelos, coberturas terrestres y/o del estado de humedad en el suelo.

Los valores de recarga potencial mensual se agregan para obtener el valor de recarga potencial media multianual.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología seguida en este estudio se resume en la Figura 4.

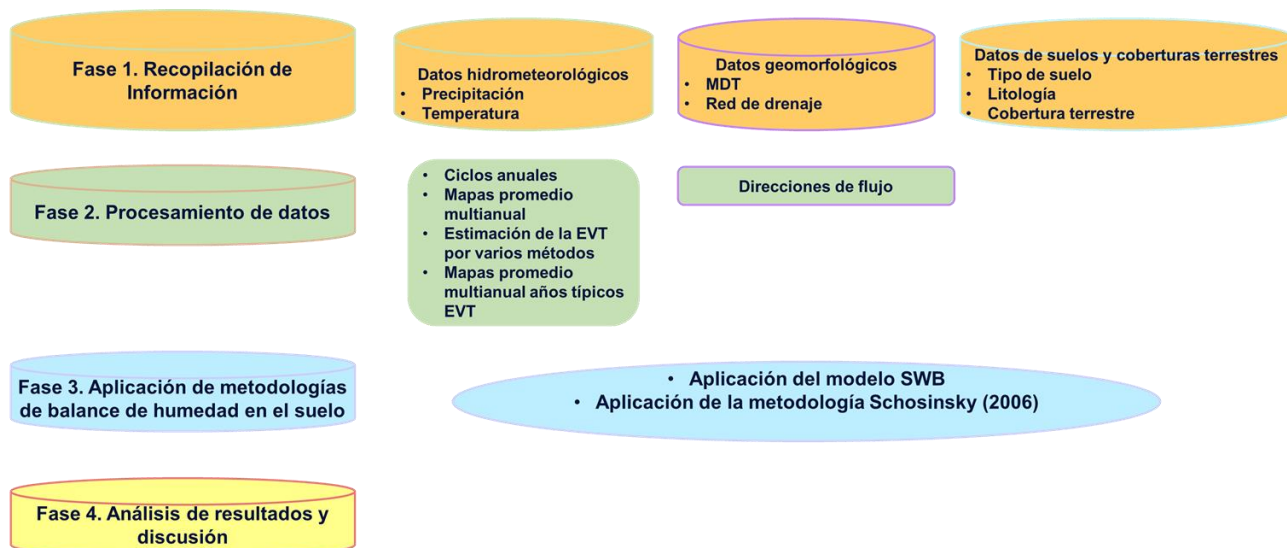


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología seguida en la determinación de recarga potencial por precipitación en la zona de estudio.

Para realizar la estimación de recarga según la metodología planteada, se requiere de datos geomorfológicos, hidrometeorológicos, de suelos y coberturas, como se observa en la Figura 4.

DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

La información hidrometeorológica necesaria fue descargada del aplicativo DHIME disponible en la web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y solicitada a Empresas Públicas de Medellín -EPM-, con resolución temporal a escala diaria y actualizada a diciembre de 2019, con el mayor registro posible que se remonta al año 1948 para algunas estaciones de precipitación. Se solicitaron y analizaron variables de precipitación total, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima.

Se obtuvieron datos diarios de precipitación de seis (6) estaciones disponibles en la zona operadas una (1) de ellas por el IDEAM y cinco (5) por EPM. Además, datos diarios de temperatura de una (1) estación operada por el IDEAM que se encuentra por fuera de la zona de influencia (Aeropuerto J.M. Córdoba), pero que tiene condiciones de elevación similares. Dichas series fueron procesadas para obtener el ciclo promedio anual de la precipitación y temperatura, y se obtuvo la distribución espacial promedio anual de la precipitación y de la temperatura.

Después de realizar el análisis de los registros de precipitación diaria en el periodo 1979-2019 de las seis estaciones se establecieron tres períodos de acuerdo con el índice Oceánico de El Niño (ONI) con condiciones hidrológicas diferentes: condición

normal (2013 – 2014), año seco-El Niño- (2015 – 2016) y año húmedo-La Niña- (2010 – 2011). En la

Tabla 1 se presentan las características generales de las estaciones hidrometeorológicas identificadas (PG: Pluviográfica, CO: Climatológica ordinaria, SP: Sinóptica principal) y en la Figura 5 su ubicación geográfica.

Tabla 1. Estaciones hidrometeorológicas con información empleada en la determinación de la recarga

Fuente	Código	Estación	Tipo	Coordenadas		Elevación (m.s.n.m.)	Periodo de registro	% datos faltantes
				Lat.	Long.			
EPM	27010930	AYURÁ	PG	6.16	-75.63	1770	1972-2019	0.43
EPM	23080230	LAS PALMAS	PG	6.15	-75.53	2495	1948-2019	0.65
EPM	27010340	MAZO	PG	6.26	-75.52	2455	1948-2019	0.71
EPM	23080240	VASCONIA	PG	6.20	-75.48	2510	1948-2019	0.53
EPM	2701045	VILLA HERMOSA	PG	6.24	-75.55	1680	1948-2019	0.43
IDEAM	23085270	TO J.M. CORDOVA	SP	6.17	-75.43	2157	1978-2019	0
IDEAM	27010810	SANTA ELENA	CO	6.20	-75.52	2250	1971-2019	1.22

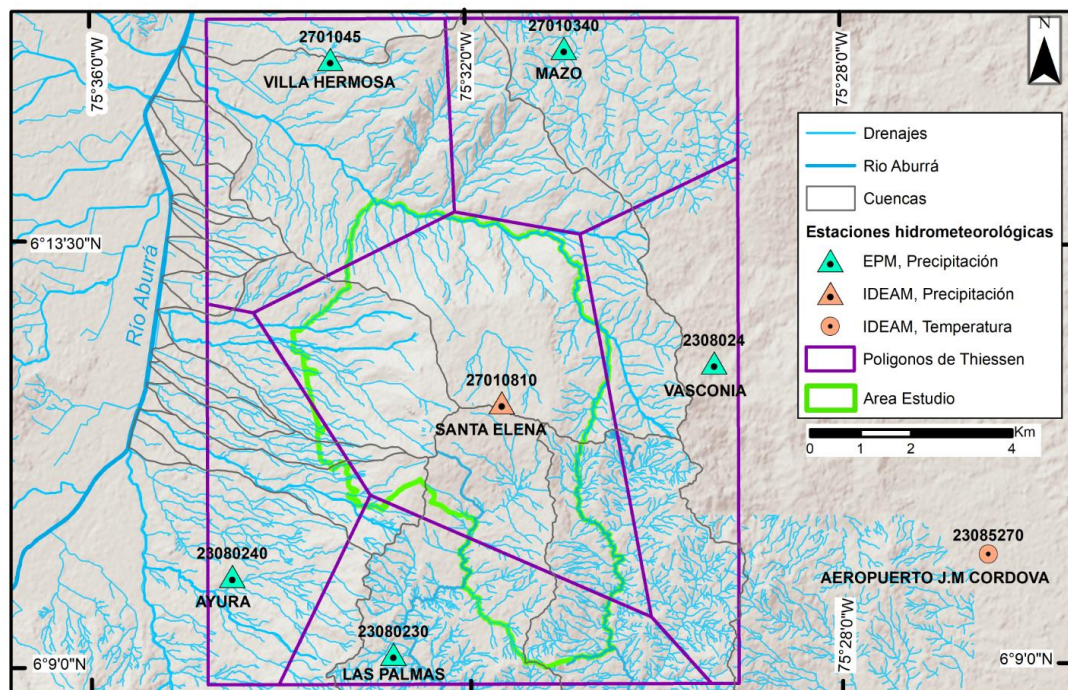


Figura 5. Distribución espacial de las estaciones de precipitación y temperatura disponibles. En color cian estaciones operadas por EPM, en color naranja estaciones operadas por IDEAM. Triángulos para estaciones de precipitación y círculo para estación de temperatura.

En los modelos de recarga se ingresaron los datos de precipitación y temperatura de manera puntual provenientes de información de la estación SANTA ELENA y AEROPUERTO J.M. CORDOVA, respectivamente, para minimizar la incertidumbre ligada a la interpolación de estas variables. Esta decisión se tomó ya que según polígonos de Thiessen la estación SANTA ELENA cubre más del 85% de la zona y, además, es la única estación de precipitación dentro de la cuenca de estudio (ver Figura 5). Dentro del área no se cuenta con estaciones de medición de temperatura y/o evaporación, por lo tanto, dado la ubicación (cercanía y altitud) de la estación AEROPUERTO J.M. CORDOVA, se tomaron los datos de temperatura máxima y mínima diaria de esta estación.

DATOS GEOMORFOLÓGICOS

Modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés Digital Elevation Model) y red de drenaje

Los datos geomorfológicos empleados corresponden al modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) y la red de drenaje detallada para la zona de estudio. Para esta investigación se obtuvo el DEM del satélite ALOS, sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) (Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (ASF DAAC), 2015), con una resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m de tamaño de píxel. Dicho DEM ha sido corregido para Antioquia por la Gobernación de Antioquia. La red de drenaje utilizada corresponde a la de las planchas de área urbana 236, 242, 252, 262 a escala 1:2.000 y del área rural 147IIIb1w, 147IIIb1x, 147IIIb1y y 147IIIb1z a escala 1:5.000 del proyecto Sistema de Información Geográfica de Medellín y sus Alrededores -SIGMA- (ver Figura 6).

