

Red de amigos y amigas de Cerro Seco
Colectivo Mayaelo
Cimmua Consejo indígena Muisca de Mykytá
Monta tu Ambiente
Colectivo Pal Barrio
Escuela Ambiental de Potosí
Instituto Cerros del Sur
Cumbre Urbana
Colectivo Lata Lata

**PROPUESTA DE DELIMITACIÓN DE CERRO SECO COMO ÁREA
PROTEGIDA DEL ORDEN DISTRITAL**
**Evaluación de los componentes geológico, hidrológico, hidrogeológico y
ecosistémico.**

Elaborado por

CORPORACIÓN GEOAMBIENTAL TERRAE:

Julio Fierro Morales, Geólogo MSc. Geotecnia
Eduardo Quintero Chavarría, Ing. Civil MSc Geofísica
Carlos Guío Blanco, Geólogo MSc Ciencias de la Tierra y Medio ambiente
Diana Lozano Zafra, Geóloga MSc Sensores remotos
Lorena Barreto Gutiérrez, Ing. Civil Esp. Recursos Hidráulicos
Eduardo Villamil, Geólogo MSc Ciencias-Geología (a)
Carlos Sierra Salamanca, Geólogo
Gonzalo Valdivieso Bohórquez, Geólogo
Jeremy León Linares, estudiante de Geografía U.N.
María Isabel Barrera, estudiante de Ingeniería civil U.N.

Asesor científico

Sergio Gaviria Melo, Químico PhD Pedología

HERBARIO J.J. TRIANA, FUNDACIÓN TRÓPICO ALTO:

Jairo Pinto, Biólogo MSc Ciencias-Biología, PhD Ciencias-Biología (c)
Manuel Cortés Pardo, Biólogo, PhD Ciencias biológicas

Abril 26 de 2021

1. INTRODUCCIÓN

Cerro Seco constituye un enclave desde muchos puntos de vista. Es una zona seca que no ha sido urbanizada y donde la actividad minera bordea el área de interés, y en algunos lugares la extracción se ha hecho dentro del polígono que pretende ser urbanizado, pero no ha generado su completa destrucción.

Las comunidades de la zona han impulsado su declaratoria como área protegida del orden distrital y también han asumido que es un área con potencialidad de servir para distintas actividades colectivas, un antecedente importante de apropiación.

En ese contexto, y en apoyo a las comunidades ambientalistas del sur de Bogotá, la Corporación Geoambiental Terrae constituyó un grupo de trabajo transdisciplinar que en conjunto con el conocimiento de grupos de trabajo comunitario, particularmente de jóvenes, pretende aportar en la caracterización del ciclo de las aguas y los ecosistemas de Cerro Seco.

Los aspectos tenidos en cuenta han sido la recarga de acuíferos, la caracterización de suelos y paleosuelos en términos de la infiltración, los nutrientes y la susceptibilidad a la erosión, así como el levantamiento y sistematización de información sobre la gran cantidad de endemismos y, de manera general, la riqueza ecosistémica de Cerro Seco.

En cuanto a la existencia de acuíferos y su recarga, se ha enfocado el trabajo en las consideraciones tectónicas que se relacionan con la posibilidad de infiltración y flujos en escalas regionales y zonales, dada su ubicación la zona de cizalla del sur de Bogotá, la cual genera un intenso fracturamiento que posibilita infiltración a niveles profundos. Esta información se ha ligado con las características de permeabilidad de los suelos y los análisis de evapotranspiración y lluvias, para generar mapas diferenciados a lo largo del año climático típico.

En cuanto a los suelos, se han abordado consideraciones texturales, químicas y físicas, que han permitido establecer de manera preliminar relaciones con suelos de otros enclaves secos, así como la conectividad entre los suelos y las aguas subsuperficiales y subterráneas someras (flujos locales) como con el desarrollo de una vegetación muy particular, adaptada a restricciones y características de estos suelos que han evolucionado al menos durante 3 millones de años en condiciones mucho menos húmedas que la zona central y norte de la Sabana de Bogotá. Esta génesis ha supuesto también una huella química que los hace muy susceptibles a la erosión, generando un paisaje muy particular de belleza austera.

El tercer eje de trabajo, ha sido el levantamiento de información primaria de vegetación en este ecosistema subxerófito, la cual ha sido unida a la sistematización de información pre-existente, particularmente comunitaria, para poder contar con un diagnóstico avanzado sobre coberturas vegetales, endemismos, composición florística y el estado de amenaza en que se encuentran muchas de las especies que caracterizan Cerro Seco.

Todas estas consideraciones se encuentran amenazadas por minería que cuenta con instrumentos ambientales expedidos por las autoridades ambientales, tanto la local -SDA- como la regional -CAR. No obstante, la revisión de los estudios de impacto ambiental que viabilizaron las licencias y permisos ambientales no cuentan con información primaria ni de vegetación ni de hidrogeología,



con lo cual la autoridades ambientales pueden haber permitido la afectación irreversible de elementos naturales que son objeto de protección de acuerdo con la normativa ambiental vigente.

Dentro del presente documento se ilustra sobre las características especialísimas de Cerro Seco y proponemos que sea declarado como un área protegida del orden distrital, alertamos sobre la necesidad urgente de detener los procesos de extracción minera y establecemos la dificultad de gestionar un territorio tan particular y vulnerable con la sectorización que propone el Distrito, pues tanto la conexidad de las zonas susceptibles a la infiltración de agua como desde las características de los suelos y la ubicación de flora en peligro crítico de extinción, Cerro Seco no es un terreno homogéneo y baldío, sino una rica mezcla de condiciones naturales que prestan variados servicios ecosistémicos. No se puede aspirar a manejar esta complejidad zonificando y estableciendo límites estrictos que dividan el territorio que aun tiene posibilidad de ser protegido.

2. COMPONENTE HIDROCLIMATOLÓGICO

La caracterización del clima es un insumo fundamental para la comprensión de las dinámicas ambientales y humanas de un territorio, aproximarse a entender su comportamiento permite establecer pautas de ordenamiento, más apropiadas.

Cerro seco se encuentra ubicado sobre los 2900 msnm sobre la microcuenca de la quebrada Limas y en su zona noroccidental sobre la microcuenca del río Tunjuelo bajo, ambas afluentes de la cuenca del río Tunjuelo en su trayecto hacia el río Bogotá. La cuenca del río Tunjuelo forma parte del sistema hidrográfico del río Bogotá. Nace al sur de la ciudad de Bogotá en la laguna de Los Tunjos, originando el río Chisacá, a una elevación de 3780 msnm el cual desemboca en el río Bogotá en el sector suroccidental de la ciudad a los 2510 msnm¹, su cuenca media es catalogada como un enclave seco con predominancia de ecosistemas subxerófiticos.²

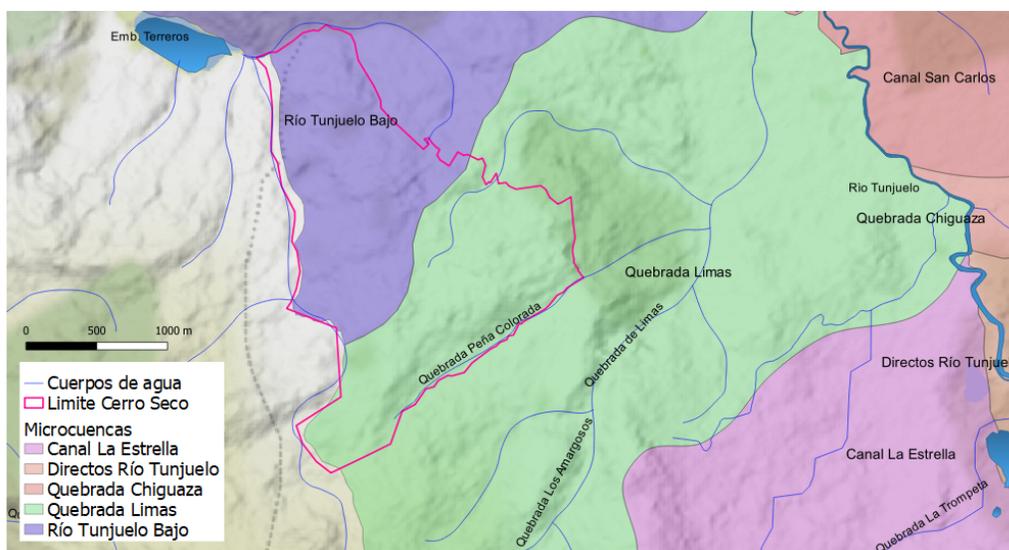


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre las microcuencas de la cuenca baja del río Tunjuelo
Fuente: Elaboración propia a partir de capas SDA.

La Sabana de Bogotá presenta más de cuatro tipos de clima, la zona de Cerro Seco se encuentra clasificada mediante Thornthwaite³ como frío *semiárido* dicha clasificación limita con otras zonas en *frío semihúmedo* hacia los cerros orientales y hacia el sur con zonas clasificadas como *muy frío semiárido* y *muy frío húmedo*.

Este sector semiárido donde se encuentra Cerro Seco abarca parte de los barrios de Tunjuelo, Sierra Morena, Venecia, el sur de Bosa y sobrepasa los límites suroccidentales de la ciudad extendiéndose

¹ IDEAM, Atlas Climático Nacional. Vol. 2. 2018.

² Cortés P. Vegetación Potencial en la Cuenca media del Río Tunjuelo y Procesos de Cambio en la Cobertura Vegetal, otro Enfoque Metodológico para un Análisis Temporal, Jardín Botánico José Celestino Mutis. 2008

³ Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38: 55-94.

desde el bajo valle del río Tunjuelo, hasta cerca de Bojacá, cruzando los municipios de Soacha, Bojacá, Madrid y Mosquera, en alturas comprendidas entre 2.550 y 2.900 msnm⁴.

El comportamiento del clima en el sector de Cerro Seco, al igual que en gran parte de la ciudad de Bogotá se encuentra dominado principalmente por la confluencia de los vientos alisios del noreste y sureste, este choque de corrientes de aire configura la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Mesa et al., 1997; Poveda et al., 2001; Poveda, 2004). A diferencia de algunos sectores al suroriente de la ciudad no se encuentra muy influenciado por los sistemas dinámicos atmosféricos que rigen la climatología de la Orinoquía, tales como la OLLJ (por sus siglas en inglés Orinoco Low Level Jet) y la Alta de Bolivia. Otros factores fisiográficos locales y las modificaciones antrópicas del entorno pueden dar lugar a condicionamientos puntuales del comportamiento de las variables meteorológicas en esta y otras zonas de la ciudad de Bogotá.

El movimiento de la ZCIT determina el régimen bimodal de la precipitación, es decir con dos temporadas de menores lluvias a inicio y mitad de año, con una época seca entre junio y agosto más deficitaria que la del primer trimestre y con dos temporadas de lluvias similares a lo largo del año.

En el centro de la zona de estudio se encuentra un cuerpo de agua denominado Laguna Encantada, este cuerpo de agua suele presentar fluctuaciones en su nivel y área, asociadas principalmente al régimen climático.

A. PRECIPITACIÓN

i. Estaciones meteorológicas.

La precipitación es una de las variables con mayor variación tanto a nivel espacial como a nivel temporal, su estudio es fundamental para el entendimiento del sistema climático global, además el monitoreo de esta variable es una herramienta primordial en la predicción de las diferentes respuestas del ciclo del agua frente a las actividades humanas como por ejemplo la minería o la deforestación, pues estas intervenciones sobre los ecosistemas podrían tener impactos en la disponibilidad de agua y la variabilidad climática.

Para comprender el comportamiento de la lluvia sobre el área de estudio de Cerro Seco se desarrolló un análisis exploratorio de los datos disponibles para la variable precipitación sobre la zona. El análisis consistió en comprobación de la longitud de datos, consolidación de datos diarios a mensuales, identificación de datos faltantes a escala mensual y detección de valores atípicos de las series disponibles en las estaciones representadas en la siguiente figura.

⁴ CORPORACIÓN MISIÓN SIGLO XXI. 1996. *Perfil ambiental de Santafé de Bogotá* (1a ed.). Bogotá, DAMA, FONADE-DNP y GRANAHOORRAR. CORPORACIÓN MISIÓN SIGLO XXI. 1996. *Perfil ambiental de Santafé de Bogotá* (1a ed.). Bogotá, DAMA, FONADE-DNP y GRANAHOORRAR.

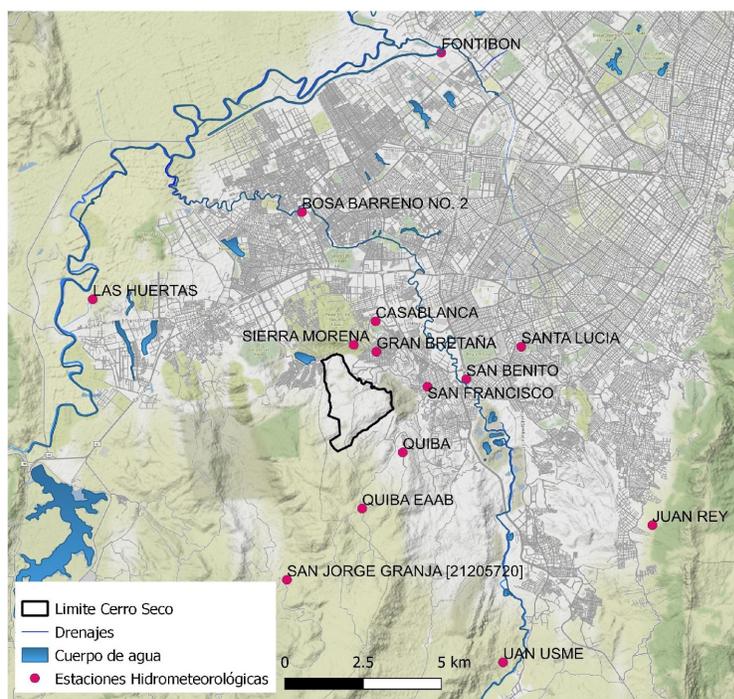


Figura 2. Estaciones meteorológicas localizadas alrededor del área de estudio
Fuente: Elaboración propia a partir de datos IDEAM, EAAB e IDIGER.

El período climático de referencia utilizado para los análisis meteorológicos fue 1999-2014 para las estaciones de IDEAM y EAAB y 2011-2020 para las estaciones de IDIGER estaciones más próximas a la zona de estudio, las cuales no contaban con datos previos a 2011, los datos de IDEAM y EAAB fueron consolidados de los registros diarios y evaluados a escala mensual. Dado que el alcance de este apartado en esta versión del documento no incluiría técnicas estadísticas como un examen de distribución de las series de datos, ni análisis de homogeneidad, el criterio determinante para la selección de estaciones se estableció en un porcentaje faltante de datos máximo del 12% del total de los datos de la serie. De esta manera se seleccionaron 16 estaciones. Este análisis está enfocado en caracterizar las condiciones hidrometeorológicas promedio y determinar la precipitación media anual multianual para la zona de estudio. En la siguiente tabla se presenta un resumen de las series de datos empleadas.

Tabla 1 Estaciones meteorológicas localizadas alrededor del área de estudio y número de datos disponibles. Fuente: Elaboración propia a partir de datos IDEAM, EAAB, IDIGER

Estación	Fuente	Código	Altitud (msnm)	Municipio	Año inicio	Año fin	Número de datos (meses)	Número de datos faltantes	% faltantes
QUIBA	IDEAM	21202050	3000	BOGOTÁ	1999	2014	177	3	1,7%
CASABLANCA	EAAB	20197 P-031	2600	BOGOTÁ	1999	2014	179	1	0,6%
PASQUILLA	IDEAM	21201580	3000	BOGOTÁ	1999	2014	170	10	5,9%
LAS HUERTAS	IDEAM	21202110	2572	SOACHA	1999	2014	177	3	1,7%
FONTIBÓN	EAAB	20547 P-048	2580	BOGOTÁ	1999	2014	176	4	2,3%
BOSA BARRENO	EAAB	20154 P-051	2580	BOGOTÁ	1999	2014	176	4	2,3%

Estación	Fuente	Código	Altitud (msnm)	Municipio	Año inicio	Año fin	Número de datos (meses)	Número de datos faltantes	% faltantes
JUAN REY	EAAB	20204 P-081	3100	BOGOTÁ	1999	2014	170	10	5,9%
SANTA LUCÍA	IDEAM	21200520	2630	BOGOTÁ	1999	2014	177	3	1,7%
TIBATAITÁ	IDEAM	21205420	2543	MOSQUERA	1999	2014	176	4	2,3%
SAN JORGE GRANJA	IDEAM	21205720	2900	SOACHA	1999	2014	160	20	12%
QUIBA 2	EAAB	20205 P-090	3000	BOGOTÁ	1999	2014	177	3	1,7%
SIERRA MORENA*	IDIGER	N/A	2720	BOGOTÁ	2011	2020	120	0	
GRAN BRETAÑA*	IDIGER	N/A	2700	BOGOTÁ	2015	2020	72	0	
SAN FRANCISCO	IDIGER	N/A	2550	BOGOTÁ	2015	2020	72	0	
UAN USME*	IDIGER	N/A	2740	BOGOTÁ	2011	2020	120	0	
SAN BENITO*	IDIGER	N/A	2500	BOGOTÁ	2011	2020	120	0	

ii. *Precipitación media mensual multianual.*

En la siguiente figura se muestran los histogramas de precipitación media mensual multianual para las estaciones seleccionadas en el área de estudio, los meses con mayores lluvias en la zona son marzo - abril - mayo para el primer semestre y octubre - noviembre para el segundo semestre donde se incrementan levemente los volúmenes de precipitación en relación al primer semestre. La temporada seca más marcada ocurre entre los meses de junio - julio - agosto - septiembre.

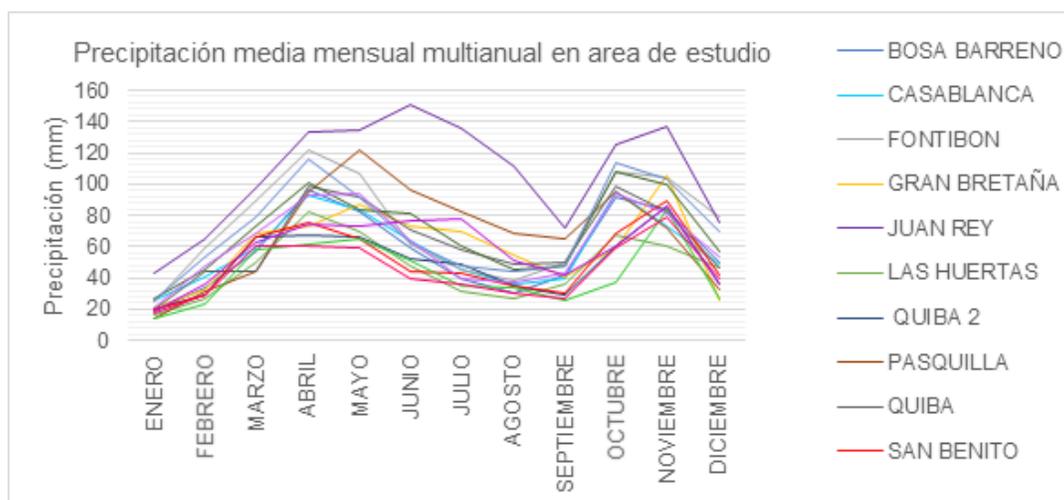


Figura 3. Régimen de la precipitación media mensual multianual (1999-2014) Fuente: Elaboración propia a partir de datos IDEAM

Se evidencia una marcada distribución bimodal⁵ de las precipitaciones, el cual refleja una influencia del posicionamiento de la ZCIT, en su paso de sur a norte en el primer semestre y de norte a sur en el segundo semestre. Sin embargo, como se evidencia en la gráfica en la estación Juan Rey la representación de esta bimodalidad se ve diferenciada por la influencia del régimen climático monomodal de la región Orinoquia, donde es junio el mes con más volúmenes de lluvia, difiriendo evidentemente del patrón claramente bimodal de las zonas más occidentales de la ciudad de Bogotá, como es el caso de Cerro Seco donde se presenta un patrón bimodal a pesar de que sus picos de altas no lluvias no son tan marcados.