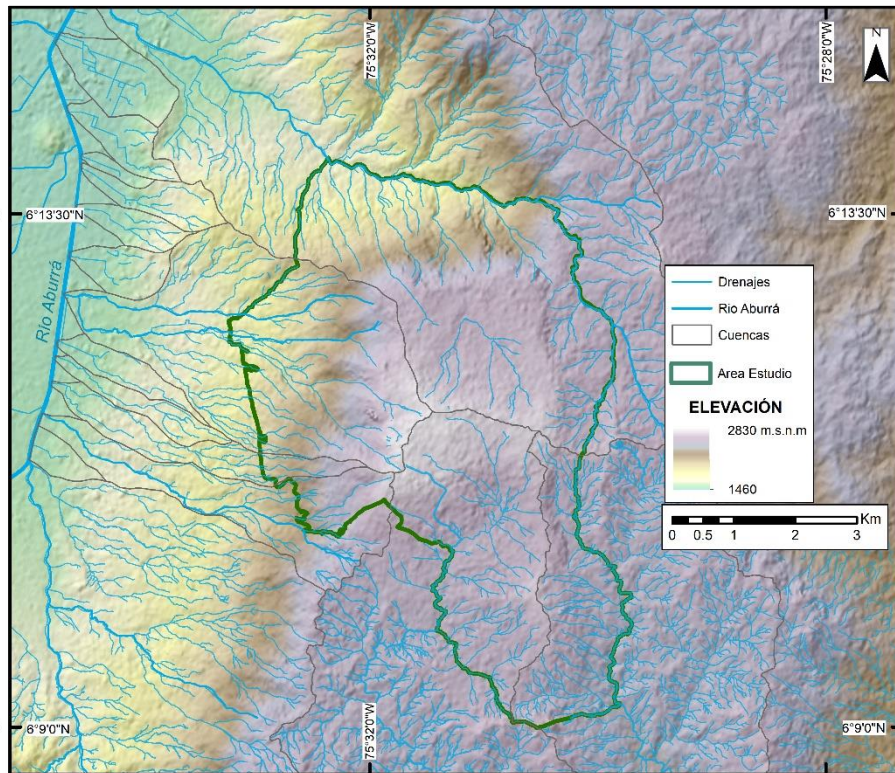


Figura 6. DEM 12.5 x12.5 empleado en el estudio y red de drenajes del proyecto Sistema de Información Geográfica de Medellín y sus Alrededores -SIGMA-.

Direcciones de flujo

A partir del DEM y la red de drenaje detallada para la zona de estudio, se obtuvieron las direcciones de flujo superficial y el trazado de cuencas hidrográficas (Figura 7). Para corregir posibles sumideros en el DEM y establecer direcciones de flujo y trazado de cuencas se emplearon herramientas SIG programadas ARCGIS versión 10.5.

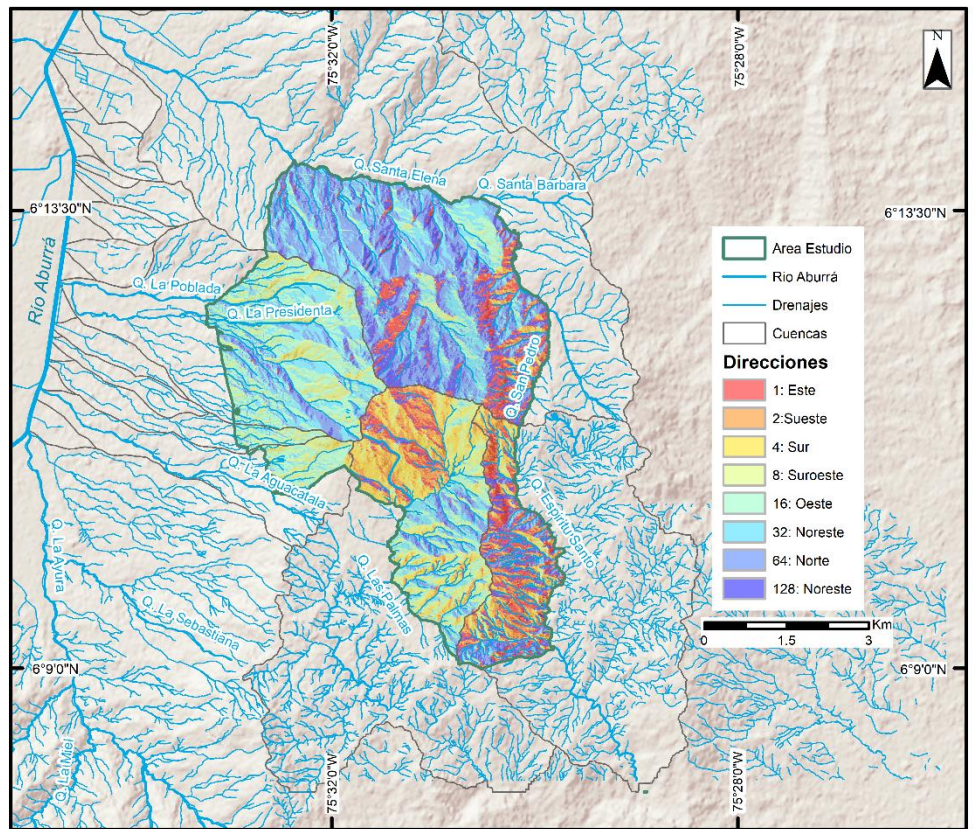


Figura 7. Direcciones de flujo del área de estudio.

INFORMACIÓN DE SUELOS, COBERTURAS TERRESTRES Y GEOLOGÍA

Para este estudio se caracterizaron los suelos de la zona mediante información documental adquirida en los estudios Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (Consortio Microzonificación Sísmica & AMVA, 2007), Plan de Ordenación de Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Aburrá (Compañía de Proyectos Ambientales E ingeniería (CPA Ingeniería S.A.S) et al., 2018) y el POMCA del río Negro (Consortio POMCAS Oriente Antioqueño, et al., 2018), trabajos con información de suelos y coberturas a escala 1:25.000, y de geología a escala 1:10.000. En los estudios mencionados, para cada unidad cartográfica de suelo (Figura 8) se presentan perfiles modales levantados en campo con información granulométrica y de clasificación de su textura a diferentes profundidades. A partir de esta información, en esta investigación, se aproximaron las propiedades hidráulicas de interés del suelo como permeabilidad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

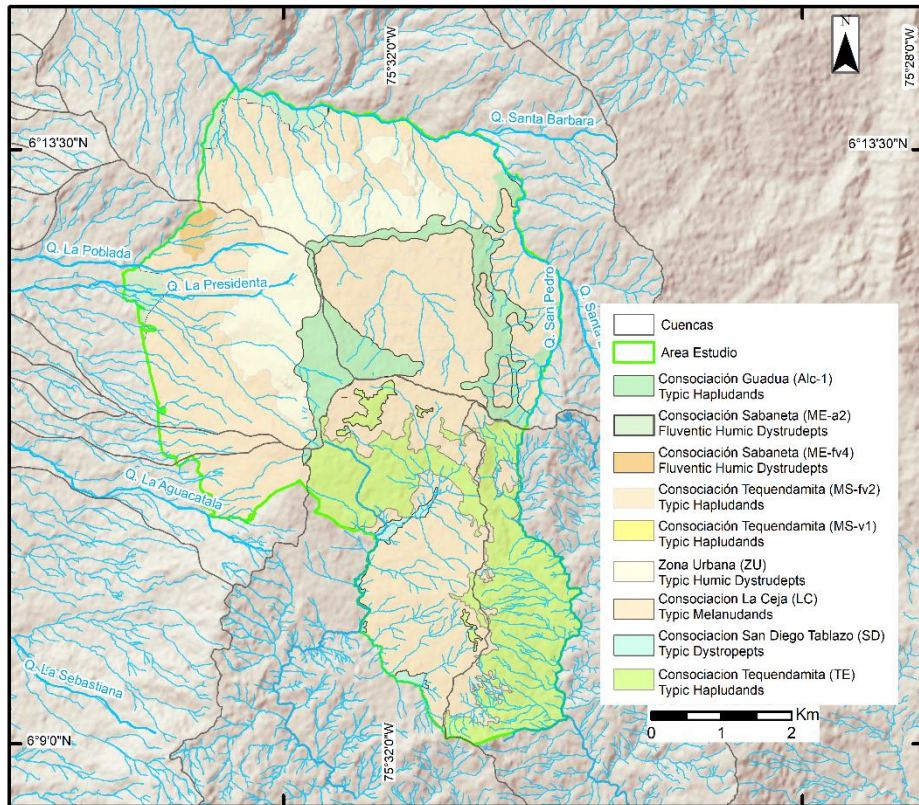


Figura 8. Unidades cartográficas de suelo abstraídas de los POMCAS de los ríos Aburrá y Negro. Nomenclatura según Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC-. Fuente: Modificado de Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, et al., 2018 y CPA Ingeniería et al., 2018.

A partir de los estudios mencionados, también se obtuvo la distribución espacial de las coberturas terrestres en la zona de estudio, las cuales se muestran en la Figura 9 y se describen en la Tabla 2. Dichas categorías fueron definidas según la metodología *Corine Land Cover* adaptada para Colombia, a nivel de detalle 3 escala 1:25.000 (IDEAM, 2010).

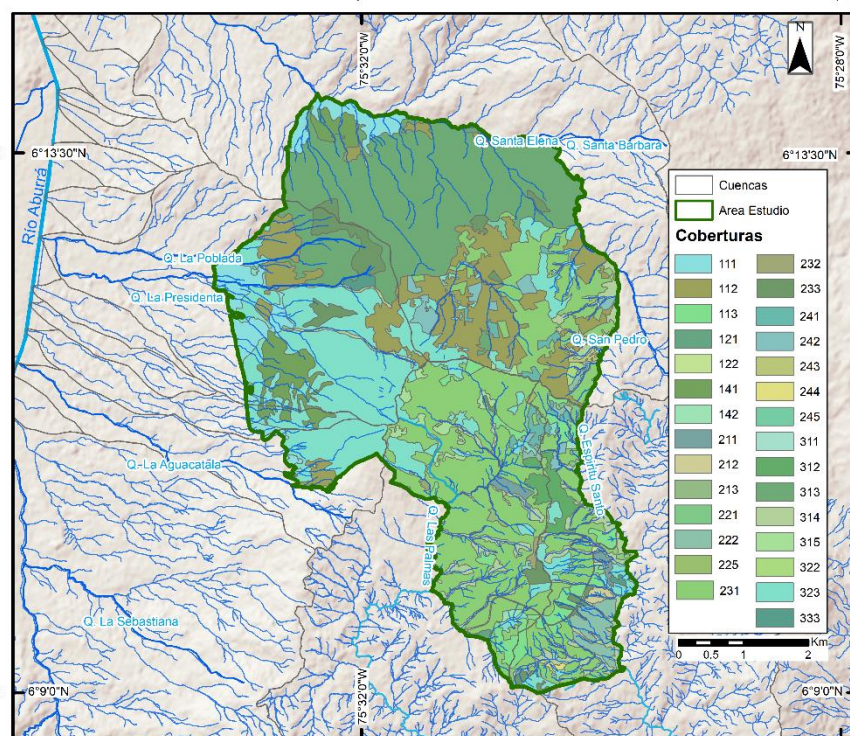


Figura 9. Coberturas vegetales de la zona de estudio. Adaptado de CPA Ingeniería S.A.S et al.,2018) y (Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño et al., 2018). Nomenclatura según IDEAM (2010) para nivel 3.

Tabla 2. Descripción de las coberturas del área en estudio definidas según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.

Código	Descripción	Tipo de cobertura	Área (ha)	% que ocupa en la zona
1.1.1	Tejido urbano continuo		138.2	3.9
1.1.2	Tejido urbano discontinuo		386.9	10.8
1.1.3	Tejido urbano discontinuo		90.6	2.5
1.2.1	Zonas industrias y comerciales	Territorios artificializados	4.3	0.1
1.2.2	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		6.6	0.2
1.4.1	Zonas verdes urbanas		77.8	2.2
1.4.2	Instalaciones recreativas		5.2	0.1
2.1.1	Otros cultivos transitorios		16.3	0.5
2.1.2	Cereales		6.3	0.2
2.1.3	Oleaginosas y leguminosas		3.1	0.1
2.2.1	Cultivos permanentes herbáceos	Territorios agrícolas	6.2	0.2
2.2.2	Cultivos permanentes arbustivos		50.4	1.4
2.2.5	Cultivos confinados		2.9	0.1
2.3.1	Pastos limpios		875.9	24.5

Código	Descripción	Tipo de cobertura	Área (ha)	% que ocupa en la zona
2.3.2	Pastos arbolados		6.2	0.2
2.3.3	Pastos enmalezados		97.0	2.7
2.4.1	Mosaico de cultivos		32.6	0.9
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos		37.9	1.1
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		4.3	0.1
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales		2.9	0.1
2.4.5	Mosaico de cultivos con espacios naturales		4.2	0.1
3.1.1	Bosque denso		0.3	0.0
3.1.2	Bosque abierto		41.7	1.2
3.1.3	Bosque fragmentado		749.1	21.0
3.1.4	Bosque de galería y ripario		204.7	5.7
3.1.5	Plantación forestal	Bosques y área seminaturales	27.1	0.8
3.2.2	Arbustal		5.1	0.1
3.2.3	Vegetación secundaria o transición		676.4	18.9
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas		10.9	0.3

A partir de la información recopilada de los perfiles de suelo en la zona de estudio, se utilizó la clasificación granulométrica definida en porcentaje de arenas, limos y arcillas, y se utilizó el software SWC (Soil Water Characteristics), de Saxton y Rawls (2006), para cuantificar los parámetros relacionados con el agua en el suelo como conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitez y para definir las texturas a partir de la granulometría (Figura 10).

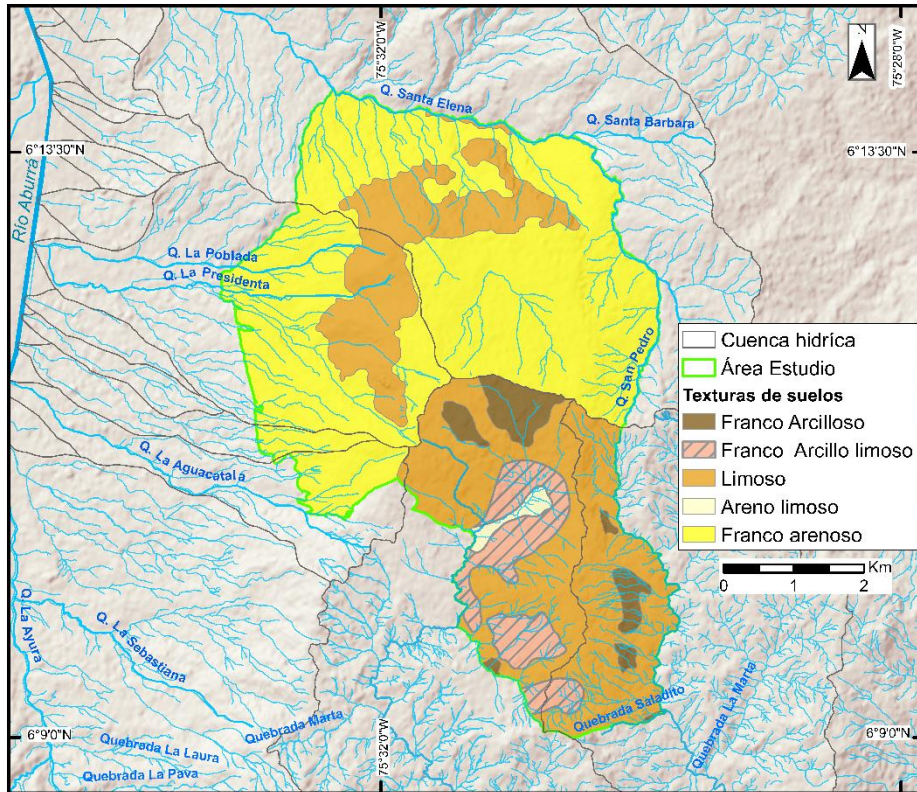


Figura 10. Texturas del suelo en la zona de estudio. *Elaboración propia.*

A partir del mapa de textura de los suelos, se obtuvo la clasificación de los suelos por grupo hidrológico, clasificación propuesta por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS por sus siglas en inglés) (Westenbroek et al., 2010) en función de la capacidad de infiltración de los suelos. La NRCS propone cuatro grupos hidrológicos A, B, C y D siendo el grupo A el de mayor capacidad de infiltración y que se relaciona con las texturas más gruesas y el grupo D el de menor capacidad de infiltración y que se relaciona con las texturas más finas (Figura 11). En la zona de estudio no se identificaron texturas tan finas que puedan clasificarse en el grupo D.