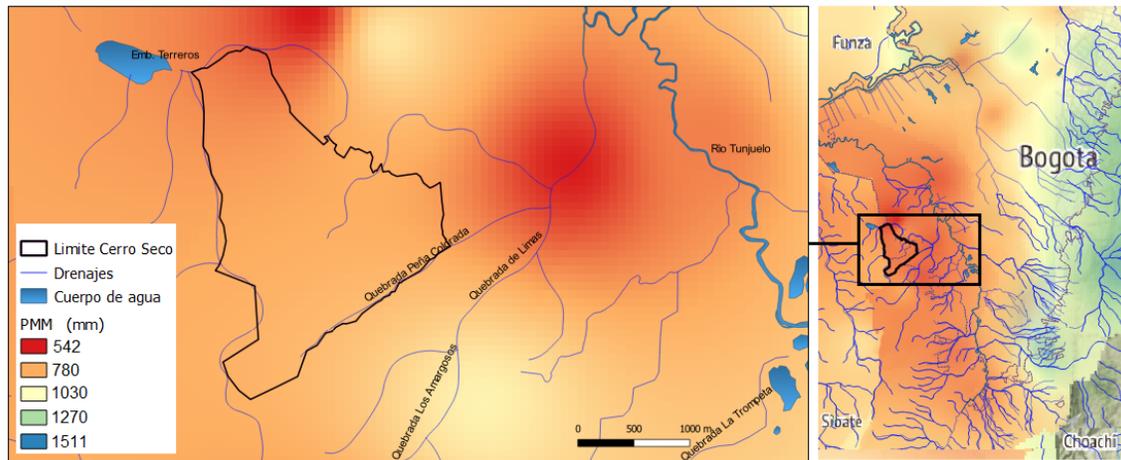


Figura 4. Precipitación Media Multianual (mm) (PMM) Fuente: Elaboración propia

La anterior figura evidencia que las mayores cantidades de lluvia al año se presentan en zonas cercanas a los cerros orientales como las localidades de San Cristóbal, Santa Fe, Chapinero y Candelaria y las zonas con volúmenes de precipitación menores es decir menos lluvias en la ciudad se presentan en su sector más occidental sobre localidades como Kennedy, Tunjuelito, Bosa y Ciudad Bolívar donde se ubica el área de estudio de este documento.

Al representar el comportamiento de la precipitación en la escala de valores presentes en la zona de estudio, se observa que la precipitación media anual en el periodo comprendido (1999-2020) se encuentra entre los 590 - 665 mm los cuales se presentarían en extremo sur de esta área de estudio, estos valores le atribuyen a Cerro Seco constituirse en el área más seca de toda la ciudad de Bogotá, siendo esto una particularidad climática evidenciada con anterioridad por otros autores como Corporación Misión Siglo XXI, 1996.

⁵ Un conjunto de datos de lluvia es bimodal sí tiene dos (bi) modas. Es decir que durante el periodo de análisis que para este caso es un año no hay un solo conjunto de datos que ocurra con la frecuencia más alta. En cambio, hay dos grupos de datos que se relacionan por tener la frecuencia más alta lo que traduce a dos periodos de altas lluvias en un mismo año.

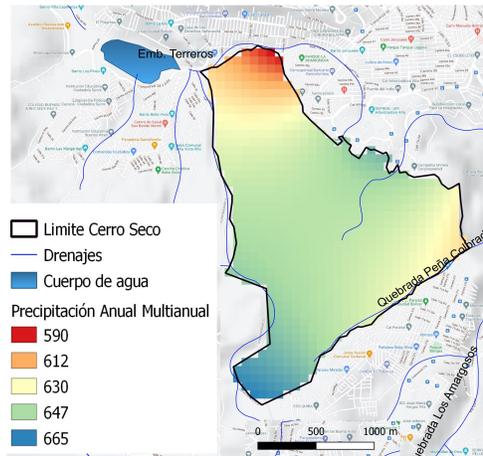


Figura 5. Precipitación Media Multianual (mm) Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura muestra la distribución de los volúmenes de precipitación durante cada uno de los meses del año en el área de estudio se evidencia que los meses de menores lluvias corresponden al periodo de diciembre – febrero y una otra temporada entre junio – septiembre. Los meses con mayores lluvias en la zona de estudio de acuerdo con la figura corresponden a abril – mayo y octubre – noviembre, siendo el mes de noviembre el mes que más volumen de precipitación ha registrado en el periodo de 1999 – 2020.

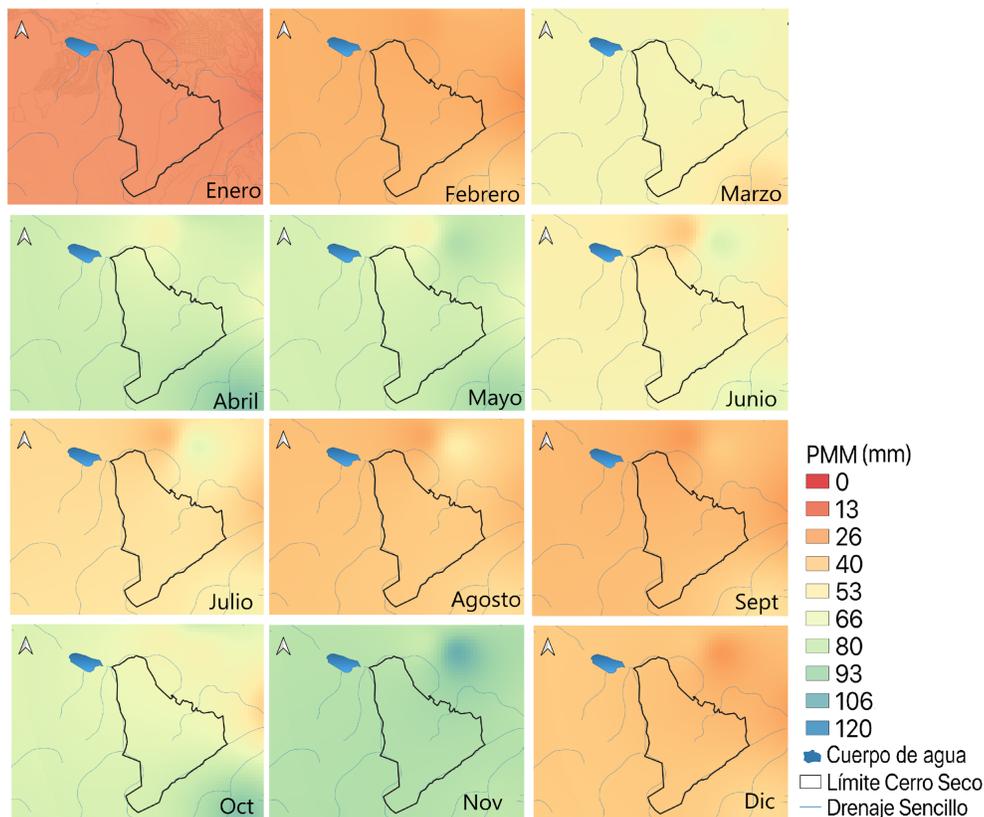


Figura 6. Precipitación Mensual Multianual PMM (mm) para la zona de estudio.1999-2020 Fuente: Elaboración propia

iii. *Temperatura.*

De acuerdo con IDEAM⁶ la temperatura media en la ciudad de Bogotá presenta de manera general tendencias de carácter creciente y tiende a ser de mayor magnitud por el efecto de la urbanización, la industria y otras actividades antrópicas.

La temperatura media anual oscila entre 12 y 15 °C para el área urbana de la ciudad, sobre los 2500-2800 msnm. Los valores más altos se presentan entre los meses de diciembre y marzo, siendo 15°C para el sector suroccidental en la estación de Granja San Jorge y 21°C en el Jardín Botánico (sector central).

Los valores más bajos de temperatura se presentan entre junio y agosto debido a la influencia de los vientos alisios, con valores de temperatura mínima oscilando entre 5 y 7 °C. En general la ciudad presenta características de temperatura media similares a través del año caracterizando la zona como isotermal.

El comportamiento de la temperatura en la zona de estudio se determinó mediante la información de la serie de datos de temperatura media mensual correspondiente a la estación 2120630 DOÑA JUANA la cual está bajo jurisdicción de la CAR Cundinamarca, entre el periodo 1999-2014. Los valores empleados para los análisis posteriores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores medios mensuales de temperatura (°C) estación 2120630 DOÑA JUANA

VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C) Estación 2120630 DOÑA JUANA

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12,55	12,88	12,94	12,83	12,56	13,34	11,93	12,17	12,27	12,5	13,01	12,2

iv. *Evapotranspiración Thornthwaite*

La evapotranspiración es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm. por unidad de tiempo.

Thornthwaite (1948) propone la fórmula:

$$ETP = 1,6 * \left(\frac{10 Tm}{I} \right)^a$$

Donde:

ETP: evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

Tm : temperatura media mensual en ° C

I: índice de calor anual, el cual se calcula mediante:

$$I = \sum_{1}^{12} i_j$$

⁶ Bernal, Germán; Rosero, María; Cadena, Martha y Montealegre, Jorge. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo - Bogotá : 2007.

El índice de calor anual se calcula sumando los doce índices de calor mensual los cuales a su vez se calculan mediante:

$$I_j = \left(\frac{Tm_j}{5} \right)^{1,514}$$

a : Parámetro que se calcula a partir de I según la expresión:

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239$$

Tabla 3. Evapotranspiración (mm) promedio anual multianual calculada mediante la fórmula de Thornthwaite

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T med	12,55	12,88	12,94	12,83	12,56	13,34	11,93	12,17	12,27	12,50	13,01	12,20
I	4,03	4,19	4,22	4,17	4,03	4,42	3,73	3,85	3,89	4,0	4,3	3,9
ETP no correg.	52,8	54,6	54,8	54,3	52,8	57,0	49,5	50,8	51,3	52,5	55,2	50,9
No. días mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30,0	31,0	30,0	31,0
No. horas luz	11,80	11,90	12,00	12,20	12,30	12,40	12,30	12,30	12,10	12,00	11,90	11,80
ETP corr.	53,7	50,9	56,7	55,2	56,0	58,9	52,5	53,8	51,7	54,27	54,76	51,76

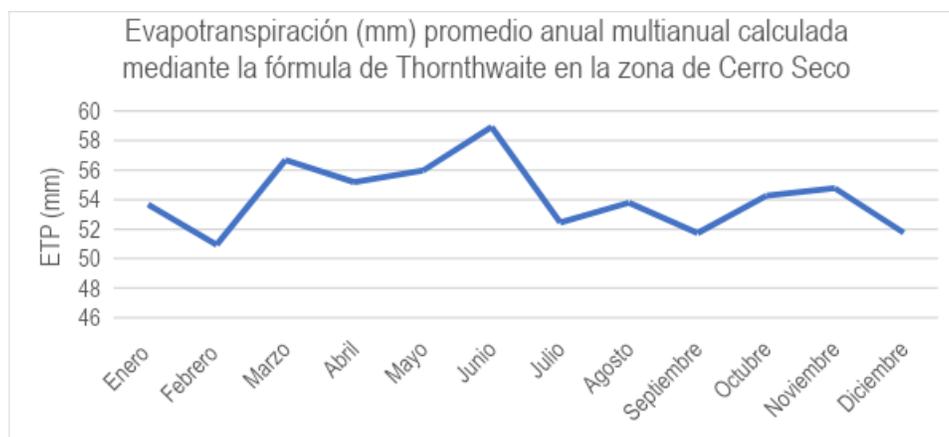


Figura 7. Evapotranspiración (mm) promedio anual multianual calculada mediante la fórmula de Thornthwaite en la zona de Cerro Seco. Elaboración propia.

v. Estimación simplificada de Balance hídrico en el área de estudio.

Un balance hídrico desde el estudio de la hidrología está basado en la aplicación del principio de conservación de masas, o ecuación de continuidad como interpretación de las entradas y salidas del ciclo hidrológico. Estableciendo así que, para cualquier volumen de agua en cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas de agua estará condicionada por la variación del volumen almacenado⁷

La ecuación general del balance hídrico indica los valores relativos de entrada y salida de caudales y la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca. En términos de entradas es la

⁷ UNESCO. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Francia.

precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, recibida en la superficie del suelo, y el caudal de aguas superficiales y subterráneas que ingresan provenientes de otras cuencas (QsI y QuI).

En términos de salidas la ecuación general de balance hídrico contempla la evapotranspiración que ocurre en el horizonte superficial de la cuenca (ETa) y la salida de los caudales de agua superficial y subterránea (QsO y QuO) que salen de la cuenca.

Teniendo un diferencial (ΔS) que aumenta cuando las entradas superan a las salidas y el volumen de agua almacenada en la cuenca aumenta y de manera contraria disminuye.

Contemplando siempre un término residual (ε) sujeto a los errores de medida o estimación, teniendo así una ecuación general de balance hídrico:

$$P + QsI + QuI - ETa - QsO - QuO - \Delta S - \varepsilon = 0$$

Cuando los aportes subterráneos de caudal de otras cuencas son despreciables, es decir $QuI = 0$ y no existen transvase de otra cuenca en decir $QsI = 0$, la ecuación de balance hídrico para una cuenca hidrográfica queda expresada como:

$$P - ETa - Q - \Delta S - \varepsilon = 0$$

De acuerdo con Marini & Piccolo, 2000⁸ el balance hídrico directo (BHD) es un método empírico que estima el balance de todo el sistema, utilizando el cálculo de la precipitación mensual y anual para el año hidrológico en análisis, y la estimación de la evapotranspiración potencial mensual y anual basado en el conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada, se puede estimar un balance del agua en el suelo a lo largo del año. El método se basa en la hipótesis de que el agua del suelo se va perdiendo conforme pasa el tiempo hasta agotar su reserva y así cubre las necesidades hídricas del sistema.

Este método consiste en estimar mes a mes los siguientes parámetros (Almorox, 2003 citado en Del Toro-Guerrero, et al, 2014)⁹:

- **Precipitación (P):** es el componente de mayor importancia, al ser el que aporta directamente el recurso hacia el sistema.
- **Evapotranspiración potencial (ETP):** se puede calcular mediante el método de Thornthwaite (1948), el cual brinda una aproximación de lo que se puede evapotranspirar en el sistema si éste no tuviera restricción alguna del recurso hídrico.
- **P-ETP:** al calcular esta diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo, se pueden clasificar los meses húmedos (si $P > ETP$) y los meses secos (si $P < ETP$).
- **Reserva de agua en el suelo (R):** depende de las características físicas y biológicas del suelo (textura del suelo y cobertura vegetal). En algunos casos se puede utilizar como reserva máxima 100 mm (Thornthwaite, 1948), sin hacer diferencia entre el tipo de suelo y la cobertura vegetal. Se

⁸ Marini, M., & Piccolo, M. (2000). El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. Papeles de Geografía, Murcia, España, (31), 39-53.

⁹ Del Toro-Guerrero, F. J., Kretschmar, T., & Hinojosa-Corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. Tecnología y Ciencias del Agua, 5(6), 69-81.

estima sumando los incrementos P-ETP sólo cuando son meses húmedos. A estos incrementos se le agrega la reserva del mes anterior al mes que se está calculando:

$$R = R_{i-1} + (P - ETP)$$

• **Variación de la reserva (VR):** se calcula con la diferencia entre la reserva del mes en el que se realiza el cálculo y la reserva del mes anterior:

$$VR = R_i - R_{i-1}$$

• **Evapotranspiración real (ETR):** se considera que es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes y depende estrechamente del volumen de agua disponible. Esto quiere decir que la P en el mes considerado y la R existente será el agua disponible para evaporar. Cuando la P cubre la demanda potencial (generalmente en el periodo húmedo), se puede decir que:

$$ETR = ETP$$

• Si la ETP excede a la P (periodo seco), el agua que se evapora será la de la P + VR (tomada como valor absoluto):

$$ETR = P + VR$$

• **Falta de agua (F):** se considera como el volumen de agua faltante para cubrir las necesidades hídricas potenciales del sistema (para evapotranspirar):

$$F = ETP - ETR$$

• **Exceso de agua (Ex):** es el recurso que excede la reserva máxima y que se habrá perdido por escurrimiento superficial:

$$Ex = P - ETP - VR$$

Si bien el alcance de este primer informe no estima el balance a nivel de microcuencas, dada la falta de información asociada a caudales en las quebradas que se sitúan sobre el área de estudio y la dificultad de realizar una medición de la escorrentía superficial a la salida de estas, se desarrollaron los mapas mensuales de precipitación presentados en las secciones anteriores y mediante el cálculo de la evapotranspiración se estimó el parámetro precipitación útil (P-ETP) mediante un proceso semiautomático de álgebra de mapas, lo cual se traduciría en el escenario subxerófito de Cerro Seco como la reserva de agua en el suelo.

vi. Precipitación menos evapotranspiración: Diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo.

Aunque la manera más apropiada de desarrollar los cálculos al interior del modelamiento hidrológico se realizan a nivel de subcuencas se aclara que el presente documento es un estudio preliminar y exploratorio sobre las condiciones geoambientales en el área de estudio de Cerro Seco, por lo tanto se presentan los análisis de los resultados de manera espacializada en toda el área, los cuales a pesar de no reportar un valor preciso asociado a las reservas de agua en el suelo o la escorrentía directa, pueden ser utilizados para la estimación de zonas con susceptibilidad a la infiltración y la clasificación los meses húmedos los cuales se ven claramente representados en la siguiente figura de mapas de precipitación útil mensual, originados mediante las diferencias entre los mapas de precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual. Cuando las lluvias son

mayores que la evapotranspiración se usan tonalidades azuladas y en los meses secos cuando es mayor la evapotranspiración se usan las tonalidades rojizas.