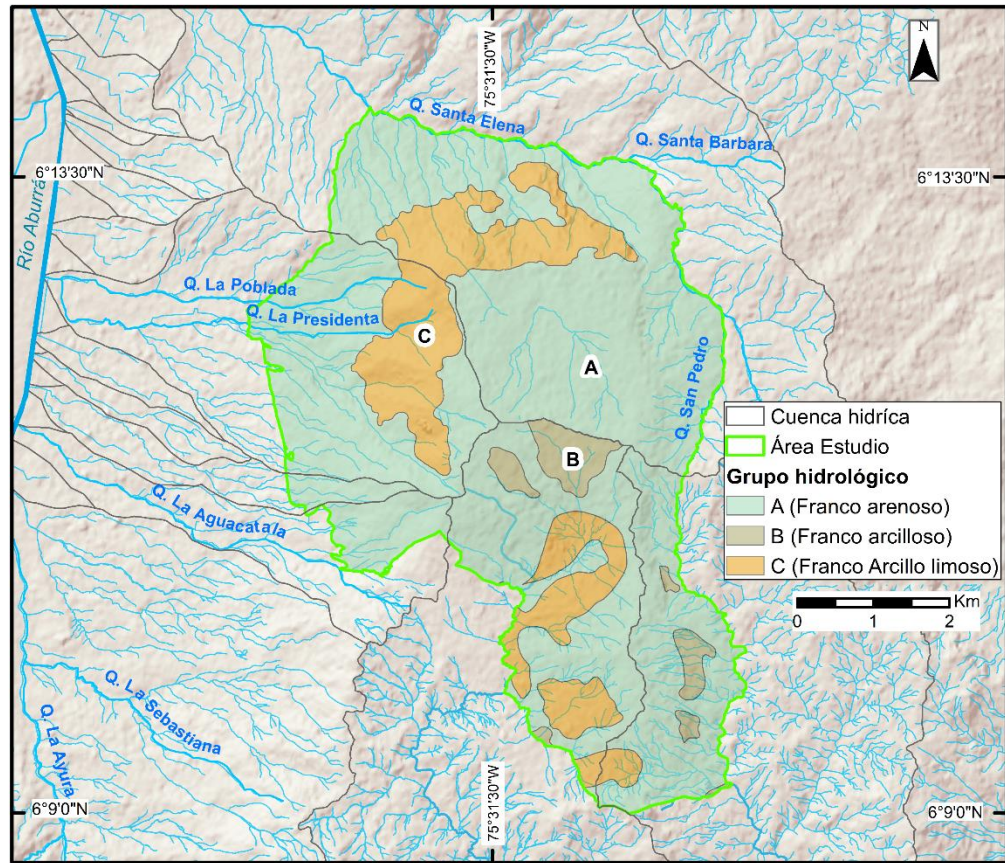


Figura 11. Grupo hidrológico del suelo en la zona de estudio de acuerdo con lo planteado por la NRCS. Fuente: Elaboración propia.

SWB

La ocurrencia conjunta de un tipo de suelos específico y de un tipo de coberturas específica, define diversos parámetros del modelo SWB, como el Número de Curva (CN), la tasa máxima de recarga (R_{max}), la profundidad de las raíces (PR), la capacidad de campo (CC) que solo depende de las propiedades del suelo y el umbral de interceptación en el follaje (α_l) (Bastidas, 2019). En la Tabla 3 se muestra la configuración general del modelo SWB para la zona de estudio.

Tabla 3. Configuración general del modelo SWB

Sistema de coordenadas	WGS84
Dominio del modelo	W: -75.5538 N: 6.149 W: -75.495 N: 6.233
Dimensiones	Número de filas: 923 Número de columnas: 651 Tamaño de celda: 10 m
Paso de tiempo	Diario

Precipitación puntual o distribuida	Puntual (Estación Santa Elena)
Temperatura puntual o distribuida	Puntual (Estación Aeropuerto J.M. Córdova)
Temporada húmeda	Bimodal: Abril - Mayo; Octubre – Noviembre
Parámetro de abstracción inicial*	0.05
Método de evapotranspiración	Thornthwaite-Mather (1957) Estimada a partir de datos de temperatura puntuales de la estación AEROPUERTO J.M. CORDOVA
Capacidad de almacenamiento en el suelo	Profundidad de las raíces, calculada según Bradbury y Dripps, 2010
Humedad inicial en el suelo	100% de capacidad de campo
Periodo de simulación	Enero 2009 - diciembre 2018
Años de análisis	Año Húmedo (Nov 2010-Oct 2011), Año Seco (Nov 2015-Oct 2016), Año Normal (Nov 2013-Oct 2014)
Escala de salidas	Mensual y anual
Variables de salida	Recarga potencial directa, evapotranspiración real, humedad en el suelo, escorrentía directa, intercepción
*Eliminación de agua de cualquier fuente, ya sea permanentemente o de forma temporal. Es definido por el usuario y típicamente toma valores de 0.2, aunque para simulaciones diarias y continuas Woodward et al. (2003, citado en Bastidas, 2019), recomiendan el uso de un factor de 0.05.	

El periodo de inicialización del modelo corresponde al año 2009, de forma que la influencia de las condiciones iniciales supuestas de humedad inicial pueda ser reducida en los resultados definitivos del periodo de análisis (enero 2010 a diciembre de 2018). Dicho periodo se definió con el objetivo de cubrir las tres temporalidades contrastantes: año húmedo, seco y normal. Adicionalmente, el modelo permite correr todos los años de una vez y, posteriormente, escoger el umbral de evaluación (años específicos), de manera que no es necesario hacer el proceso 3 veces (Bastidas, 2019). Los periodos de análisis inician en el mes de noviembre dado que, según el ciclo anual de lluvias, en el mes anterior (octubre) se presenta la máxima precipitación, lo que permite suponer que el suelo en noviembre está completamente saturado (a capacidad máxima de almacenamiento). Este supuesto se realiza porque el modelo de Schosinsky lo requiere para luego realizar comparaciones entre los dos métodos.

SCHOSINSKY

A continuación, en la Tabla 4 se muestra la configuración del modelo y en la

Tabla 5 se presenta en detalle la metodología seguida donde inicialmente se parte de que, a partir de los registros de precipitación, se extrae el componente de retención en el follaje de cada mes.

Tabla 4. Configuración general del modelo Schosinsky

Variables de entrada	Series de evapotranspiración potencial y precipitación a escala mensual. Permeabilidad de la capa superficial del suelo (fc) en mm/día. Fracción de lluvia que infiltra por efecto de la pendiente (Kp) según la clasificación de Schosinsky & Losilla, 2000. Fracción de lluvia que infiltra por efecto de la cobertura (Kv) según la clasificación de Schosinsky & Losilla, 2000. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PMP) de la zona homogénea [%]. Profundidad de las raíces presentes en la zona homogénea [mm]. Coeficiente de retención en el follaje, que para esta zona predomina Cfo = 0,12 porque no predominan zonas de bosques densos.
Años de análisis	Año Húmedo (Nov 2010-Oct 2011), Año Seco (Nov 2015-Oct 2016), Año Normal (Nov 2013-Oct 2014)
Paso de tiempo	Mensual
Precipitación puntual o distribuida	Puntual (Estación Santa Elena)
Evapotranspiración potencial mensual	Calculada por Thornthwaite-Mather (1957) Estimada a partir de datos de temperatura de la estación AEROPUERTO J.M. CORDOVA

Tabla 5. Metodología detallada Schosinsky

Ecuación	Variables	Descripción
$C_i = Kp + Kv + Kfc$ Coefficiente de infiltración % de la precipitación que se infiltra luego de restar la captación en el follaje	Kp representa la fracción de lluvia que se infiltra por efecto de la pendiente Kv fracción de lluvia que se infiltra por efecto de la cobertura Kfc coeficiente de infiltración asociado a la textura del suelo que es función de la permeabilidad superficial.	La clasificación de los valores de Kp, Kv y Kfc está dada por el modelo de Schosinsky & Losilla, 2000). Este coeficiente Ci toma valores entre 0 y 1

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

Infiltración mensual

$$Esc = P - P_i - Ret$$

Escorrentía

$$C1 = \frac{(HS_i - PM + P_i)}{(CC - PM)}$$

$$0 \leq C1 \leq 1$$

Coficiente de humedad

$$ETPR = [(C1 + C2)/2] \times ETP$$

Evapotranspiración potencial real

$$HD = HS_i - PM + P_i$$

Humedad disponible

$$HS_f = HS_i - ETR + P_i$$

Humedad final

$$R = P_i + HS_i - HS_f - ETR$$

Recarga

P_i es la precipitación que infiltra

P es la precipitación del mes

Ret retención en el follaje.

P es la precipitación del mes

P_i es la precipitación que infiltra

Ret retención en el follaje.

HS_i humedad inicial del mes (Para mes inicial Hsi=CC)

PM punto de marchitez,

CC es la capacidad de campo

P_i infiltración

ETP: registro de evapotranspiración potencial del mes

Se calculan los coeficientes C1 (humedad inicial del mes) y C2 (humedad final del mes)

Para establecer si la evapotranspiración requerida ocurre.

Si ETPR > HD= ETR=HD,

Si ETPR < HD= ETR=ETPR

Esta humedad final de cada mes será la humedad inicial del mes siguiente

RESULTADOS

INFORMACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Precipitación

A partir de las seis series de precipitación obtenidas para la zona de estudio, se observa un comportamiento bimodal presentando dos periodos de bajas lluvias entre diciembre y enero (107.34 mm en promedio) y julio y agosto (153.05 mm en promedio) y otros dos períodos de altas lluvias en mayo (248.4 mm en promedio) y octubre (271.4 mm en promedio), con periodos de transición en febrero y

septiembre. Se observa una notoria diferencia entre la precipitación que se registra en la estación SANTA ELENA (la de mayor altitud) con respecto a las otras cinco estaciones; esto debido a la regionalización de la precipitación producto de los procesos generadores de lluvia en Colombia (Poveda, 2004) En la Figura 12 se observan las anomalías estandarizadas de la precipitación mensual, las cuales permiten corroborar el ciclo bimodal de la zona de estudio, en donde los meses más lluviosos presentan una anomalía positiva y, por el contrario, valores negativos se presentan para los meses de menor precipitación en todas las estaciones.