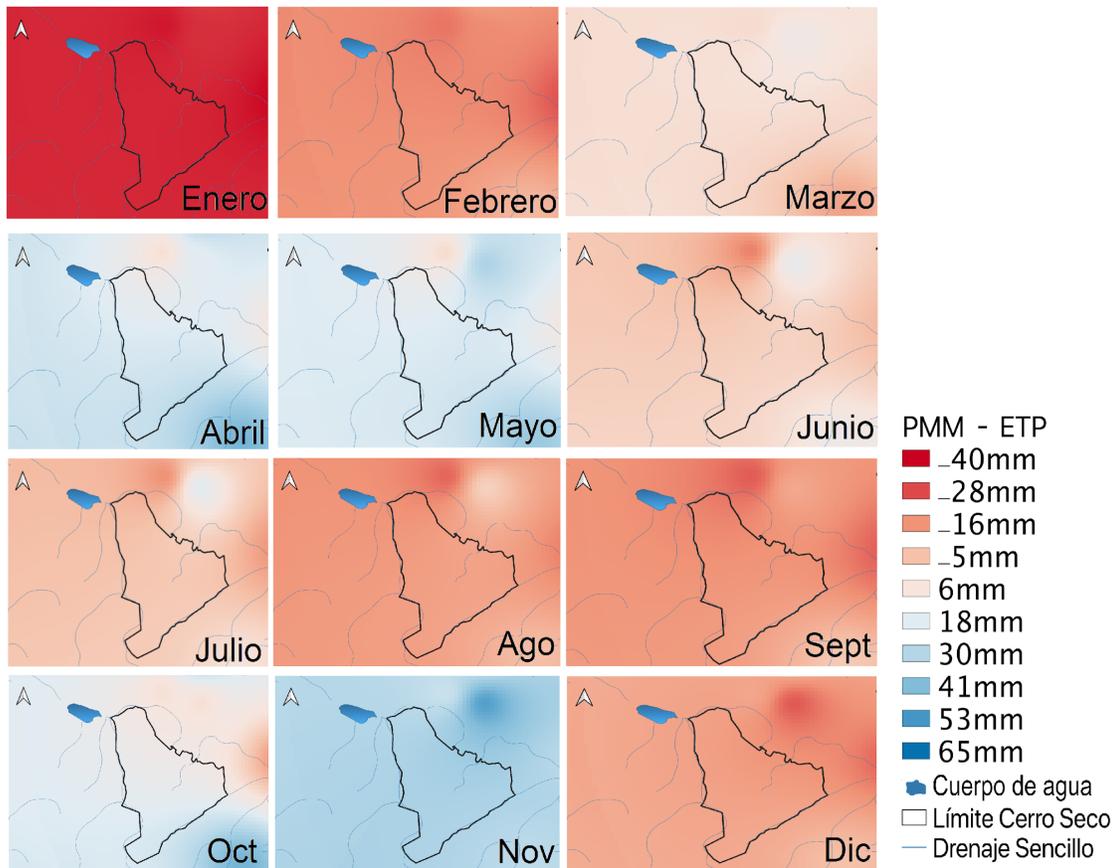


Figura 8. P-ETP: Mapas mensuales de Precipitación útil promedio mensual multianual, donde se representan la diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se evidencia que **los periodos húmedos, es decir cuando la precipitación excede la evapotranspiración, se presentan entre abril y mayo y entre octubre y noviembre. Principalmente en estos meses, cuando se presentan lluvias, son potencialmente útiles para la recarga.**

Este análisis simplificado evidencia la **relevancia de la conservación de las coberturas vegetales en la zona debido a la incidencia fundamental que tienen estas sobre los regímenes hidrológicos del ecosistema, pues es esta la que ejerce el control de la cantidad de agua que circula en el suelo superficial**, la cual al ser removida incrementaría la escorrentía, afectando la posibilidad de infiltración de agua en el suelo, además, de acuerdo con Márquez (2004), al cambiar las tasas de evaporación y de transpiración también se modifican los balances térmicos, con impacto sobre los regímenes de temperaturas, contribuyendo a la generación de ciclos hidrológicos con respuestas extremas e irregulares en los periodos de mayores o menores lluvias.

B. CONCLUSIONES COMPONENTE HIDROCLIMATOLÓGICO.

El comportamiento del clima en el sector de Cerro Seco, al igual que en gran parte de la ciudad de Bogotá se encuentra dominado principalmente por la confluencia de los vientos alisios del noreste y sureste, es decir la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La precipitación media anual en el periodo comprendido (1999-2020) se encuentra entre los 590 - 665 mm los cuales se presentarían en extremo sur de esta área de estudio, estos valores le atribuyen a Cerro Seco ser el área más seca de toda la ciudad de Bogotá, particularidad climática que lo configura como ecosistema subxerofítico

La evapotranspiración promedio anual multianual calculada mediante la fórmula de Thornthwaite en la zona de Cerro Seco evidencio que es junio el mes con mayores valores de evapotranspiración asociado directamente a los valores temperaturas reportadas para este mes seguido de periodos comprendidos entre marzo y abril donde el ecosistema tiene más agua disponible para evapotranspirar. Por lo tanto y de acuerdo al cruce de variables para el cálculo de la precipitación útil en la zona los periodos húmedos es decir cuando la precipitación excede la evapotranspiración se presentan abril y mayo y entre octubre y noviembre, es decir es principalmente en estos meses cuando se presenta una precipitación potencialmente útil para la recarga.

Se evidencia la relevancia de la conservación de las coberturas vegetales en la zona debido a la incidencia fundamental que tienen estas sobre los regímenes hidroclimáticos del ecosistema, pues es esta la que ejerce el control de la cantidad de agua que circula en el suelo superficial, la cual al ser removida incrementaría la escorrentía, afectando la posibilidad de infiltración de agua en el suelo.

3. COMPONENTE DE HIDROGEOLOGÍA

A. INTRODUCCIÓN

El presente aparte se ha elaborado con el objeto de estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas en Cerro Seco y su comportamiento a diferentes escalas. Se puede afirmar que esta zona se constituye como una zona de recarga de acuíferos en la sabana de Bogotá y adicionalmente permite la viabilidad ecosistémica del cerro, esto debido a los flujos se dan en diferentes escalas espacio-temporales, imposibles de separar. Adicionalmente, se puede ratificar el hecho de que dadas las condiciones de precipitación, ecosistémicas, recarga e inherentemente, por normativa, esta es una zona que requiere de protección especial (Ley 99 de 1993, Art. 1º) de manera que se protejan elementos renovables y no renovables del ecosistema y con ello asegurar agua, flora y fauna para esta generación y las venideras.

En este aparte se presentan las principales conclusiones de un trabajo continuo basado en: 1) información secundaria levantada por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), 2) información primaria levantada por Terrae aplicando metodologías orientadas al estudio del agua subterránea a diferentes escalas espacio temporales, y 3) recopilación de información de geología estructural e hidrogeológica que permita dar contexto sobre la Sabana de Bogotá. Teniendo en cuenta esto el aparte de aguas subterráneas se ha dividido en tres secciones: en la primera se desarrolla el contexto de antecedentes y la revisión de datos que constituyen la base de las hipótesis de este trabajo; la segunda complementa la información secundaria obtenida en la primera sección junto con levantamiento en campo de información primaria de geología estructural e hidroquímica, adicionalmente, en esta sección se presenta el procesamiento de la información enfocada en huella química del agua y la generación de parámetros hidráulicos, para entender los caminos del agua; en la tercera sección se presenta un modelo que suma variables ponderadas en función a la susceptibilidad de infiltración de agua en suelo y subsuelo, lo cual nos permite entender la importancia de esta zona en los procesos de flujos de agua subterráneos.

B. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y SOBRE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Los estudios sobre geología estructural en la Sabana de Bogotá, han propuesto múltiples zonas de deformación con intenso fracturamiento (Velandia & Bermoudes, 2002¹⁰ e IDEAM – MAVDT¹¹, 2010, entre otros) y que particularmente para el sur de Bogotá ha sido propuestas por Fierro & Ángel,

¹⁰ Velandia, F.A. & De Bermoudes, O. (2002). Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia. Boletín de geología. Vol. 24, No. 39. UIS.

¹¹ IDEAM – MAVDT (2010). Estudio criterios técnicos para la evaluación ambiental, social y territorial de la Sabana de Bogotá y proponer la redefinición de zonas ambientalmente compatibles con la actividad minera. Caracterización Escala 1:100.000. Bogotá.

2008¹², Fierro & Bernal, 2008¹³, Casallas, 2008¹⁴, Ángel et al., 2012¹⁵ y Ordoñez, 2014¹⁶. Dichas zonas de roca fracturada, en muchos casos, pueden funcionar como lugares donde el agua preferiblemente encuentre conductos para infiltrarse a través de los materiales superficiales y constituir estructuras fundamentales para el ciclo zonal o regional del agua. Sin embargo, la relación que existe entre las fracturas y las zonas de recarga de acuíferos no se encuentra bien estudiada o entendida en la Sabana de Bogotá.

Sobre la información disponible en el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se puede enmarcar la zona de Cerro Seco sobre dos unidades hidrogeológicas principalmente. La primera de ellas denominada NgQ, que se compone de materiales no consolidados a poco consolidados de espesores variables a lo largo de la Sabana de Bogotá. La segunda unidad se denomina Kg, compuesta por las rocas del Complejo Guadalupe, las cuales, según Velandia y Bermoudes (op. cit.), el SGC (2002)¹⁷ y la SDA (tanto en los trabajos de Fierro¹⁸ (2008) como en los de Velosa¹⁹ (2013) y Universidad Javeriana²⁰ (2018)), son materiales que permiten infiltración de agua superficial, categorizando sus afloramientos como zonas de recarga para aguas subterráneas. El complejo acuífero Guadalupe (SGC, 2002), tiene propiedades hidráulicas con parámetros de conductividad que oscilan entre 0,02 y 2,0 m/día.

Para Cerro Seco, el predominio en área que existe de la unidad hidrogeológica Kg (Complejo Guadalupe) en el subsuelo se puede traducir en potenciales zonas de recarga por la composición de los materiales expuestos en superficie, lo cual también se puede sumar a la condición de fracturamiento intenso (debido a la presencia de las fallas geológicas y las complejas redes de fracturas que evidencian en la literatura y como se puede ver en los análisis de modelos de elevación digital de terreno y en el trabajo de campo). Esta hipótesis parece acomodarse bien inicialmente con la observación en terreno de estas condiciones, sin embargo, es importante recalcar que la zona necesita estudios litológicos y estructurales detallados para una correcta evaluación hidrogeológica.

¹² Fierro Morales, J. & Ángel Amaya, J. (2008). Tectónica activa y amenaza sísmica para la ciudad de Bogotá. Memorias XIII Congreso Latinoamericano de Geología.

¹³ Fierro Morales, J. & Bernal, J. (2008). Analisis morfotectonico de la sabana de Bogotá a partir de sensores remotos. Memorias XIII Congreso Latinoamericano de Geología.

¹⁴ Casallas, W. (2008). Caracterización de la deformación frágil en la parte norte del flanco occidental del Sinclinal de Usme. Localidad de Ciudad Bolívar. Trabajo de grado Geología. Universidad Nacional de Colombia.

¹⁵ Angel Amaya, J., Fierro Morales, J., Ordoñez Potes, M. & Blanco, M. (2012). NW transverse fault system in Southern Bogotá, Colombia: New seismologic and structural evidences derived from focal mechanisms and stress field determination. AGU Fall Meeting Abstracts.

¹⁶ Ordoñez, M.C. (2014). Influencia de las fallas transversales en el comportamiento de ondas sísmicas en el sur de la Sabana de Bogotá. Tesis de maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

¹⁷ Servicio Geológico Colombiano (2002). Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. Enlace de información geográfica: http://srvags.sgc.gov.co/Jsviewer/Modelo_Hidrogeologico_Conceptual_Sabana_BOGOTÁ/.

¹⁸ Fierro Morales, J. – SDA. (2008) Geología de la zona denominada parque minero industrial Mochuelo (Localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.). Contrato 525 de 2008. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente.

¹⁹ Velosa Franco, J. – SDA (2013). Sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital. OPS 723 de 2012. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente.

²⁰ Universidad Javeriana – SDA (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del Distrito Capital. Convenio de asociación No SDA-CV 20161264. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente.

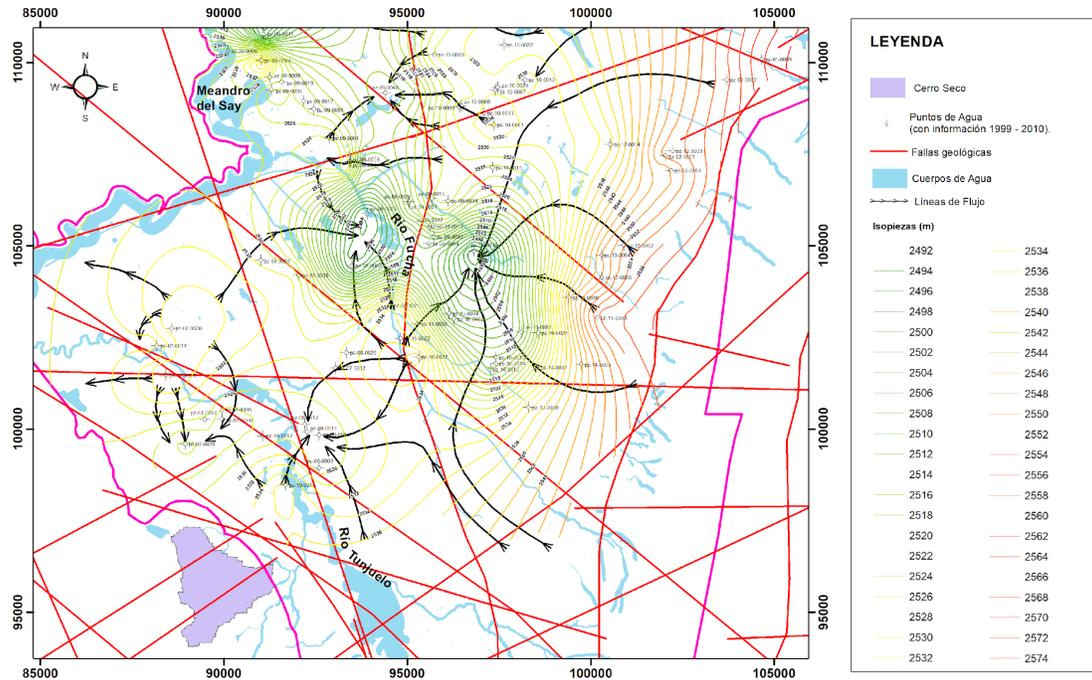


Figura 9. Mapa que relaciona el promedio de contornos de agua subterránea (isopiezas) tomadas de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y elementos tectónicos como fallas y alineamientos (tomados de la SDA y Ordoñez (2014). También se ubica la zona de Cerro Seco dentro de este contexto hidrogeológico y estructural. Fuente: Elaboración propia con datos de Velosa-SDA (2013) y Ordoñez (2014).

En los anteriores párrafos se han expuesto brevemente algunas condiciones de terreno y geológicas que apuntan a pensar que existe la posibilidad de infiltración de agua superficial hacia unidades o estructuras geológicas subterráneas que pueden captarla, albergarla y conducirla hasta un punto de salida o descarga. Químicamente es posible seguir ese rastro de la dinámica del agua cuando se ha infiltrado y recorrido las rocas en profundidad. Una medida que ayuda a los hidrogeólogos a conocer estos procesos es la de la conductividad eléctrica del agua. Cuando el agua pasa a través de la roca es capaz de disolver o transportar iones que aumentan la concentración de elementos conductibles, esto puede reflejarse con valores relativos elevados a los normales de agua lluvia (agua que no ha discurrido a través de la roca).

Adicionalmente los flujos de agua de tipo subsuperficial en la zona sur de la ciudad (en el recuadro verde de la siguiente figura) muestran tendencias de dirección hacia la zona de la sabana de Bogotá. Obsérvese que una de las flechas dentro del recuadro se dirige hacia el NE, indicando que la dirección de flujo de la zona norte de Cerro Seco se dirige hacia la sabana.

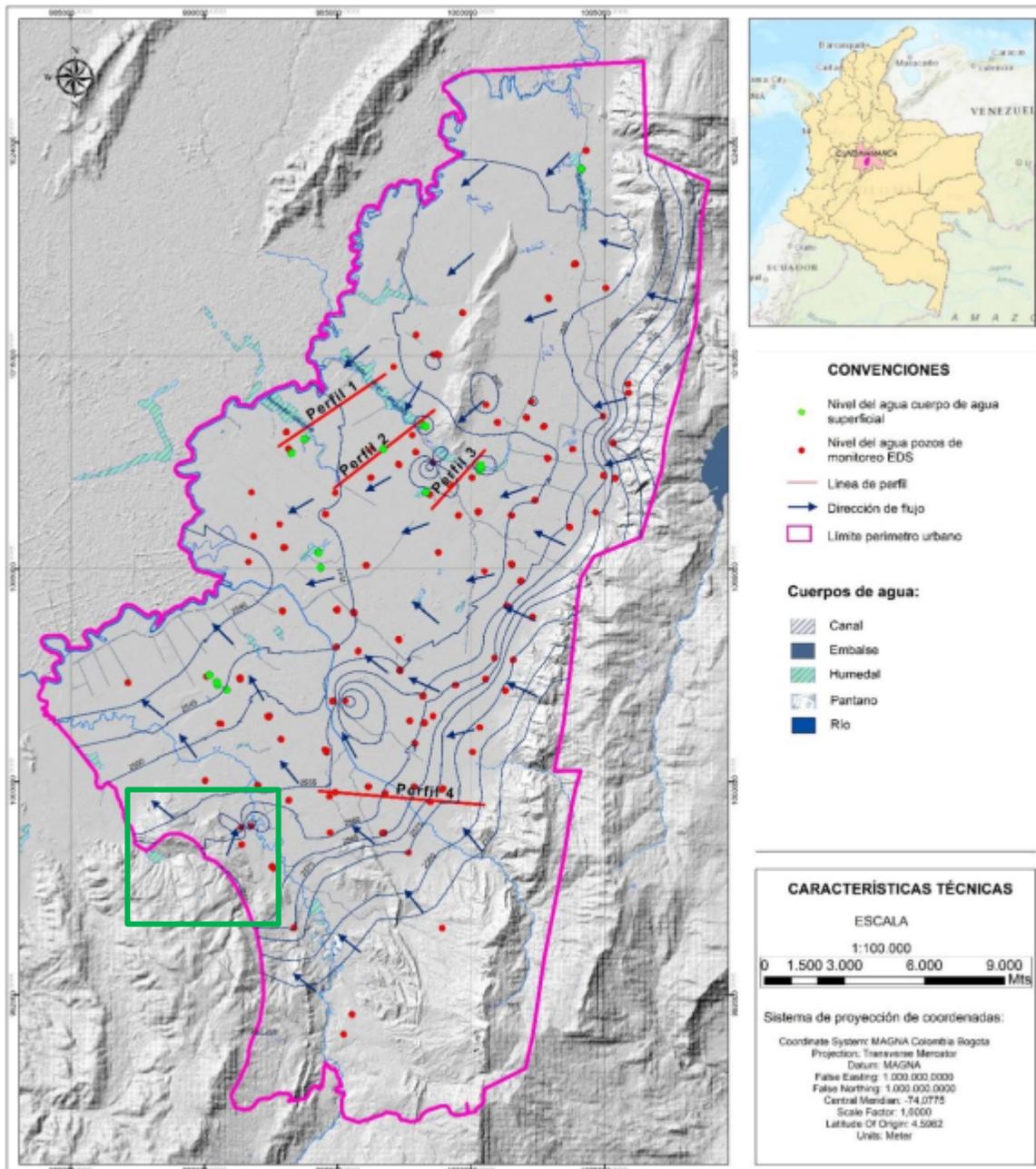


Figura 10. Mapa de isopiezas subsuperficiales en el Distrito Capital. En el recuadro verde se enmarca la zona de estudio.
 Fuente: Modificado de PUJ-SDA (2018).

En este sentido, Velosa, en su trabajo para la Secretaría Distrital de Ambiente (2013), dentro de la cartografía presentada para la evaluación química del agua adjunta un diagrama de colores con la conductividad eléctrica, la cual muestra en colores verdes las zonas donde la conductividad es relativamente baja representando una corta exposición o ninguna a través de la roca. Así mismo, en colores amarillos y rojos se representan valores de conductividad relativa intermedio y alta, respectivamente, lo cual puede reflejar un tránsito más largo dentro de la roca. Es importante

aclarar que los valores altos de conductividad no necesariamente indican infiltración y flujo por la roca, estos valores pueden variar debido a la interacción con otras variables ambientales.

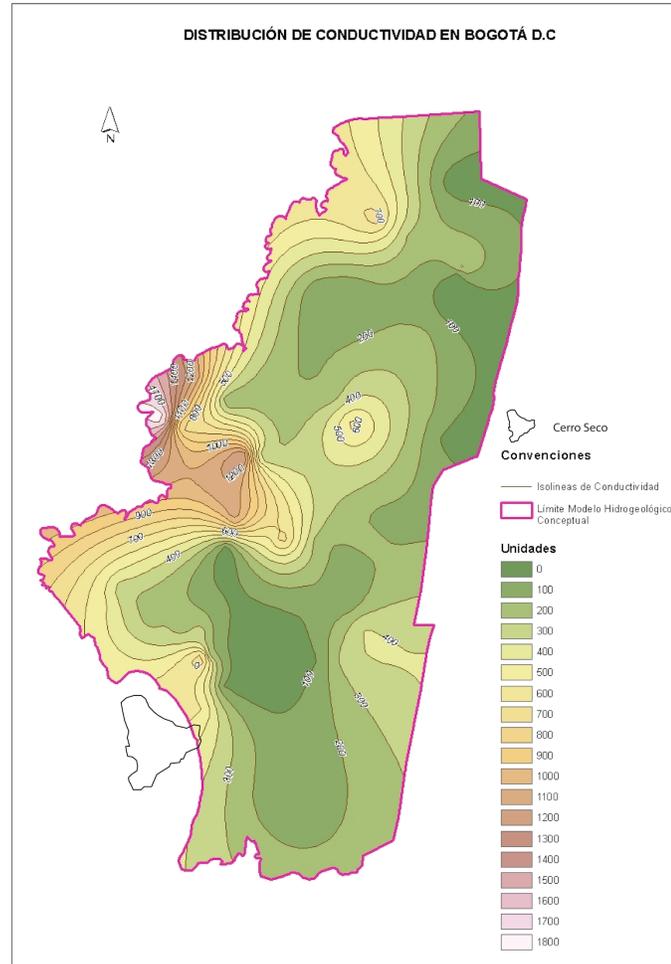


Figura 11. Distribución de conductividad en la Sabana de Bogotá. Los colores representan las concentraciones de conductividad, siendo el verde el de menor concentración y el rojo el de mayor. Nótese que, en la zona sur, donde limita el área de Cerro Seco (área en azul), el análisis parece mostrar una tendencia de crecimiento de la conductividad hacia Cerro Seco indicado por los tonos de amarillo y naranja de los contornos. Fuente: modificado de Velosa-SDA (2013).

En el estudio hidrogeológico del convenio entre la Universidad Javeriana y la SDA en el 2018 (PUJ-SDA, 2018²¹), se muestra que las conductividades eléctricas cercanas a la zona de descarga del sistema de acuífero propuesto para Cerro Seco contienen valores intermedios oscilando entre 200 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tomado de la distribución espacial de valores de la conductividad, siguiente figura). Esto complementa la información sobre el potencial de recarga sobre la zona de estudio.

²¹ Pontificia Universidad Javeriana & Secretaría Distrital de Ambiente (PUJ-SDA), (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del distrito capital.

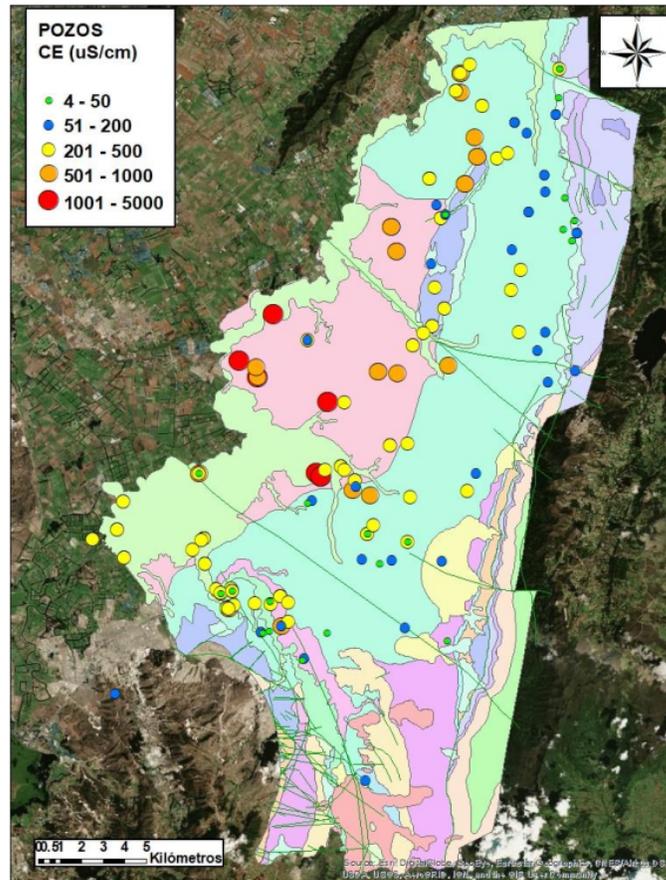


Figura 12. Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica medida en los pozos establecidos para el modelo hidrogeológico de la sabana de Bogotá. Fuente: PUJ-SDA (2018).

Ambas fuentes oficiales citadas anteriormente muestran que los valores de conductividad pueden indicar la posibilidad de potencial de infiltración de agua desde Cerro Seco hacia el sistema de acuíferos de la Sabana de Bogotá, lo cual refuerza la necesidad de su establecimiento como área protegida y que es necesaria su conservación en el marco de los principios de precaución y prevención y del carácter de protección que la normativa vigente le da a las zonas de recarga de acuíferos.

i. Modelo hidrogeológico: algunas hipótesis sobre el flujo de agua subterráneo

Algunas de las hipótesis que se construyen en esta sección se basan principalmente en varios conceptos que se explican a continuación.

1. Flujo en el medio poroso - interacción entre depósitos y rocas

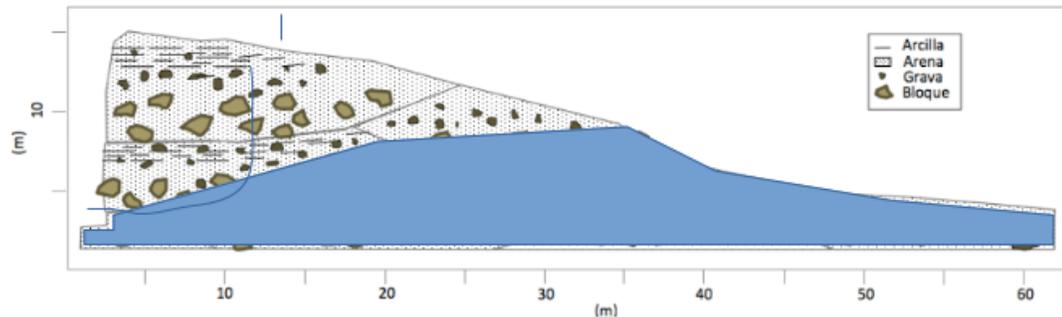


Figura 13. Perfil que muestra la relación entre los materiales y el nivel de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia.

Los depósitos se constituyen en zonas en las que el flujo puede estar en el orden de magnitud de 10^{-5} a 10^{-2} m/s y la roca puede tener conductividades hidráulicas incluso del orden de 10^{-9} m/s (Singhal & Gupta, 2010)²². Dadas las diferencias de magnitud entre el comportamiento hidráulico, es posible encontrar que esas diferencias marcan un contacto que actúa como tanque o almacén del agua.

Este comportamiento se puede ver incluso en depósitos de tipo aluvial en donde se tiene intercalaciones entre zonas más arcillosas y zonas arenosas, conformando así un contacto entre materiales de diferentes conductividades.



Foto 1. Fotografía de depósitos y suelos en la región de Chingaza (Fuente, Quintero, 2015²³)

²² Singhal & Gupta, (2010), Applied hydrogeology of fractured rocks, Springer.

²³ Quintero Chavarría, E. (2015). Potencial espontáneo asociado a la propagación de fluidos en medios porosos: modelamiento e inversión. Tesis de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

En observaciones de campo, mediante el uso de propiedades organolépticas puede identificarse dichas zonas de contacto, a forma de ejemplo, en la fotografía anterior se ilustra un depósito de las zonas de Chingaza en la que las aguas tienen una importante presencia de hierro en sus dos formas Fe^{2+} y Fe^{3+} . De esta manera, el hierro dentro del medio poroso se encuentra en condiciones anaeróbicas o reductoras y una vez sale y entra en contacto con el oxígeno se precipita, en este caso da una señal de color rojizo. Por tanto, esta dinámica se puede ver en el contacto de las zonas menos arcillosas y las constituidas por partículas de mayor tamaño de grano.

2. Flujo en medio fracturado

Los medios fracturados tienen dos tipos de comportamiento asociado con un concepto usado típicamente en modelaciones hidrogeológicas y se refiere al volumen elemental de referencia, es implícitamente si en una zona se puede lograr desligar los efectos de pequeña escala con los de el mismo fenómeno pero a escalas mucho mayores. En este caso sería equivalente a preguntarse si lo que pasa en cerro seco, en términos de agua, se queda en Cerro Seco o si por el contrario dichos efectos tiene una incidencia tal que puede llegar a afectar el buen vivir de la población de Bogotá que usa, mediante pozos, una fuente de agua resilientes a los cambios climáticos.

Esto se ilustra conceptualmente en la siguiente figura en donde se puede ver la interacción de flujos a escala regional en una región de Francia, en este caso se conforman zonas de intensa deformación asociadas a las fracturas en las cuales se tiene un volumen elemental de referencia constituyendo grandes redes de tuberías que permiten la conexión de zonas de recarga, o con mayor nivel de energía, y las zonas de bajo nivel de energía, en muchas ocasiones ubicadas a menor altura.

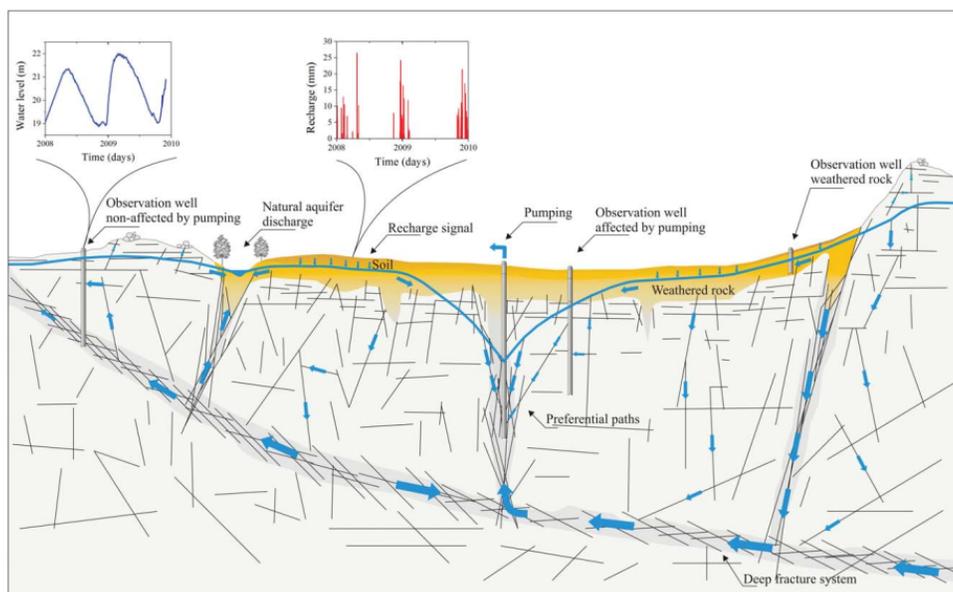


Figura 14. Esquema conceptual de acuíferos fracturados. Red de fracturas que son caracterizadas a múltiples escalas. La longitud de las flechas representa la contribución relativa del flujo en las diferentes estructuras. Fuente: Jimenez-Martinez et al. (2013).

Un caso local es el túnel de La Línea en donde el sistema de fracturas resultó estableciendo conexión entre el túnel y la red de aguas subterráneas, generando la desecación de los cuerpos de aguas superficiales.

3. Interacción cuerpos de agua superficial con aguas subterráneas

Estas interacciones se dan por el nivel de energía que tiene un depósito con respecto a los cuerpos de agua, es decir, si el nivel de agua se encuentra por encima del nivel de agua del río existe una alta probabilidad de que los cuerpos de agua superficial se encuentren recibiendo un flujo de agua proveniente del medio poroso, este comportamiento se puede ver en la siguiente figura.

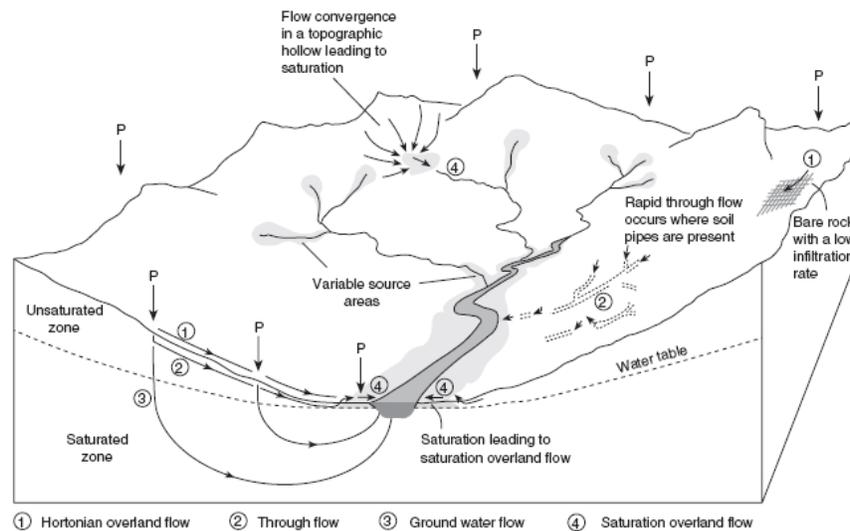


Figura 15. Bloque diagrama donde se muestra la relación del agua subterránea y el agua de escorrentía a lo largo de un curso de agua. Tomado de Charlton (2008).

En la otra dirección la interacción también es posible, es decir, que los ríos aporten a los acuíferos. Una forma preliminar de ver estas interacciones se refleja en las señales registradas de caudales en donde se puede ver los efectos de las lluvias sobre los niveles de agua que pueden ser del orden de minutos a horas y los flujos en el medio poroso que puede ser del orden de horas o mayores.

C. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

1. Corto plazo - Flujos e interacción lluvias

Teniendo en cuenta estos conceptos los flujos de agua se encuentran a diferentes escalas espaciales y temporales, dichos flujos pueden ser de corto periodo lo que equivale a tiempos del orden de días a semanas en los que de darse una lluvia tardará en alimentar o viajar dentro de la tierra cortos periodos de tiempo. Tal es el caso de la laguna Encantada y las quebradas ubicadas en el área de estudio dadas las interacciones entre la vegetación, los depósitos y suelos, y los cuerpos de agua superficial. Un ejemplo de esto son las quebradas y la laguna Encantada ubicadas directamente en el área de estudio, esto quiere decir que potencialmente la vegetación y los depósitos que se ilustran en la siguiente figura ayudan al abasto de aguas superficiales de la red de aguas.

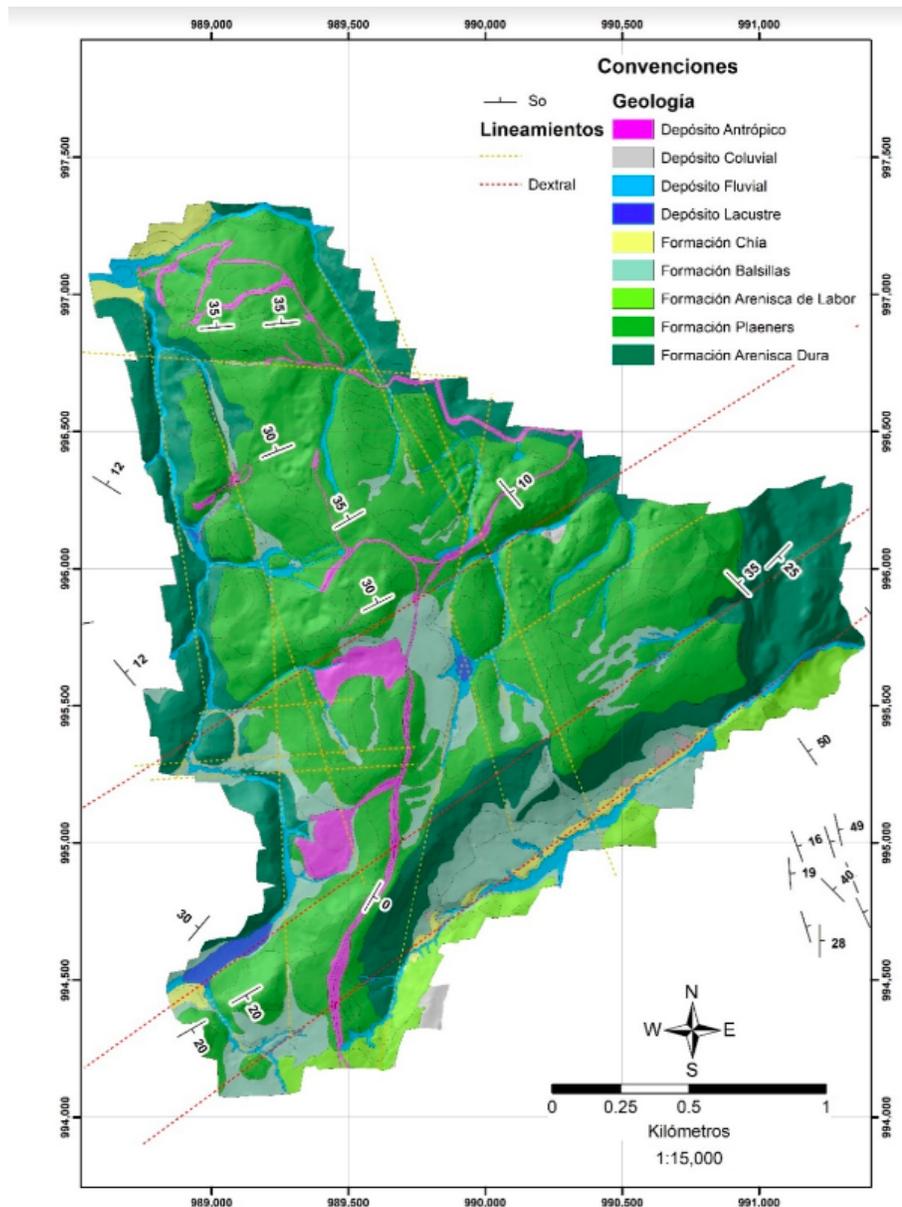


Figura 16. Mapa geológico con elementos estructurales y drenajes en el área de Cerro Seco. Fuente: Elaboración propia.