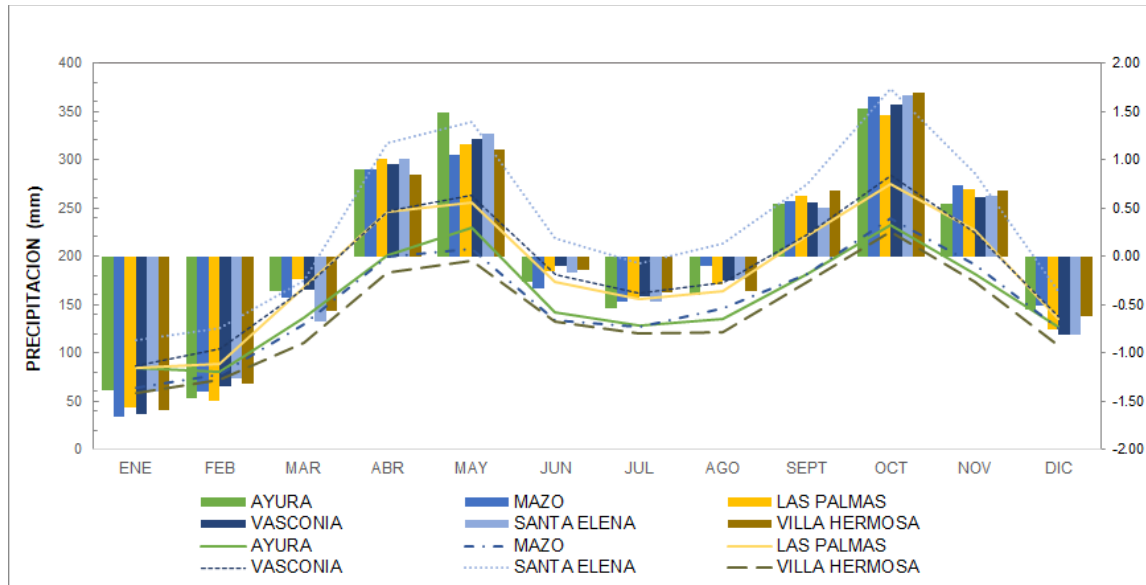


Figura 12. Ciclo promedio multianual y anomalías de precipitación para las estaciones en la zona de estudio.

Temperatura

La temperatura media anual de la zona de estudio es de 17.62° con base en los datos de la estación AEROPUERTO JM CORDOVA. Un ciclo anual de temperatura se presenta en la Figura 13.

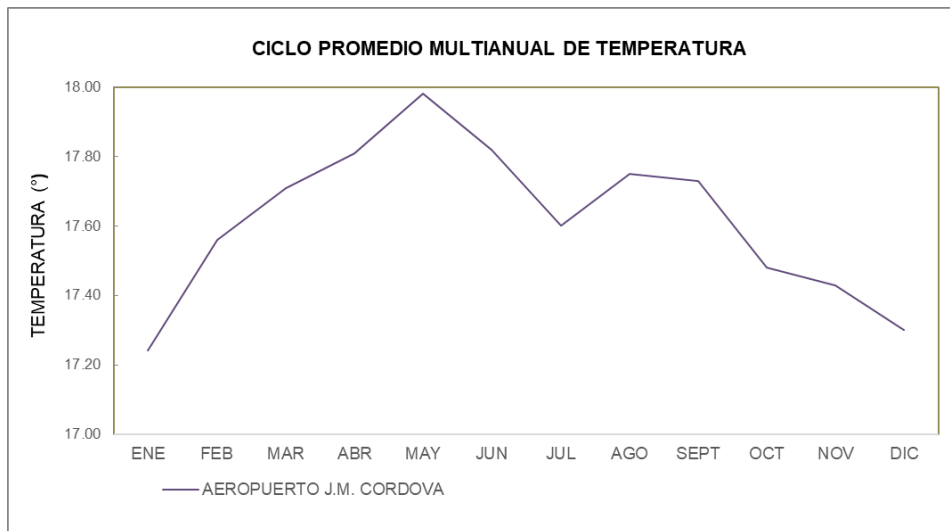


Figura 13. Ciclo promedio multianual de temperatura

Evapotranspiración

Dado que los datos de temperatura no se encuentran distribuidos, según la metodología planteada se presenta a continuación las magnitudes de EVP para los años de análisis

Tabla 6. Valores de EVP por Thornthwaite & Mather (1957)

CONDICIÓN HIDROLÓGICA	EVP (mm/año)
Normal (2013-2014)	770.2
El Niño- Seco (2015-2016)	799.9
La Niña- Húmedo (2010-2011)	756.1

SWB

En la Figura 14 se presenta la distribución de la recarga potencial en la zona de estudio empleando el método SWB y en la Tabla 7 se muestra los resultados de recarga para los tres periodos de análisis.

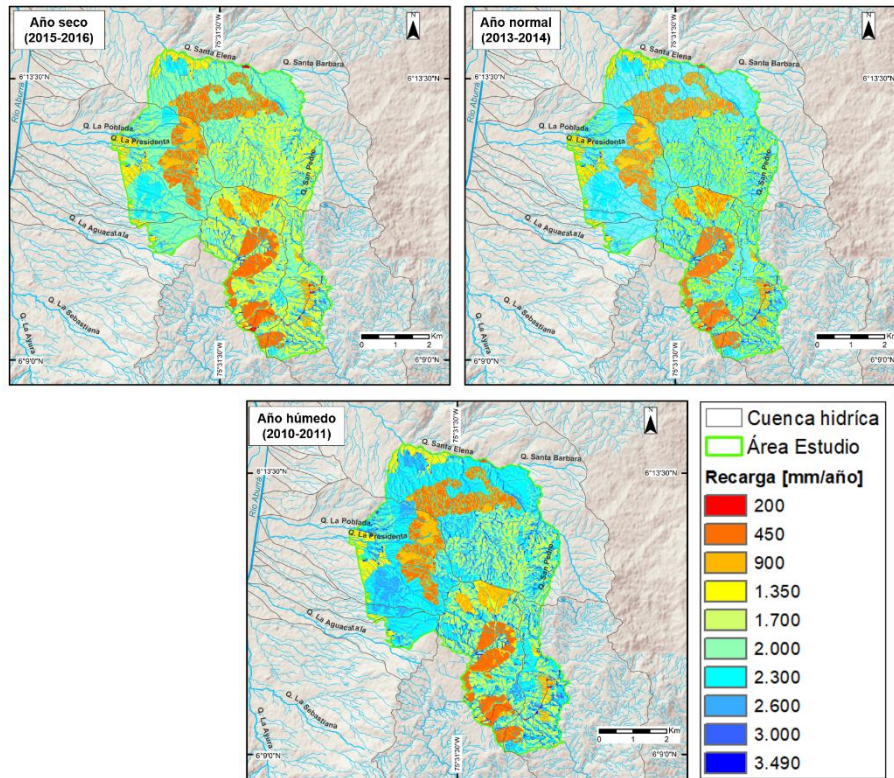


Figura 14. Recarga potencial por precipitación en mm/año, metodología SWB.

Los resultados muestran que la recarga potencial en la zona de análisis de la unidad Dunita de Medellín varía entre 240 mm/año, en aquellas zonas donde la cobertura del suelo reduce la infiltración de agua o donde las condiciones de la disponibilidad de lluvia son bajas para la zona de estudio, hasta 3490 mm/año para año húmedo donde la recarga es igual a la precipitación máxima en las cuencas de análisis.

En condiciones secas (año Niño), la media de recarga potencial es de 1119 mm/año, que corresponde al 48.3% de la precipitación; en condiciones normales la media es de 1403 mm/año, que corresponde al 53.1% de la precipitación; y en condiciones húmedas la media es 2077 mm/año que corresponde al 59.5% de la precipitación, para la región de análisis.

SCHOSINSKY (2006)

Se obtuvieron mapas de recarga potencial directa anual para cada una de las tres temporalidades contrastantes. En la Figura 15 se presenta la distribución espacial de la recarga potencial por precipitación, expresada en mm/año, y en la Tabla 7 se muestra el resumen de la recarga para los tres periodos de análisis.

Los resultados muestran que la recarga potencial en la zona de análisis de la unidad Dunita de Medellín varía entre 0 mm/año, en aquellas zonas donde la cobertura del suelo no permite la infiltración de agua o donde las condiciones de la disponibilidad de lluvia son las más bajas para la zona de estudio, hasta valores de 2315 mm/año para año húmedo.

En condiciones secas la media de recarga potencial es de 612.7 mm/año, que corresponde al 26.6% de la precipitación; en condiciones normales la media es de 774.6 mm/año, que corresponde al 29.6 % de la precipitación; y en condiciones húmedas la media es 1213.7 mm/año que corresponde al 34.8 % de la precipitación, para la región de análisis.

La variabilidad espacial muestra que las zonas de mayor recarga corresponden con la zona media del área de simulación, y parte de la zona suroeste, donde las unidades de suelo presentan una textura predominantemente franco-arenosa y se presenta una cobertura dominada por bosques, con baja intervención antrópica. Los valores de recarga más bajos (0 mm/año) corresponde aquellas zonas con coberturas urbanas y donde la pendiente del terreno es alta (>7%); condiciones que no favorecen la infiltración.