La dinámica de estos acuíferos que se encuentran relativamente someros con respecto a la superficie funciona permitiendo el flujo hacia zonas de descarga de agua no tan lejanas de la zona de recarga. Una de las hipótesis que en este informe se desarrolla es la descarga de estas aguas que alimentan las quebradas y lagunas que se encuentran en Cerro Seco.

En cuanto a los drenajes presentes en el área de estudio, que serían los cuerpos de agua producto de la descarga de las aguas subsuperficiales, de tipo lóaticos, se ha observado que el comportamiento se relaciona directamente con los periodos de lluvia anual, es decir, son drenajes intermitentes estacionales y responden a escorrentía cuando los perfiles de materiales geológicos se encuentran parcialmente saturados. Por parte de los cuerpos de tipo léntico, se encuentra que algunos permanecen por periodos de tiempo mayor, el mejor ejemplo de la zona es la laguna Encantada. Así

mismo, dentro del cauce de drenaje también se pueden encontrar charcas que permanecen con agua durante periodos de tiempo más largos, esto reforzar esta hipótesis de flujos subsuperficiales que mantienen estos cuerpos de agua.

2. Interacciones de largo plazo

Debido a las diferencias de altura que existen entre la sabana y Cerro Seco existe alta probabilidad de tener flujos de agua de largo periodo. Esto se ilustra en la siguiente figura en donde se puede ver la diferencia de nivel que existe entre la zona de estudio y la sabana de Bogotá, así como también la interacción de flujos de agua a través de los materiales en superficie y esquemáticamente a través de las zonas de deformación local.

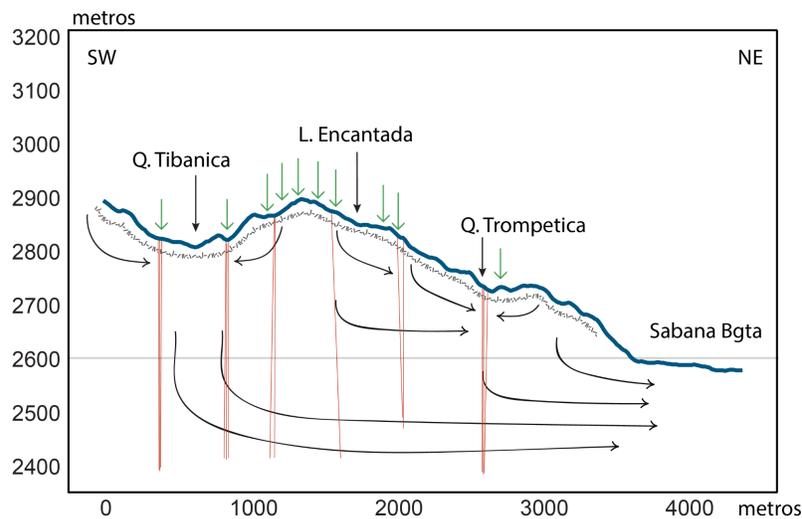


Figura 17. Perfil esquemático de la interacción de flujos de agua subsuperficiales y subterráneos propuestos para la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Los caminos que ligan tanto la parte alta o zona de estudio y los de la parte baja se encuentran asociados con las porosidades de las formaciones geológicas y de otra parte un aporte implícito asociado a la red de fracturas en la zona. Adicionalmente, de darse las condiciones de recarga en el área de estudio, tales como: conexión de la red de fracturas, conductividad hidráulica y densidad de fracturamiento alta; se favorece el desarrollo de flujos desde la parte alta o zona de estudio hasta zonas como la de la Formación Sabana.

En este sentido se ha calculado la densidad de líneas que corresponden a la recopilación e interpretación de elementos tectónicos. Estas densidades dejan ver, las zonas más densamente pobladas por la intersección de alineamientos. Este análisis preliminar de densidades ayuda a establecer que estas zonas en color rojo son más propensas a permitir las conexiones de fracturas y a su vez el flujo de agua a través de ellas. Nótese en la figura de densidades (capítulo de Validación del modelo hidrogeológico) que en la zona del centro de Cerro Seco se encuentra el área más densamente poblada por la interacción de alineamientos.

Para la evaluación de las zonas de recarga, la información disponible establece que regionalmente la unidad hidrogeológica aflorante (Grupo Guadalupe) funciona como acuífero (Modelo Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá, 2013). Así mismo, los valores de conductividad y

concentración del anión cloruro hallados por la SDA (2013), muestran tendencias en la que aumenta a medida que se acerca a la zona de Cerro Seco.

DISTRIBUCIÓN DE CLORUROS EN BOGOTÁ D.C

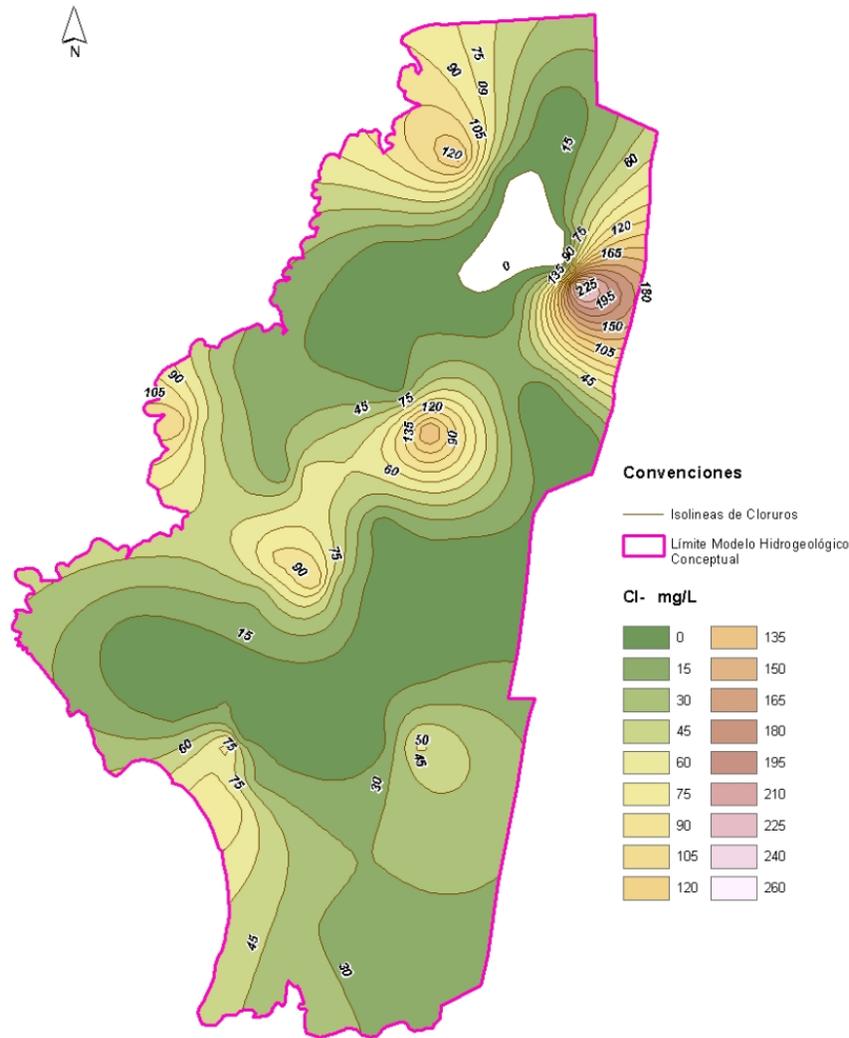


Figura 18. Distribución del ion cloruro a lo largo de la Sabana de Bogotá. Fuente: Velosa - SDA (2013).

Según Singhal y Gupta (2010), la concentración del ion cloruro ayuda a interpretar las direcciones de flujo del agua subterránea. Siendo que dicha dirección se establece a medida que dicho ion se concentra en el agua. Sobre la figura anterior y teniendo en cuenta la ubicación del río Tunjuelo y Bogotá, se espera que esas zonas sean más concentradas en el ion cloruro debido a que estos drenajes son los que funcionan como nivel base local.

En el trabajo de la Universidad Javeriana y la SDA (2018), también se reconocen flujos a diferentes profundidades como se puede observar en la siguiente figura, nótese que los flujos intermedios y regionales marcan la tendencia de flujos que acá se denominan de largo plazo. El perfil de la

siguiente figura corresponde a flujos interpretados en una sección un poco más al norte de la zona de estudio, sin embargo, evidencia la relación de las zonas altas (cerros) de recarga y los flujos de descarga sobre la sabana de Bogotá.

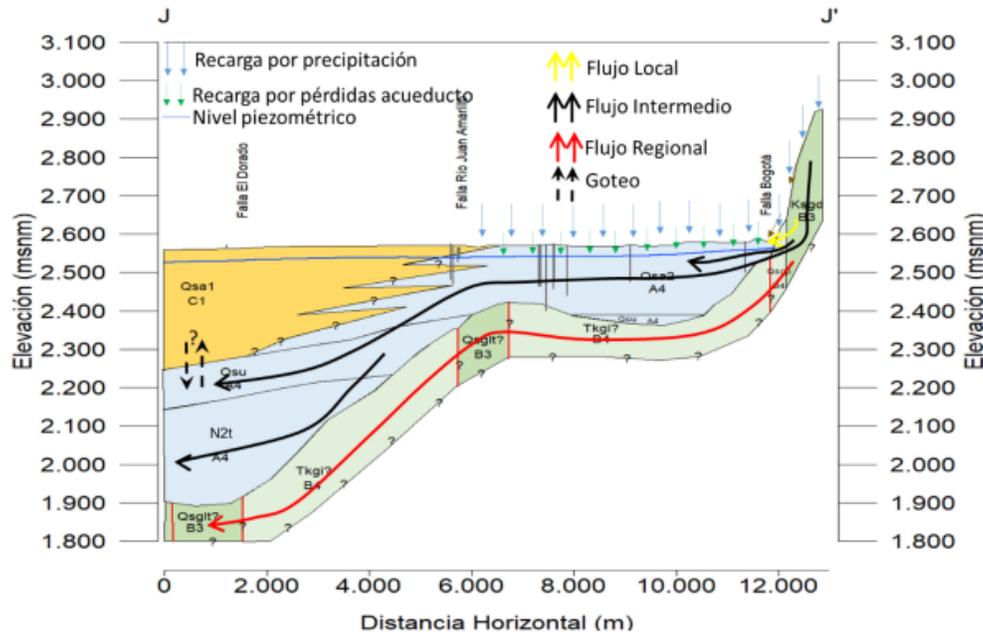


Figura 19. Perfil esquemático de flujo de agua subterránea producto del modelamiento en el trabajo de PUJ-SDA (2018).

Como se menciona más adelante en el capítulo 3.4.1 Hidrogeoquímica a partir de las muestras de hidrogeoquímica de aguas superficiales que se tomarán en este proyecto, se evaluará el comportamiento de este elemento y su relación con los ríos mencionados anteriormente. Lo que se propone como hipótesis en relación con esto, es que este ion puede verse en concentraciones mayores en las muestras de agua de las quebradas más cercanas al río Tunjuelo, significando que estas aguas puedan recorrer la roca de forma subterránea.

3. Flujos de agua en la sabana de Bogotá

Los estudios hidrogeológicos para la sabana de Bogotá han mostrado que los flujos de agua de largo tránsito se encuentran relacionados a sistemas de recarga en la zona de los cerros orientales y de descarga hacia el occidente, sin embargo, hacia la zona sur los flujos tienden a ser más complejos, la zona topográficamente más alta también tiene potencial para entrar a sumar a las zonas de recarga para el sistema de la sabana. En este estudio se muestran argumentos que apoyan esta última hipótesis específicamente en la zona de Cerro Seco.

Algunos autores han trabajado sobre el cálculo de la infiltración o recarga media para todo el sistema de la sabana de Bogotá. Estas estimaciones fueron hechas principalmente a partir de métodos de balance hídrico con información de precipitación y evapotranspiración. En la siguiente tabla se resumen los valores de infiltración media anual en milímetros de los trabajos principales consultados para este trabajo.

Tabla 4. Resumen de los valores de recarga en milímetros de estudios de fuentes estatales y de privados para la sabana de Bogotá. Elaboración propia.

Publicación	Institución	Recarga (mm/año)	Método
1986. Rodríguez. Evaluación cuantitativa del acuífero de la sabana de Bogotá.	CAR	8	Balance hídrico
2000. HIDROGEOCOL. Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santafé de Bogotá.	DAMA	13	Balance hídrico
2002. INGEOMINAS. Modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá.	INGEOMINAS	30	Balance hídrico
2003. JICA-EAAB. Estudio del desarrollo sostenible del agua subterránea en la sabana de Bogotá en la República de Colombia.	JICA-EAAB	81	Metodología de la organización para la agricultura y la alimentación (FAO)
2011. Antonio & Obregón. Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá	Artículo	112	Modelo a,b,c,d (Balance hídrico)
2013. Veloza, J.A. Sistema de modelamiento hidrogeológico del distrito capital Bogotá	SDA	70	Balance hídrico
		147	Método de Cheeturvedi
		153	Mapa isorecarga potencial
2018. PUJ-SDA. Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del distrito capital.	PUJ-SDA	143	Balance de cloruros

Las diferencias en la estimación de la recarga anual pueden deberse parcialmente a las diferentes bases de cálculo utilizadas o también puede ser debido al método utilizado.

Estos resultados muestran una gran variación de los valores de recarga promedio para la sabana de Bogotá, en el estudio de Velosa-SDA (2013), para la cuenca baja del río Tunjuelo se calculan valores de 0 a 50 mm/año, donde se pueden presentar hasta valores que presentan déficit entre -50 a -200 mm/año. En el capítulo de hidrología del presente informe se detallarán mejor los valores de precipitación y la estimación de evapotranspiración de trabajos previos y de la información que existe en la zona de estudio.

De igual forma, dadas las estimaciones de PUJ-SDA (2018) para la recarga natural del acuífero de la sabana de Bogotá (siguiente figura) se puede interpretar que las zonas al sur de la ciudad, cerca a la ubicación de Cerro Seco, tienen valores estimados entre 6 y 120 mm/año, representados con colores verdes a azules que significan recargas moderadas a altas, coherentes con lo que se está encontrando en el trabajo a escala detallada.

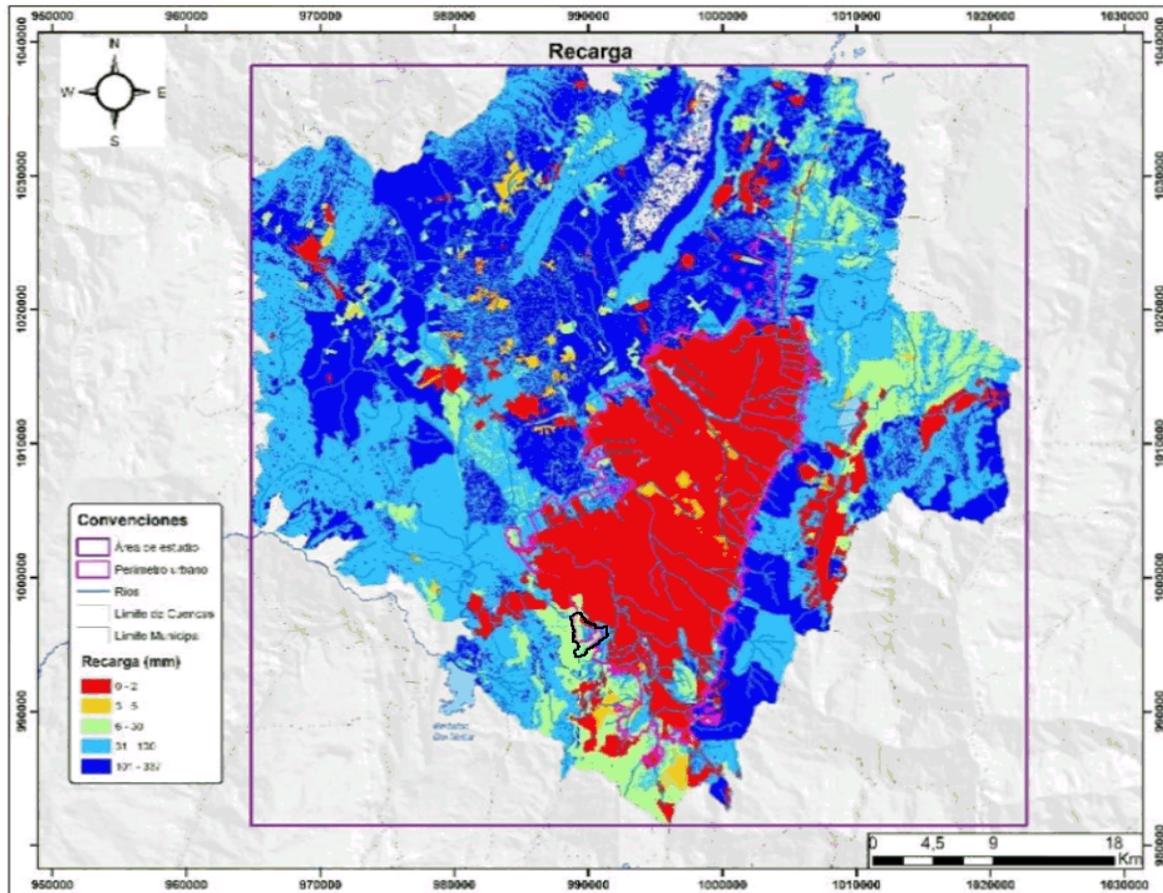


Figura 21. Recarga natural sobre el modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá. Fuente: PUJ-SDA (2018).

Dentro de la sabana es bien conocido el papel que juegan los flujos de aguas subterráneas, dichos flujos y niveles han sido cartografiados por la SDA (antiguo DAMA) en los diferentes modelos hidrogeológicos para la ciudad (2000, 2013 y 2018), la pregunta que queda es ¿qué tan significativo es el aporte de aguas o recarga directa de los depósitos ubicados en la sabana de Bogotá?

D. VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL

En la sección anterior se expuso de forma resumida la información que se utilizó para la elaboración de las hipótesis de flujo de agua subterránea en el área de Cerro Seco, los conceptos necesarios para poder exponer correctamente los análisis presentados a continuación, y el contexto de la hidrogeología de la sabana de Bogotá. Dado todo lo anterior, en esta segunda sección se presentan los análisis y resultados realizados con el objetivo de validar las hipótesis de flujo de agua subterránea planteadas anteriormente.

La validación se realiza principalmente bajo tres componentes: 1) análisis de la geología estructural dentro del área de influencia con miras a procesar la información de fracturas recopilada y levantada en trabajos de campo, 2) modelamiento hidráulico de los materiales expuestos dentro del área de Cerro Seco, y 3) caracterización hidroquímica de muestras de agua tomadas en cuerpos lénticos dentro del parque de Cerro Seco.

Es importante resaltar que estos análisis y resultados fueron usados como insumos para el modelamiento de la susceptibilidad a la infiltración presentada en la última sección de este informe.

i. Interpretación y ajuste de información estructural

Con miras a entender la dinámica de las aguas subterráneas a diferentes escalas se ha complementado el análisis a escala regional. La base principal de la información se encuentra relacionada con las interpretaciones previas recopiladas en el trabajo de Fierro & Bernal (op. cit.), Fierro & Ángel (op. cit.), Ordoñez (op. cit.) que en su tesis de Maestría compiló información de geología estructural de Terrae y de Julio Fierro desde 2008 hasta 2014, así como la información levantada por la Corporación Geoambiental TERRAE en la zona de Cerro Seco.

A esta información se le ha agregado las interpretaciones de fotografías aéreas y modelos de elevación digital realizadas en este proyecto. Las fotografías aéreas fueron seleccionadas bajo el criterio de escala (menor a 1:43.000 y mayor a 1:8.000), en esa franja las fotografías permiten la interpretación de alineamientos de tipo local y patrones de los mismo. En cuanto a los modelos de elevación digital (DEM), se ajustó la interpretación y combinó con la recopilación realizada para el informe de geología estructural en el periodo noviembre-diciembre de 2020.

En la siguiente figura se muestran sobre un modelo de elevación digital los alineamientos interpretados de fotografías aéreas y DEM, recopilados para este trabajo a partir de la base de la Corporación Geoambiental TERRAE y Ordoñez (op. cit.). Obsérvese la distribución de dichos alineamientos.

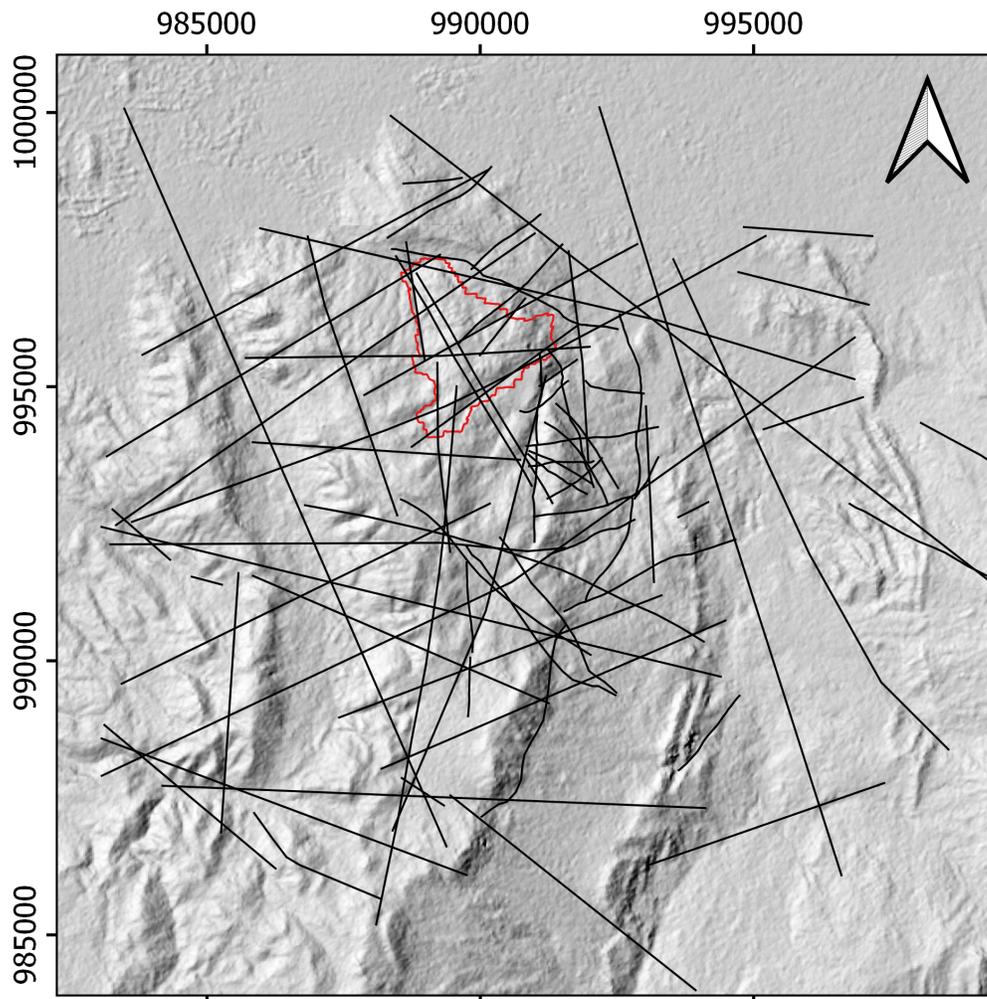


Figura 22. Modelo de elevación digital con interpretación de alineamientos a escalas aproximadas a 1:100.000.
Elaboración propia.

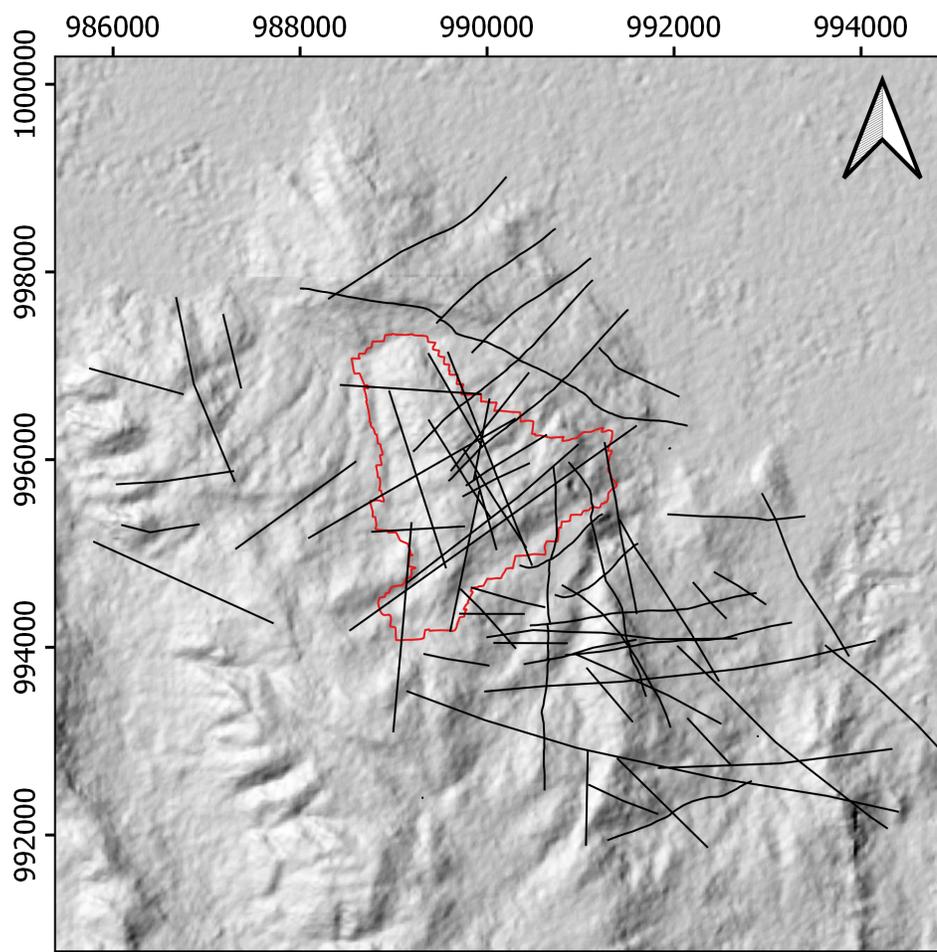


Figura 23. Modelo de elevación digital con interpretación de alineamientos a escala aproximada 1:50.000. Elaboración propia.

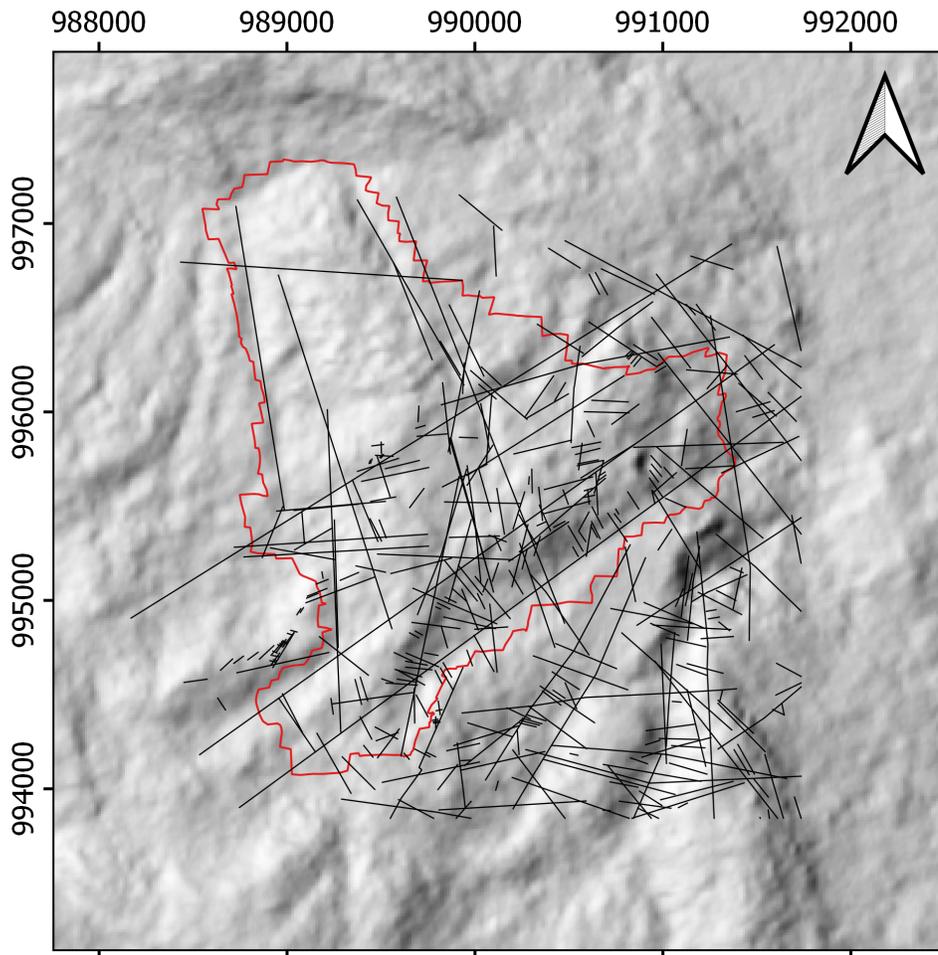


Figura 24. Modelo de elevación digital con el zoom de las estructuras locales a escalas igual o menor a 1:30.000.
Elaboración propia.

1. Histogramas de ventanas de muestreo, interpretación de alineamientos y pruebas de fractalidad

Adicional a la información de alineamientos se cuenta también con información levantada a escala de macizo con la metodología de ventanas de muestreo (Singhal & Gupta, 2010). Esta metodología permitió obtener información de longitudes a partir de la interpretación de fotografías de afloramiento, orientaciones de la medida de fracturas, y aperturas y rellenos. En las siguientes imágenes se presentan las fotografías e interpretaciones de las discontinuidades obtenidas en ellas.

El muestreo se realizó cubriendo todas las litologías aflorantes en el área de estudio, intentando cubrir espacialmente las zonas en las que se pudo tener acceso dentro de Cerro Seco. Las longitudes se calcularon de las líneas interpretadas con ayuda del programa AutoCAD y se usaron para las pruebas de fractalidad.

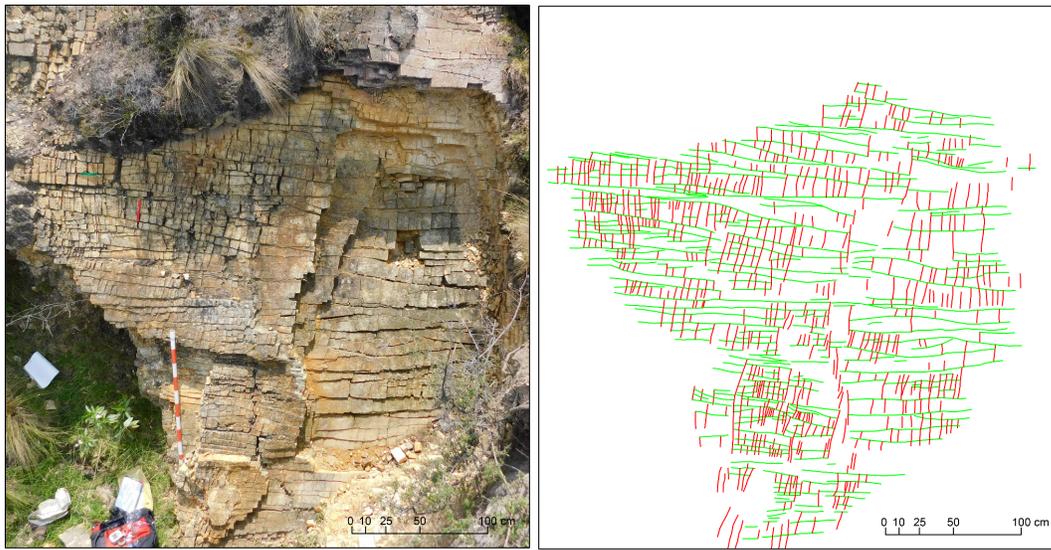


Figura 25. Fotografía y esquema de interpretación de fracturas bajo la metodología de ventana de muestreo para la Fm. Plaeners. Elaboración propia.



Figura 26. Fotografía y esquema de interpretación de fracturas bajo la metodología de ventana de muestreo para la Fm. Plaeners. Elaboración propia.

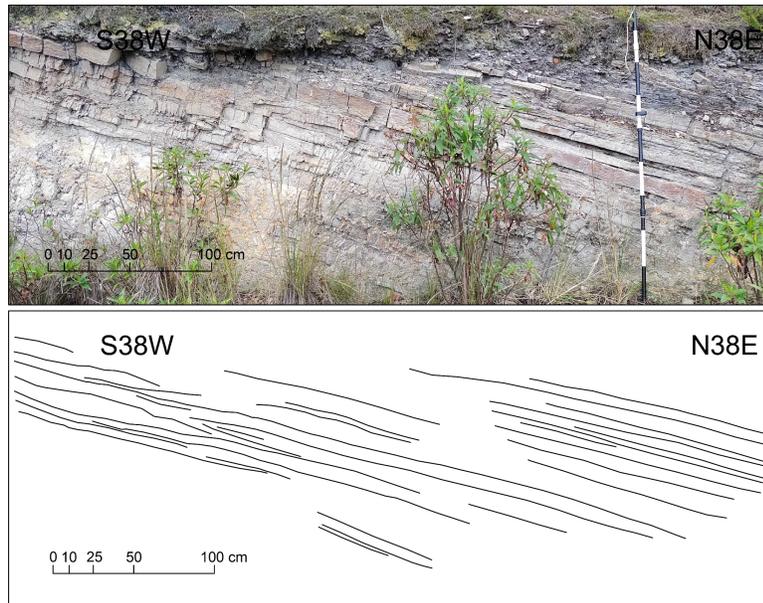


Figura 27. Fotografía y esquema de interpretación de fracturas bajo la metodología de ventana de muestreo para la Fm. Plaeners. Elaboración propia.

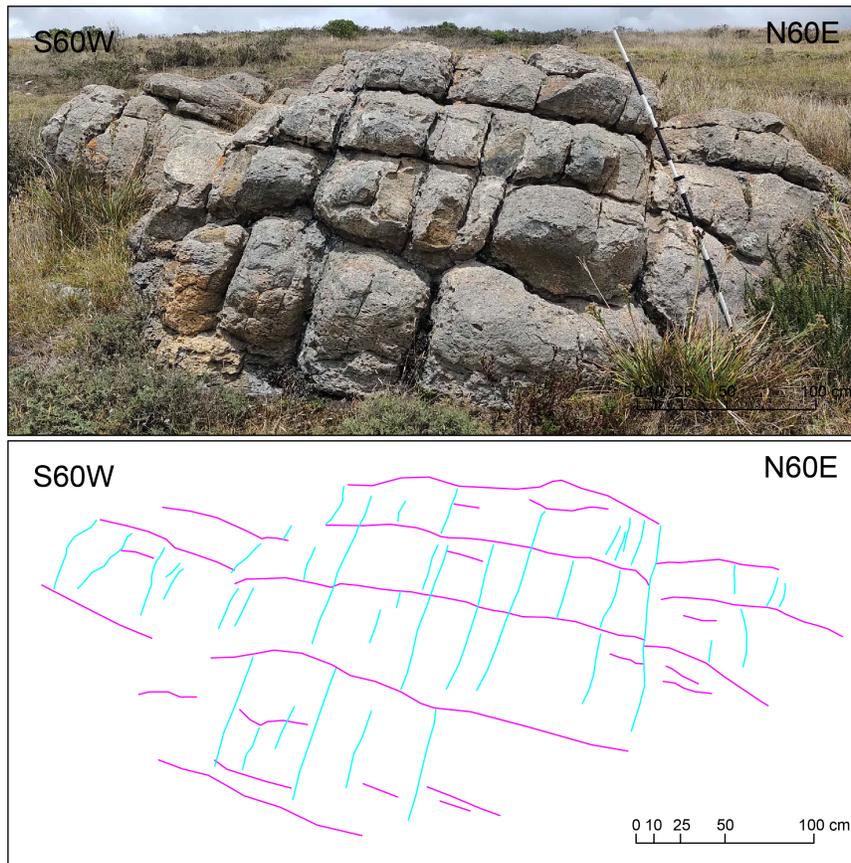


Figura 28. Fotografía y esquema de interpretación de fracturas bajo la metodología de ventana de muestreo para la Fm. Labor Tierna. Elaboración propia.

Una vez se obtuvieron estos resultados gráficos y analíticos de longitudes se procedió a elaborar la prueba de hipótesis de fractalidad, esto se realiza comparando dichas longitudes a diversas escalas. En las siguientes figuras se muestran las frecuencias de longitudes en metros de la interpretación de fotografía aéreas y DEM a escalas regionales y locales, y a escala de macizo rocoso.

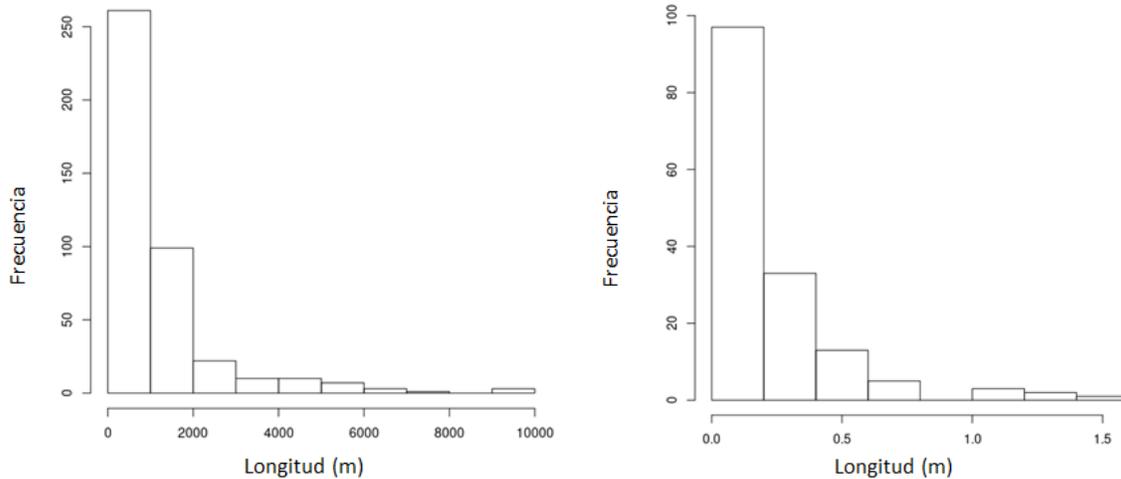


Figura 29. A la izquierda, histograma de frecuencias para las longitudes de los alineamientos interpretados a diferentes escalas. A la derecha, Histograma de frecuencias para las longitudes de las fracturas medidas e interpretadas a escala de afloramiento para las diferentes litologías aflorantes dentro de Cerro Seco.
Elaboración propia.