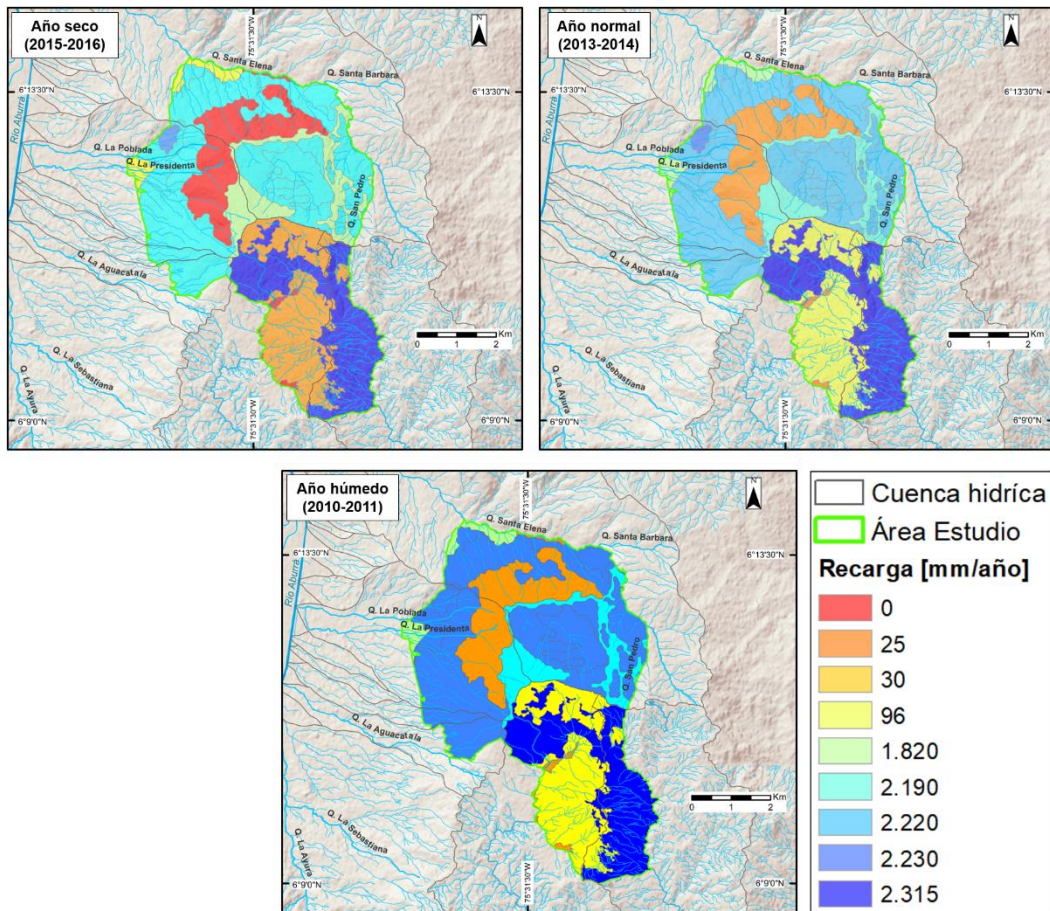


Figura 15. Recarga potencial por precipitación en mm/año, metodología Schosinsky (2006)

En la Tabla 7 se presenta el resumen de la recarga potencial por precipitación para la zona de estudio obtenida por los métodos aplicados y la relación con la precipitación media para las condiciones climáticas típicas.

Tabla 7. Resumen de la recarga potencial por precipitación (R) y relación con la precipitación (P)

Condición	Periodo	P (mm/año)	SWB		Schosinsky	
			R (mm/año)	R/P (%)	R (mm/año)	R/P (%)
Seco	Nov 2015 - Oct 2016	2306	1114	48.3	612.7	26.6
Normal	Nov 2013 - Oct 2014	2620	1392	53.1	774.6	29.6
Húmedo	Nov 2010 - Oct 2011	3490	2077	59.5	1213.7	34.8
Promedio		2819	1528	54.2	867	30.8

DISCUSIÓN

Las metodologías empleadas en esta investigación para la obtención de la recarga potencial por precipitación para la zona sur de la Dunita de Medellín (unidad

hidrogeológica A3 del sistema acuífero del Valle de Aburrá), permiten una aproximación al comportamiento espacio temporal de la recarga de aguas subterráneas, obteniéndose valores de recarga que oscilan entre el 60% de la precipitación en condiciones húmedas y el 48% de la precipitación en condiciones secas en el periodo analizado 2009-2019 por el método SWB. Por Schosinsky para año húmedo 35% de la precipitación y 27% para año seco.

A partir de la distribución espacial de recarga potencial mostrada es posible identificar que las zonas de mayor acumulación vienen dadas por la concentración de la precipitación en las áreas de mayor altura y las texturas del suelo franco arenosas presentes en la región de estudio. Adicionalmente, se puede ver que, en las regiones con coberturas urbanas, la recarga se reduce considerablemente, ya que son zonas que no permiten la infiltración para dicho efecto; estas zonas están concentradas en la parte noroeste del polígono de estudio.

Al comparar los resultados de magnitud de recarga por precipitación obtenidos por el modelo SWB con los obtenidos con la metodología de Schosinsky se tiene que esta última subestima los campos de recarga en un 20% en promedio para las condiciones climáticas evaluadas, lo que puede explicarse por la escala de análisis de este método que es mensual, lo que ratifica el hecho de que la recarga es un proceso que se presenta principalmente a escala temporal de eventos que no se ven reflejados en los registros mensuales (Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2002; Wittenberg et al., 2019). Sin embargo, dado el alto desconocimiento hidrogeológico que se tiene en la Dunita de Medellín, los resultados promedios obtenidos por ambas metodologías se consideran similares y válidos para una línea base. En la zona no existe información primaria que permita corroborar los valores de recarga y decidir cuál de los métodos representa mejor las condiciones de la zona.

La variabilidad espacio temporal de la recarga potencial de aguas subterráneas en ambos métodos visibiliza la fuerte relación con la disponibilidad de la lluvia, la textura de los suelos y el tipo de coberturas en ambos métodos.

La unidad A3- Dunita de Medellín muestra una tasa de renovación del recurso de un rango de 48% - 60% de la precipitación, dado que, según Custodio (1997) y Comisión Docente del Centro Internacional de Hidrología Subterránea (CoDo CIHS) (2009) la recarga total de aguas subterráneas (en escala anual) es igual a los recursos anuales renovables (RAR) de un acuífero, lo que ratifica la importancia de esta unidad acuífera como zona de recarga del SAVA.

La incertidumbre en la estimación de recarga potencial por las metodologías aquí planteadas está asociada principalmente a la escorrentía superficial directa. En este estudio la escorrentía superficial no fue calibrada, dado que no se cuenta con registros históricos de medición de caudal dentro de las cuencas que delimitan el área de interés. Dada la importancia de esta variable en el balance, diversos enfoques de calibración de los modelos de balance de humedad en el suelo están

basados en su ajuste para representar los valores observados de esta variable (Ruiz et al., 2010; Mair et al., 2013; Yenehun et al., 2017 en Bastidas, 2019).

Se destaca que la recarga potencial se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon et al., 2002; Rushton, 1979), por lo tanto, esta estimación no cuantifica el valor real de recarga que se obtiene únicamente con mediciones directas de niveles piezométricos (Vélez & Rhenals, 2008).

Los altos porcentajes de recarga con relación a la precipitación (60% R/P por SWB) pueden explicarse por la presencia del paisaje pseudokárstico que se presentan en la zona, donde se da pérdida parcial o total del drenaje superficial a través de sitios con geoformas de colapso (dolinas, ponores) y puntos con surgencia de agua. Además, de la presencia de cenizas volcánicas cubriendo la Dunita. Esta capa de ceniza es de extrema importancia hidrogeológica ya que permite la infiltración y acumulación de la lluvia, actuando como una 'esponja', permitiendo luego su liberación lenta a los drenajes del altiplano, así como su paso lento hacia el suelo que la subyace para posteriormente ser liberada hacia las fracturas presentes en la roca (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011). Estas características reducen que el agua lluvia escurra de manera superficial y favorecen que la precipitación se infiltre rápidamente en el terreno, facilitando con ello la recarga al medio subterráneo.

Como se discutió en el artículo sobre el análisis hidroestructural de la Dunita de Medellín (capítulo 1 del proyecto de grado) este estudio permite evidenciar la importancia de la unidad A3-Dunita de Medellín como zona de recarga para el SAVA. En ese artículo se planteó que para la zona en estudio se tienen direcciones predominantes del flujo de agua subterránea en sentido WNW y NE-SE, demostrando que existe una relación entre el agua que se recarga en el área de interés y la unidad hidrogeológica A1 donde se presenta la descarga. Los resultados de la cuantificación de la recarga permiten establecer que en el altiplano de Santa Elena se encuentran importantes volúmenes de agua subterránea (48-60% de la precipitación se convierte en recarga potencial) que podrían alimentar los acuíferos del fondo del Valle.

Los aportes de este estudio al conocimiento hidrogeológico de la Dunita de Medellín permiten visibilizar la importancia de esta unidad al momento de reglamentar las medidas de manejo y protección de zonas de recarga del SAVA por parte de la autoridad ambiental. Con los resultados globales de la investigación hidrogeológica en la Dunita de Medellín se tiene que en la parte central del área de estudio donde se concentran las geoformas de dolinas predomina la recarga de agua subterránea, que luego de alcanzar el medio subterráneo el agua fluirá por las fracturas de la roca con predominio en la dirección WNW y NE-SE llegando al fondo del Valle.