En la siguiente figura se puede ver la tendencia lineal que siguen los datos de longitudes en función de la densidad sobre el área y que evidenciaría la probable interrelación de los flujos entre escalas de análisis. Esto puede traducirse con las hipótesis acá presentadas en que los flujos que se recargan a través de fracturas en las zonas altas de los cerros surorientales de Bogotá tienden a funcionar de la misma forma sobre las zonas de recarga en Cerro Seco.

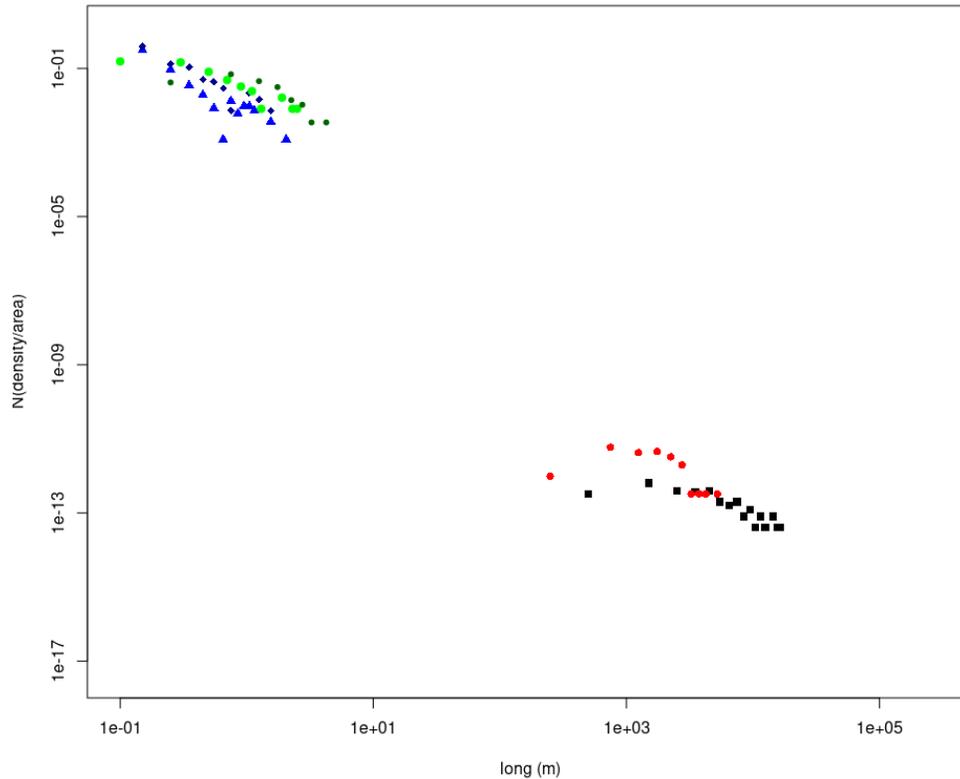


Figura 30. Histograma de longitudes contra densidad en que se relacionan diferentes escalas de interpretación de alineamientos y fracturas. Ambos ejes se encuentran en escala logarítmica para mejor visualización de los datos.
Elaboración propia.

2. Orientaciones a varias escalas

La consistencia de características de los elementos tectónicos o fracturas a diversas escalas, puede observarse a partir del análisis de orientaciones para los elementos interpretados sobre DEM y fotografías aéreas a escalas menores a 1:100.000, menores o iguales a 1:50.000, menores o iguales a 1:30.000, y escala de afloramiento (decimétrica a métrica).

El resultado de este análisis revela tres grandes tendencias de elementos tectónicos en el área de influencia y en Cerro Seco: 1) N50-70W, 2) N20-30, y 3) . En la siguiente figura se ilustran mediante diagramas rosa, donde se puede observar que la tendencia con mayor persistencia y frecuencia a través de las escalas de análisis es la WNW - ESE, representando los alineamientos y fracturas asociados a la ZCSB (Fierro & Angel, 2008; Fierro & Bernal, 2008).

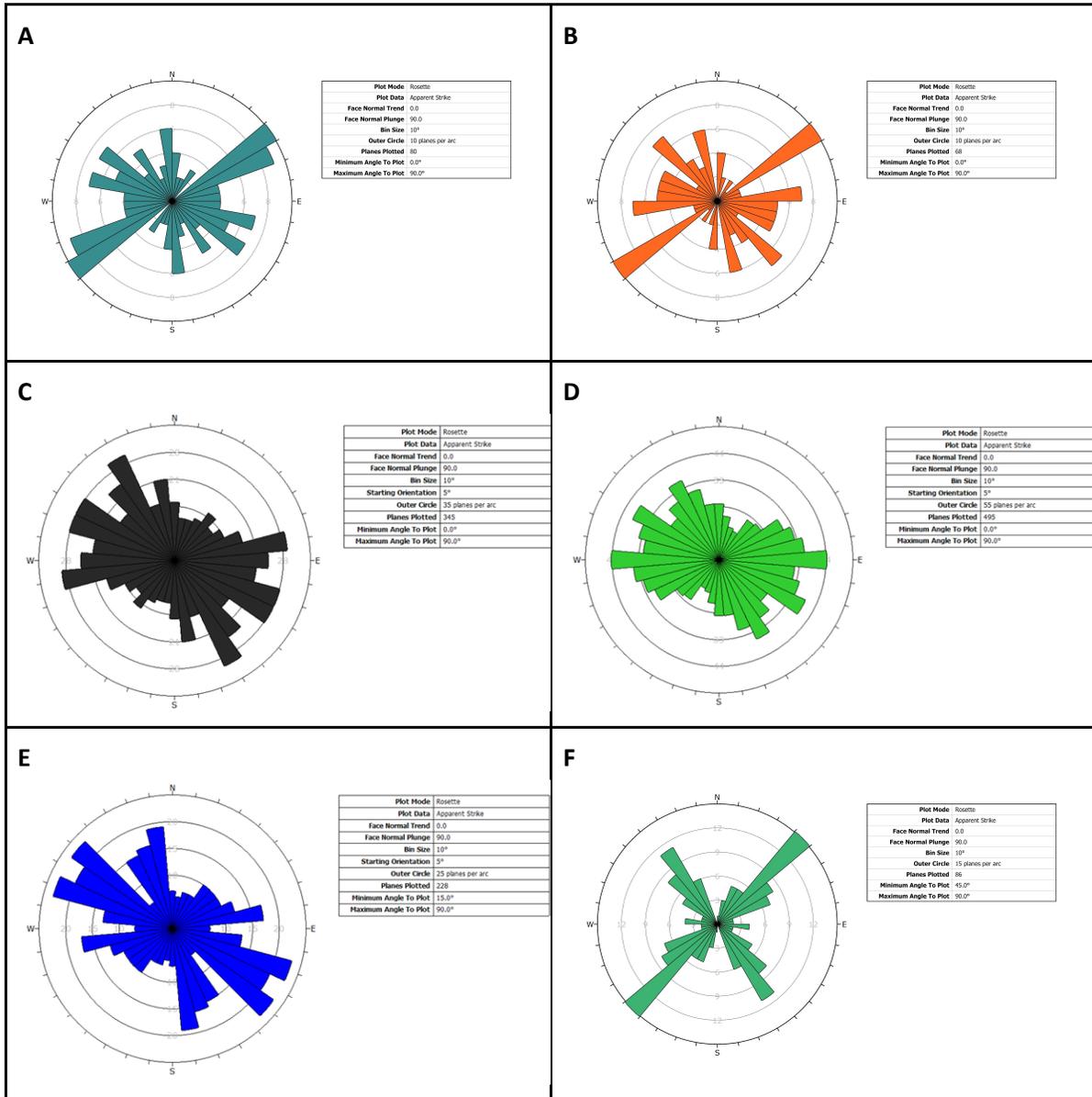


Figura 31. Diagramas rosa de las tendencias de fracturas observadas a diferentes escalas. A) alineamientos interpretados a escalas menores a 1:100.000, B) alineamientos interpretados a escalas aproximadas a 1:50.000, C) alineamientos interpretados sobre fotografías aéreas dentro de Cerro Seco, D) todos los alineamientos interpretados, E) planos de falla medidos dentro del área de influencia, y F) planos de fracturas medidos dentro de Cerro Seco. Elaboración propia.

ii. Pruebas hidráulicas

1. Curvas de retención

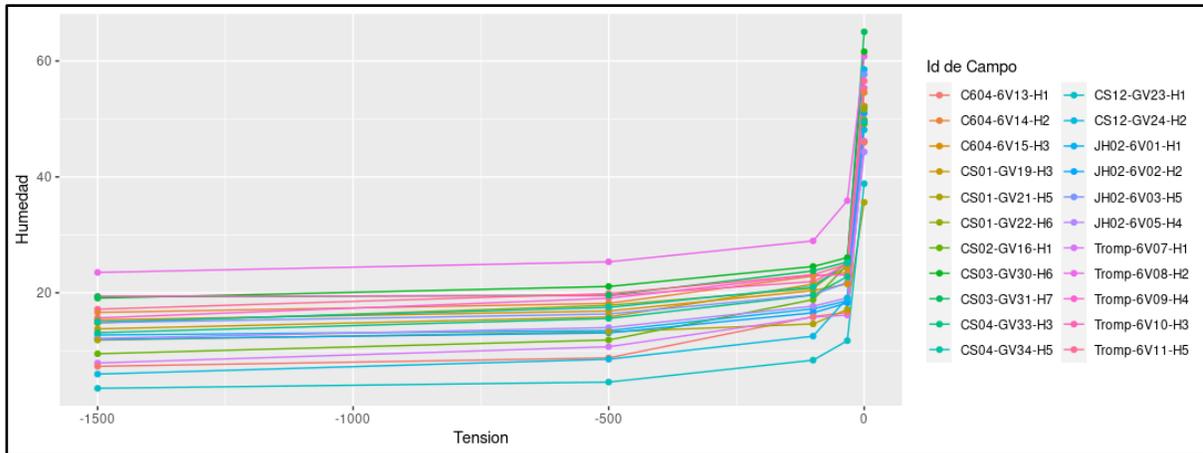


Figura 32. Gráfica de tensión (presión negativa) Vs humedad residual aplicada para todas las muestras de Cerro Seco analizadas por el IGAC. Elaboración propia.

Para los ensayos de retención de humedad de los suelos muestreados en campo, se realizó una gráfica donde se compara la humedad y la tensión (presión negativa) para todas las muestras. En estas curvas se observa que pasando del punto inicial (0 kPa) hasta aproximadamente -0,33 KPa el comportamiento de las curvas sugiere que los materiales retienen relativamente mal la humedad, así mismo las formas de las curvas sugieren pocas variaciones graduales de granulometría entre las muestras.

El objetivo de este análisis es calcular a escala de macizo la conductividad hidráulica aplicando metodologías similares a las metodologías aplicadas a las pruebas de carga variable.

2. Carga variable

Una vez realizada la prueba de carga variable se procede a calcular la conductividad hidráulica para cada una de las muestras (Badillo, 2005) y posteriormente se grafican los resultados en forma de diagrama de cajas para todas las muestras, en los cuales puede observarse la tendencia estocástica de los datos y el rango de valores de cada una de ellas (ver siguiente figura).

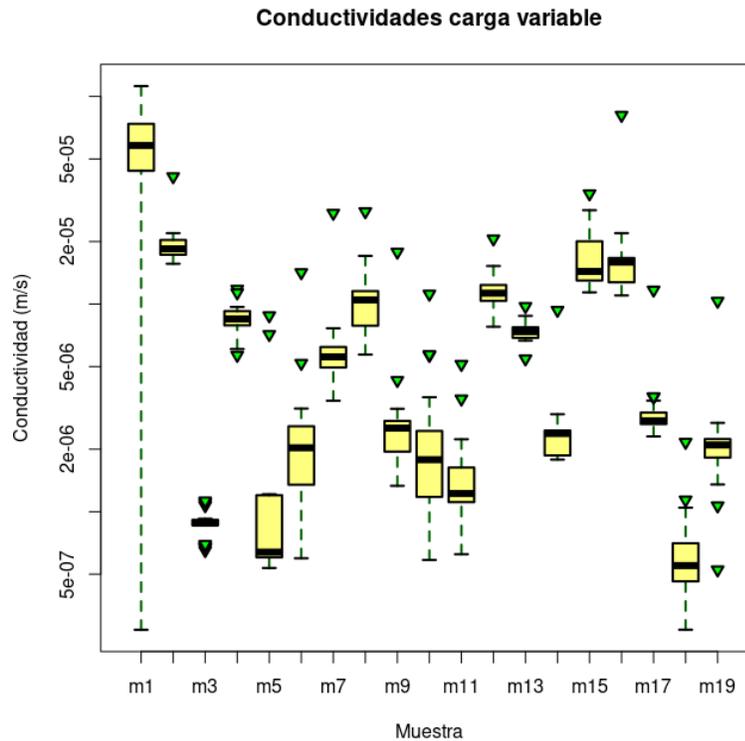


Figura 33. Diagrama tipo cajas donde se muestran las variaciones en los valores de conductividad calculados para cada muestra de suelos de Cerro Seco. La línea dentro de la caja amarilla representa la mediana. Elaboración propia.

3. Pruebas de infiltración

Durante las visitas de campo con el componente de suelos, se reconocieron estructuras a escalas de perfil o penetrativas a lo largo de varios horizontes de suelo (principalmente los superiores). Con el ánimo de comprender el comportamiento hidráulico de estas estructuras, y teniendo en cuenta que los ensayos de carga variable no podían contemplar dicho comportamiento por el tamaño de la muestra, se realizó una prueba de infiltración en una de las secuencias previamente seleccionadas por el componente de suelos con estructuras de este tipo.

Con estos datos se inicia el procesamiento según la metodología planteada por Eduardo Quintero Chavarría para el componente de hidrogeología en el proyecto de “Evaluación geoambiental e hídrica del proyecto de perforación exploratoria del bloque petrolero El Nogal en los municipios Morelia y Valparaíso - Caquetá, para la defensa del agua y el territorio” (Corporación Geoambiental TERRAE, 2017), en la cual se ajustan los datos según el método de “probabilidad estocástica de tipo bayesiana con el algoritmo de metropolis”. En las siguientes gráficas se realiza dicho ajuste.

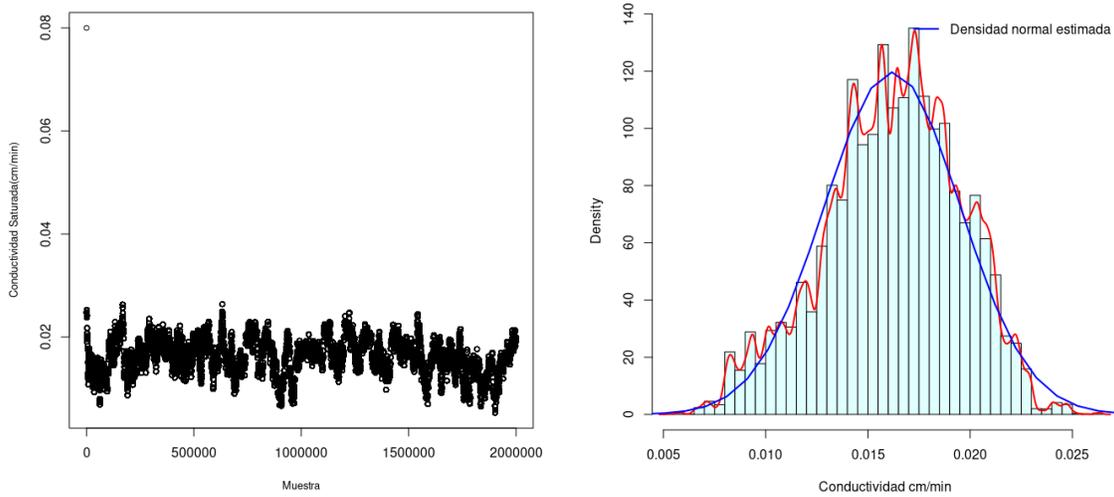


Figura 34. A la izquierda, muestreo de datos para el parámetro de conductividad de la prueba de infiltración. Los círculos negros son los valores encontrados por el método bayesiano. A la derecha, histograma de densidades contra la conductividad estimada a partir de las muestras producto del modelo probabilidad.

Elaboración propia.

Tabla 5. Valores de parámetros hidráulicos producto del modelo de conductividad de Philip para la muestra de infiltración. Elaboración propia.

Mínimo	Primer cuartil	Mediana	Media	Tercer cuartil	Máximo
0,00530 cm/min	0,01411 cm/min	0,01639 cm/min	0,01619 cm/min	0,01859 cm/min	0,02636 cm/min
8,833e-07 m/s	2,352e-06 m/s	2,732e-06 m/s	2,699e-06 m/s	3,098e-06 m/s	4,393e-06 m/s

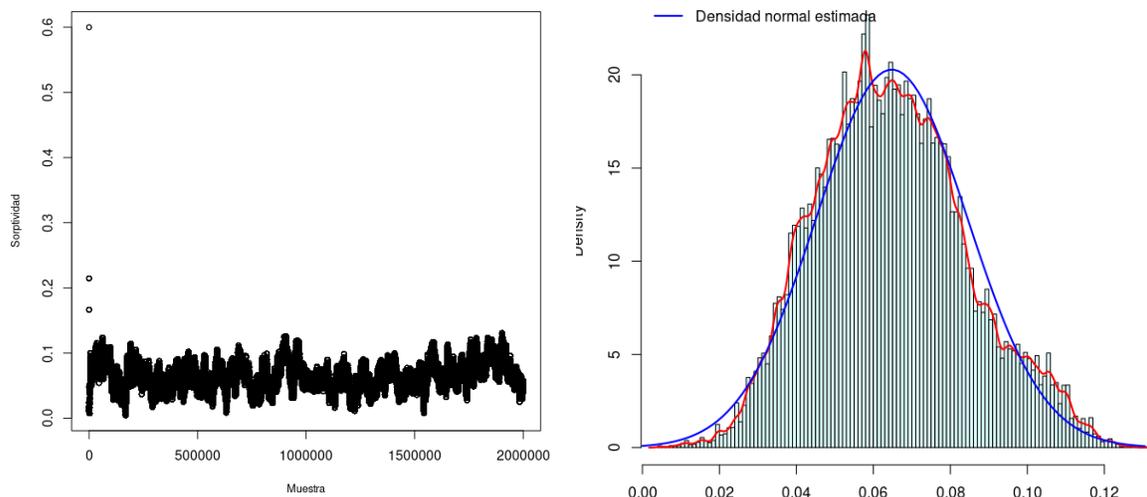


Figura 35. A la izquierda, muestreo de datos para el parámetro de sorptividad de la prueba de infiltración. Los círculos negros son los valores encontrados por el método bayesiano. A la derecha, histograma de densidades contra la sorptividad estimada a partir de las muestras producto del modelo probabilidad.