CONCLUSIONES

La magnitud y distribución espacio temporal de la recarga potencial por precipitación en la unidad A3-Dunita de Medellín se realizó bajo un enfoque de balance de humedad del suelo empleando dos metodologías (SWB y Schosinsky) cuyo principio es el mismo (entradas-salidas) pero el desarrollo operacional varía, incidiendo notablemente en los resultados finales. Se encontró que la recarga promedio es del orden de 1528 mm/año (54% de la precipitación) por SWB y 867 mm/año por Schosinsky (31 % de la precipitación), una diferencia de un 20% entre un método y otro. Schosinsky subestima los campos de recarga potencial ya que la escala de análisis es mensual y la del SWB es diaria y según varios autores la recarga es un proceso que se da a escala de eventos.

En ambas metodologías la variación espacial de la recarga permite concluir que la zona con mayores valores está concentrada en la parte central, el altiplano de Santa Elena, donde además se dan las coberturas tipo bosque bajo, los suelos franco-arenosos y las pendientes suaves (%1-2%) y la mayor presencia de geoformas kársticas. Las zonas con los menores valores de recarga se dan hacia parte noroeste donde las coberturas son de tipo urbano lo que reduce la infiltración de agua.

Como futuros trabajos en la zona de estudio está la calibración de esta estimación con datos de escorrentía superficial medidos puntualmente en las cuencas que delimitan la región de interés, además de construcción de pozos de observación para realizar mediciones directas de niveles freáticos y/o piezométricos que permitan determinar la recarga real de aguas subterráneas.

Una de las limitaciones de estos métodos de balance hídrico es que no tiene en cuenta la profundidad de niveles piezométricos y, por tal razón, la tasa de recarga estimada por estos métodos realmente está siendo sobreestimada, pues no se sabe cuánto tiempo va a pasar para que el agua disponible para recarga realmente llegue al acuífero. Además, las magnitudes de recarga calculadas en esta investigación corresponden a valores potenciales de ser convertidos en recarga real en el medio subterráneo.

Los valores encontrados son magnitudes de referencia que permiten prever la importancia de esta unidad como una zona de recarga del sistema acuífero que debe presentar medidas de manejo especial en pro de la protección del recurso subterráneo.

Este tipo de estudios es importante porque permite un acercamiento al conocimiento hidrogeológico de la Dunita de Medellín y su relación con el SAVA, como zona de recarga de la unidad A1-Acuífero libre que es la más explotada para diferentes usos en el Valle, además de la posibilidad a futuro de ser aprovechada para diferentes abastecimientos de la población.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de realizar un análisis completo de la información desde los estudios citados hasta los datos y resultados obtenidos en el estudio se presentan las conclusiones de los objetivos propuestos y recomendaciones.

En la unidad hidrogeológica A3-Dunita de Medellín, se presenta la formación de un sistema pseudokárstico dado por tres controles: climáticos, litológicos y estructurales, predominando el control estructural debido al ensanchamiento de fracturas y diaclasas en el macizo rocoso sometido a distensión durante su emplazamiento y fracturamientos posteriores influenciados por los grandes sistemas de fallas de la región.

Se emplearon 1,550 datos estructurales de fracturas tipo diaclasas, 1,099 levantados en el marco de este proyecto, 94 del estudio de la Alcaldía de Medellín (Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín, 2011) y los 357 datos restantes del proyecto del CTO (2013), luego estas fracturas se graficaron en diagramas de peso hidráulico (P.H) planteados por Louis (1974), que ayudaron a identificar finalmente las estructuras que conducen más agua dentro del macizo rocoso, es decir aquellas con mayor facilidad a permitir el paso del agua a través de ellas, dada sus condiciones físicas. Posteriormente, estos datos fueron correlacionados con la red superficial de drenaje y con los rasgos kársticos superficiales y subsuperficiales presentes en el área de estudio para obtener finalmente la interpretación de la dirección de los flujos subterráneos en la UHG3-Dunita de Medellín.

Se encontró que para la zona en estudio se tiene que las direcciones predominantes del flujo se dan en sentido WNW y NE-SE. Esto demuestra que existe una relación entre el agua que se recarga en el área de interés y la unidad hidrogeológica A1 donde se presenta la descarga.

Se tiene evidencia de más de 27 cavernas, 804 dolinas, 52 puntos de karren, 457 ponores, 22 puntos de surgencia, 39 úvulas, lo que permite una conexión directa entre el agua lluvia y el sistema subterráneo, el agua al infiltrarse rápidamente alcanza el medio subterráneo y luego se mueve al interior del macizo rocoso por las fracturas presentes en la Dunita.

En términos generales, la recarga se puede definir como el proceso por el cual determinada cantidad de agua alcanza las reservas subterráneas, dicha agua puede provenir de la infiltración de agua lluvia, de corrientes superficiales, de unidades hidrogeológicas adyacentes.

La cuantificación de la recarga permite establecer que en el altiplano de Santa Elena se recargan importantes volúmenes de agua subterránea (48-60% de la precipitación se convierte en recarga potencial) que abastecen los acuíferos del fondo del Valle, la unidad A1

Las variables consideradas en este trabajo para la identificación de los sistemas de flujo de agua subterránea en la unidad A3-Dunita de Medellín (estructuras del macizo y cuantificación de recarga) mediante las cuales se pudo identificar los aportes de precipitación potencial de ser convertida en recarga y las direcciones de flujo constituyen una buena herramienta para realizar análisis hidrogeológicos en esta zona aun inexplorada y la relación que tiene en el Sistema Acuífero del Valle de Aburrá.

Los resultados de esta investigación permiten concluir que la Dunita de Medellín tal como lo han propuesto diferentes autores por sus condiciones particulares de pseudokars y alto fracturamiento representa una zona de recarga importante, donde las direcciones preferentes de flujo están en sentido al acuífero libre y semiconfinado que actualmente son los más aprovechados y explotados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ahondar en el conocimiento hidrogeológico de esta unidad, ya que el desconocimiento del sistema pseudokárstico y su importancia por parte de las autoridades ambientales, ha permitido que cada vez más se realicen actividades de contaminación en esta zona con implicaciones no solo sobre el recurso hídrico subterráneo sino también aumentando con ello el riesgo de inundaciones en el altiplano de Santa Elena donde es muy frecuente el almacenamiento de residuos en las dolinas generando con ello interrupción de flujo en las crecidas de las corrientes.

Se recomienda a las autoridades ambientales divulgar los resultados de este tipo de estudios sobre la hidrogeología del SAVA y propiciar nuevas investigaciones sobre los acuíferos de la región que repercutirán en una mejor gestión del recurso hídrico

Como futuros trabajos en la zona de estudio está la calibración de la estimación de recarga con datos de escorrentía superficial medidos puntualmente en las cuencas que delimitan la región de interés, además de construcción de pozos de observación para realizar mediciones directas de niveles freáticos y/o piezométricos que permitan determinar la recarga real de aguas subterráneas. Además, este trabajo debe complementarse con la cuantificación de volúmenes de agua subterránea disponibles a partir de la aplicación de métodos de medición directa como lo son los piezómetros o pozos de agua subterránea, seguido de una modelación numérica de flujo subterráneo; lo cual es fundamental para conocer el funcionamiento del agua subterránea y definir áreas a priorizar; para evitar acciones que deterioren la calidad del agua a recargarse.

ESTE DOCUMENTO NO REPRESENTA LA VERSIÓN FINAL DEL ESTUDIO, PUEDEN SURGIR CAMBIOS, PARA AMPLIAR LA INFORMACIÓN POR FAVOR REMITIRSE A LOS ARTÍCULOS YA PUBLICADOS, VERSIÓN FINAL.

REFERENCIAS

- Álvarez, J., (1982). Tectonitas Dunita de Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia, (Informe 1896). *Boletín Geológico*, 28(3), 9-44.
- Álvarez, O. (2007). Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de Campos Hidrológicos. Aplicación al Balance Hídrico de Largo Plazo. [Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia].
- Anderson, M., Woessner, W. W. & Hunt, R. (2015). *Applied Groundwater Modeling (Second Ed.)*. Elsevier Inc.
- Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (ASF DAAC). (2015). PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) – Radiometric Terrain Corrected high-res; Includes Material© JAXA/METI 2007 [Software Online]. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>.
- Barco, O. & Cuartas, A. (1998). *Estimación de la Evaporación en Colombia*. [Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Colombia].
- Bastidas, B.D. (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*. [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia].
- Bradbury, K.R. & Dripps, W.R. (2010) The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*, 24(4), 383-392.
- Bogena, H., Kunkel, R., Montzka, C. & Wendland, F. (2005). Uncertainties in the simulation of groundwater recharge at different scales. *Advances in Geosciences*, 5, 25–30. Retrieved from <https://doaj.org/article/042f3e6d2d19461f8e0fe0dc3bc438a1>.
- Butler, S. (1957). *Engineering Hydrology*. - Prentice Hall Inc. EE.UU. Budyko, M.I. (1974). *Climate and Life (D. Miller, Ed.)*. New York: Academic Press.
- Budyko, M. J. (1974). *Climate and life*. Academic Press.
- Chaves-Córdoba, B & Jaramillo-Robledo, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. *Cenicafé* 49(3), 224-230.
- Compañía de Proyectos Ambientales E ingeniería (CPA Ingeniería S.A.S), Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), Área Metropolitana

- del valle de Aburrá (AMVA), Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE) & Fondo de Adaptación. (2018). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá*. Medellín: MINAMBIENTE.
- Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare), Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) & Fondo de Adaptación. (2018). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Negro*. Medellín: MINAMBIENTE.
- Consorcio Conexión Túnel Aburrá-Oriente-CTO (2013). *Estudio de impacto ambiental conexión vial Aburrá-Oriente*. Gobernación de Antioquia. Medellín. Colombia.
- Consorcio de Microzonificación Sísmica & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), (2007). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Enhenavigado (Valle de Aburrá)*. Colombia.
- Casas, J. D. & Monsalve, G. (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín–Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*, 9(1), 67-76.
- Cediel, F., Shaw, R. P. & Caceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block. The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics: *AAPG Memoir*, 79, 815-848.
- Chica, A. (1979). *Aspectos mecánicos e hidráulicos de las rocas*. Medellín: Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.
- Correa, A.M. & Martens, U. (2000). Caracterización geológica de las anfibolitas de los alrededores de Medellín. [Tesis grado, Universidad Nacional de Colombia]
- Cronshey, R., McCuen, R., Miller, N., Rawls, W., Robbins, S. & Woodward, D. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds - TR-55 (Second Ed.)* The U.S. Department of Agriculture (USDA), Washington.
- Custodio, E. (1997). Explotación Racional de las Aguas Subterráneas. *Acta Geológica Hispánica*, 30, 21–48.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV – 2018*. Colombia.

- De Vries, J. & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10,5–17
- Dripps, W.R. (2003). *The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the Trout Lake basin of northern Wisconsin*. [PhD Thesis, University of Wisconsin].
- Dripps, W.R. & Bradbury, K.R. (2007). A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas. *Hydrogeology Journal*, 15(3), 433–444. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0160-6>.
- Ego, F., Sébrier, M. & Yepes, H. (1995). Is the Cauca-Patía and Romeral Fault System left or rightlateral? *Geophysical Research Letters*, 22(1), 33-36.
- Environmental Systems Research Institute, (ESRI). (1969). ArcGis (10.5) [Desktop Software]. Download from: <https://www.esri.com/es-co/store/arcgis-desktop>
- Comisión Docente del Centro Internacional de Hidrología Subterránea (CoDo CIHS) (Ed.) (2009). Balance Hídrico: Recursos y Reservas. En *Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrogeología subterránea* (pp. 170–179). Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS) Barcelona.
- García-Delgado, H. & Velandia, F. (2020). Tectonic geomorphology of the Serranía de San Lucas (Central Cordillera): Regional implications for active tectonics and drainage rearrangement in the Northern Andes. *Geomorphology*, 349, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106914>.
- Gómez-Camargo, D. (2018). *Determinación de la unidad hidrogeológica y estimación de la recarga potencial del sistema hidrogeológico del Valle de San Nicolás*. [Tesis Pregrado, Universidad EIA].
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.
- Herrera, J. (2003). *Carso de alta montaña en Santa Elena; implicaciones hidrológicas e hidrogeológicas en el Valle de Aburrá*. Medellín: Facultad de Minas. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].

- Henao, J & Monsalve, G. (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín e Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*, 9, 67-76.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), (2010). *Estudio nacional del agua 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.*
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Estudio nacional del agua 2014. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia*
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). *Estudio nacional del agua 2018. Colombia.*
- Kellogg, J. N., Franco, G. B. & Mora-Páez, H. (2019). Cenozoic tectonic evolution of the North Andes with constraints from volcanic ages, seismic reflection, and satellite geodesy. *Andean Tectonics*, 69-102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00006-X>
- Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E., Abrego, A., Mora, H. & Camacho, E. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671-1683.
- Lerner, D. N., Issar, A. S., & Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. International Contributions to Hydrogeology. I.A.H. Heinz Heise.*
- Linsley, R., Kohler, M. & Paulus, L. (1958). *Hydrology for engineers.* McGraw Hill.
- Louis, C. (1974). Introduction á l'hydraulique des roches. *Bull. B.R.G.M. III(4)*, 283-356
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)., (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico -PNGIRH-.
- Mora-Páez, H., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Mencin, D., Fernandes, R. M., Diederix, H. & Díaz-Mila, F. (2019). Crustal deformation in the northern Andes—A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 76-91.

- Nagi, R. (2014). *Multi-Directional Hillshade Makes Your Maps Pop*. Esri. <https://www.esri.com/about/newsroom/wp-content/uploads/2018/10/multi-directional-hillshade-makes-your-maps-pop.pdf>
- Ordoñez, O., Marín, M. V., Iregui, H. G., Herrera, E. C., Ruiz, C., Rendón-Ramírez, A. P. & Ríos, C. (2005). *Generalidades del Sistema de Fallas de Romeral en las cercanías a Medellín*. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Colombia.
- PCI-Geomatics. (2005). Focus User Guide 10.0. [Desktop Software] PCI Inc, Ontario, Canada. <https://catalyst.earth/products/>
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28(107), 201-222. ISSN: 0370-3908
- Pulido, N. (2003). *Seismotectonics of the northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks*. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Special Edition*. 69-76
- Restrepo, D., Bielak, J., Serrano, R., Gómez, J. & Jaramillo, J. (2016). Effects of realistic topography on the ground motion of the Colombian Andes—A case study at the Aburrá Valley, Antioquia. *Geophysical Journal International*, 204(3), 1801-1816.
- Rocscience Inc. (2020). DIPS, stereographic projection program (6.0). [Desktop Software] download from: <https://www.rocscience.com/software/dips>.
- RockWare Inc. (1983) RockWorks [Desktop Software] download from: <https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Rodríguez, G. (2009). Petrografía de las rocas metamórficas. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rodríguez, G. & Correa–Martínez, A.M. (2015). Edad jurásica del Neis Milonítico de Sajonia y su posible significado en la evolución geotectónica del sector noroccidental de la cordillera Central de Colombia. [Simposio] Tectónica jurásica en la parte noroccidental de Sur América y bloques adyacentes. Medellín, Colombia.
- Rodríguez, G., González, H. & Zapata, G. (2005). *Geología de la plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:100.000*. Ingeominas, Colombia.

- Rushton, K. R. & Ward, C. (1979). The estimation of groundwater recharge. En: *Journal of Hydrology*, 41, 345-361.
- Saxton, K. E. & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate technique for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39.
- Scesi, L. & Gattinoni, P. (2009). *Water circulation in rocks*. Springer Science & Business Media.
- Schosinsky, G. & LOSILLA, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Rev. Geol. Amér. Central*, 23, 43-55.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, (34–35), 13–30. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>.
- Singhal, B. & Gupta, R. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. (2nd ed.). Springer.
- Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín. (2011). *Modelo hidrogeológico de la ladera suroriental de Medellín. (Cuencas altas de las quebradas la presidenta y La Sanín)*. Alcaldía de Medellín.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H. & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787–813. doi:10.1029/2000tc900004
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R., (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Publications in Climatology*, 10, 185–311.
- Toussaint, J.F. (1996) *Evolución geológica de Colombia 3: Cretácico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Turc, L. (1961). Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales Agronomiques*, 12, 13–49.

- Universidad de Antioquia (UdeA) & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2010-2019). Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá-Medellín (RedRío). Fases III, IV, V, VI.
- Universidad de Antioquia (UdeA) & Área Metropolitana del valle de Aburrá (AMVA). (2012). *Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del valle de Aburrá*. Colombia.
- Universidad de Antioquia (UdeA) & Área Metropolitana del valle de Aburrá (AMVA). (2013). *Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el centro y sur del valle de Aburrá*. Medellín.
- Universidad de Antioquia (UdeA) & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2016). *Plan de manejo ambiental de acuífero del Valle de Aburrá*. Colombia.
- Universidad de Antioquia (UdeA) & Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2014). *Disponibilidad del recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento de agua de los circuitos atendidos por fuentes menores: Aguas Frías, Caldas, Barbosa, San Cristóbal, La Montaña, La Cascada y San Antonio de Prado y algunos sectores de bombeo representativos*. Colombia.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL) & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2008). *Actualización del inventario de captaciones de agua subterránea. Medellín*.
- Vallejo, C., Spikings, R. A., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D. & Page, L. (2006). The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate. *Terra Nova*, 18(4), 264-269.
- Vélez, M.V. & Rhenals, R. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquía. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 24, 37-54.
- Westenbroek, M. S., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J. & Bradbury, K. R. (2010). SWB-A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water- Balance Code for Estimating Groundwater Recharge. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A31. <https://pubs.usgs.gov/tm/tm6-a31/>

- Wittenberg, H., Aksoy, H. & Miegel, K. (2019). Fast response of groundwater to heavy rainfall. *Journal of Hydrology*, 571, 837–842.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.037>.
- World Water Assessment Programme -WWAP- (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Paris: UNESCO.
- 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*. 561, 1081-1093
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.08.010>.