Elaboración propia.

Tabla 6. Valores de parámetros hidráulicos producto del modelo de sortividad de Philip para la muestra de infiltración. Los valores se encuentran en cm/min². Elaboración propia.

Mínimo	Primer cuartil	Mediana	Media	Tercer cuartil	Máximo
0,00470	0,05070	0,06370	0,06479	0,07750	0,13050

iii. Hidroquímica

Para el análisis de muestras químicas de iones mayores se aplicó en primer lugar la revisión del balance iónico del agua. Según esta revisión, los cationes (carga positiva) y aniones (carga negativa) deben encontrarse en igual concentración para balancear de forma neutra la muestra. Se aplica la siguiente ecuación:

$$e = \frac{\sum yc - \sum ya}{\sum yc + \sum ya}$$

Donde “e” es el error balance iónico “yc” representa la suma de cationes y “ya” la suma de aniones.

El resultado de dicho cálculo se resume en la siguiente tabla.

Tabla 7. Resultados de análisis químicos y cálculo del error del balance iónico.

Muestra	pH	C.E.	Cationes (mg/L)				Aniones (mg/L)				Balance iónico (USGS ²⁴)
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	
CS-H01	6,97	117,5	11,70	3,79	6,20	7,19	82,10	11,60	3,23	2,57	-17 %
CS-H02	5,71	91	20,90	1,61	13,90	10,50	4,01	18,50	4,44	2,28	40,57 %

Obsérvese que de las muestras listadas anteriormente, ambas cuentan con un error alto en porcentaje. Según Jia et al. (2017), este error puede deberse principalmente por tres razones: 1) en el análisis químico y posteriormente cálculo del error, no se toman en cuenta otros aniones o cationes presentes en la muestra de agua, 2) el tiempo de preservación de las muestras juega un papel importante, en este trabajo las muestras se enviaron al día siguiente de su toma (se mantuvieron refrigeradas), y 3) hay incertidumbre en los instrumentos de medida.

Por ahora se usan ambas muestras para tipificarlas según la clasificación de Piper (1944) y enmarcarlas por facies hidroquímicas siguiendo a Singhal y Gupta (2010).

La muestra CS-H01 tomada de cuerpo de agua de tipo léntico, se enmarca en el tipo hidroquímico bicarbonatada cálcica con facies de aniones tipo bicarbonatadas. Esto puede interpretarse según el modelo químico de evolución de Chebotarev, que estas aguas han tenido un corto contacto con los materiales, atribuyendo a que han tenido tiempo de enriquecerse relativamente en bicarbonatos.

²⁴ Se usó el software PHREEQC Version 3 elaborado por el USGS (United States Geological Survey) para el cálculo del error del balance iónico: <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>.

La muestra CS-H02, de igual forma tomada de un cuerpo léntico, se clasifica como sulfatada cálcica con facies de aniones tipo clorurada. Se puede interpretar según el modelo de evolución de Chebotarev como un tipo de agua que ha estado aún mayor tiempo en contacto con materiales enriquecidos en minerales que aportan calcio y magnesio. Su tránsito puede considerarse relativamente mayor que la anterior muestra, y podría estar reflejando los flujo cortos a medios planteados en las hipótesis de flujo.

En el contexto de las hipótesis presentadas para los flujos de agua subterráneo, lo anterior sirve de sustento para flujos de corto plazo a través de suelos y depósitos.

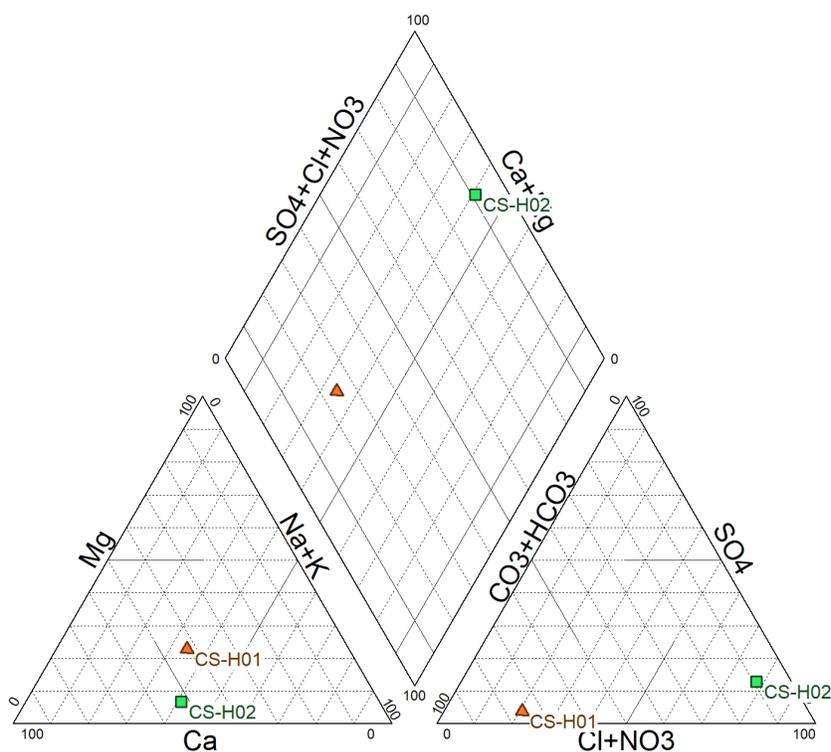


Figura 36. Diagrama de Piper con muestras tomadas en dos cuerpos de agua estancada en el cauce de drenajes.
Elaboración propia.

Para poder comparar las composiciones y diferentes concentraciones de los iones en las muestras CS-H01 y CS-H02, se analizan con ayuda del diagrama de Schoeller-Berkaloff (siguiente figura). En este diagrama es posible observar que las muestras tienen firmas químicas similares excepto por una anomalía en concentraciones del compuesto bicarbonato (HCO_3) o alcalinidad total. Posiblemente este desbalance en concentración sea el causante de que la muestra CS-H02 tenga tan elevado el error de balance iónico calculado anteriormente.

Dicha clasificación de las muestras de Cerro Seco coincide con la zonificación regional realizada por PUJ-SDA (2018), en la que sugieren que la evolución de estas aguas desde los cerros (zonas de recarga) tienden a tener firmas en las zonas de transición con enriquecimiento de bicarbonatos.

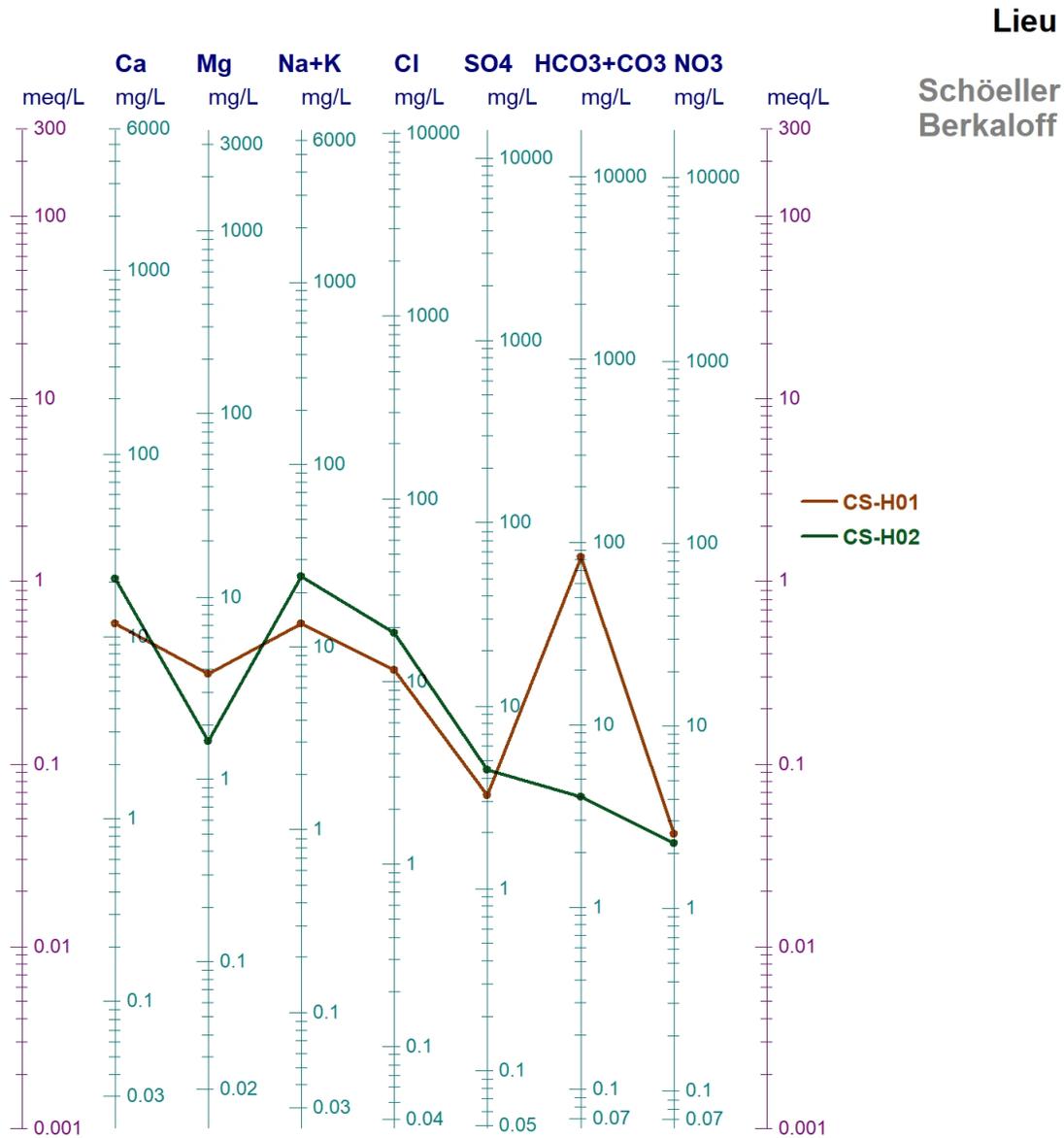


Figura 37. Diagrama de Schoeller-Berkaloff donde se graficaron las dos muestras de agua que se analizaron para iones mayores en laboratorio. Nótese la similitud de la línea y las diferencias puntuales en algunos elementos (HCO_3+CO_3 : alcalinidad total y Mg: magnesio). Elaboración propia.

Durante el mes de marzo también se realizaron múltiples tomas de monitoreo de aguas superficiales, atendiendo el limitante de escorrentía sobre el área de estudio, es decir, aún siendo época de lluvias, dentro de Cerro Seco se mantienen pocos drenajes activos. A pesar de que esto sea una limitante para este objetivo específico, esto también nos está indicando que el agua lluvia que cae sobre la zona es rápidamente infiltrada.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los puntos de control para la toma de datos de pH, conductividad eléctrica y toma de muestra para laboratorio químico.

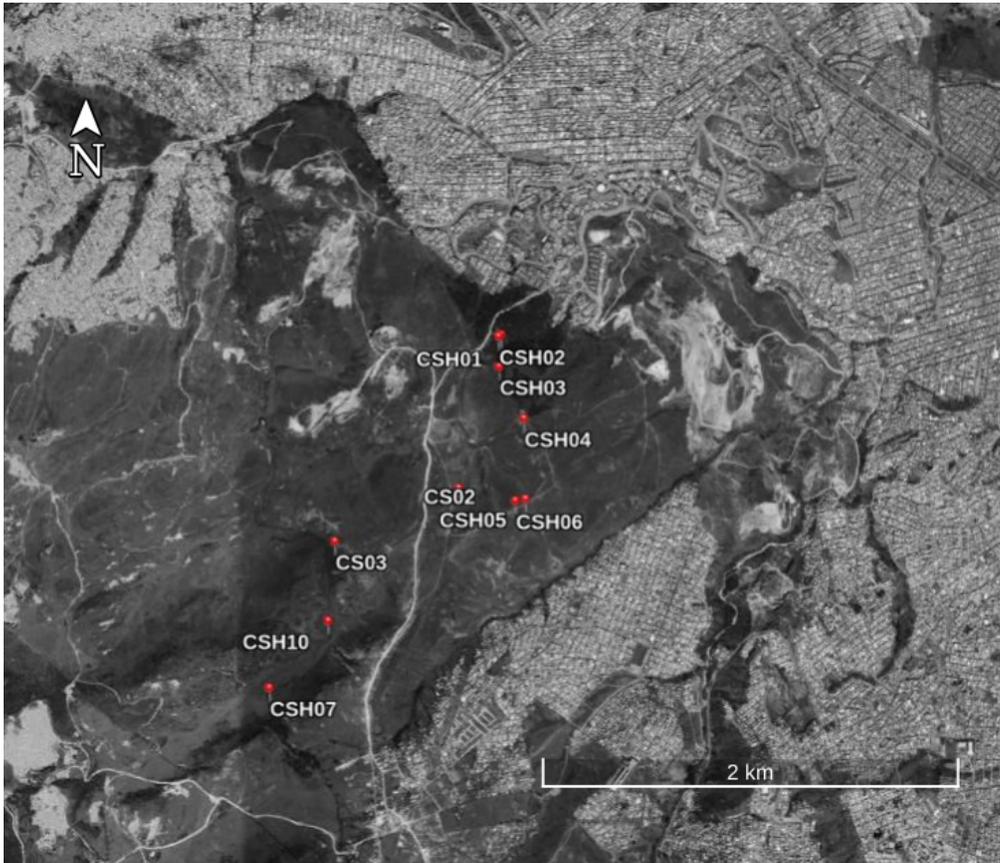


Figura 38. Ubicación de los puntos de monitoreo de aguas superficiales sobre el área de Cerro Seco. Elaboración propia.

E. SUSCEPTIBILIDAD A LA INFILTRACIÓN

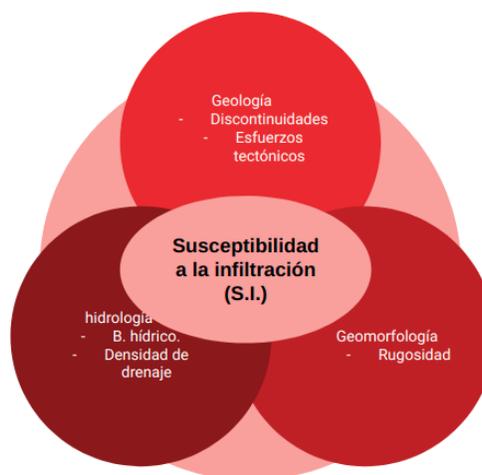


Figura 39. Esquema de relación entre los componentes que se usaron en el modelo de susceptibilidad a la infiltración. Elaboración propia.

Si bien se ha mencionado que el sistema es en sí una zona que requiere de un área de amortiguación usando un conjunto de técnicas especializadas, se ha hecho un esfuerzo para categorizar dentro de Cerro Seco las zonas con mayor susceptibilidad a la infiltración.

De forma preliminar, este modelo contempla dentro de los componentes la evaluación de factores de susceptibilidad con metodologías basadas en el criterio de experto (similar a las usadas por la ANLA para evaluar los impactos ambientales), en las que se hace una suma ponderada de variables (ver la siguiente ecuación).

$$SI = peso_1 * Densidad\ de\ alineamientos + peso_2 * Densidad\ de\ drenaje + peso_3 * Rigurosidad + peso_4 * Geomorfología$$

En esta ecuación, SI se ha llamado susceptibilidad a la infiltración y para poder estimarla se han usado funciones llamadas de utilidad o en otras palabras para convertir el rango de valores de cada una de las variables consideradas en el que se mide a un espacio normalizado entre 0 (nula susceptibilidad a la infiltración) a 10.

i. Densidad y dirección de alineamientos

La densidad de alineamientos para escala representativa del polígono de Cerro Seco se muestra en la siguiente figura, nótese los rangos de valores en que se mueve la variable y las unidades.

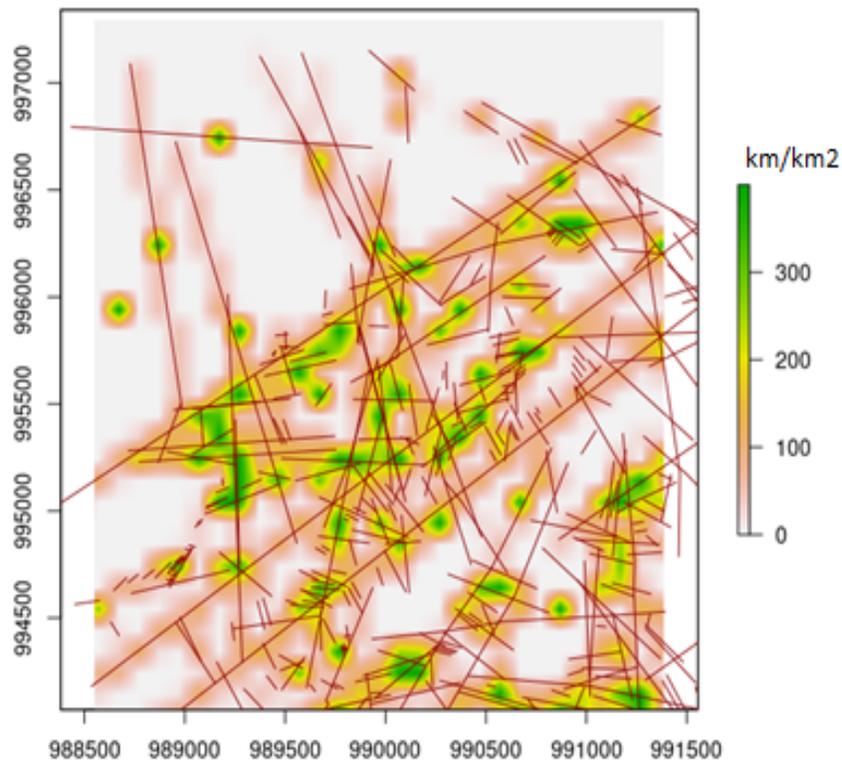


Figura 40. Mapa de densidades de alineamientos en Cerro Seco con el trazo de estos (líneas en color rojo).
Elaboración propia.

Dicha capa se ha construido teniendo en cuenta la interpretación estructural de fotografías aéreas a escalas menores a 1:30.000, buscando identificar en la zona rasgos que se puedan correlacionar con discontinuidades de las unidades geológicas presentes en la zona. Para estimar esta capa es importante recordar que la densidad de líneas se puede estimar mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Densidad Línea} = \frac{\text{sum}(li)}{\text{Área de referencia}}$$

En este caso la área de referencia considerada osciló entre 100 y 200 m, lo cual se debe a que los resultados se puede encontrar entre dos límites: 1) el área de referencia en el que se hace el cálculo de la densidad de alineamientos es demasiado pequeña en cuyo caso se llegaría a una imagen pixelada de los alineamientos, 2) el área de referencia es demasiado grande y se homogeniza el patrón de la densidad con lo que se obtendría un solo valor de densidad de lineamientos para toda el área de estudio.

Adicionalmente, la densidad de alineamiento tiene órdenes de magnitud del orden de 300 km/km² lo cual se debe a que se ha considerado en la suma de cada lineamiento un factor ponderador asociado a los esfuerzos tectónicos en la zona.

Dichos esfuerzos se encuentran asociados al modelo de geología estructural dado que ellos regulan la posibilidad de encontrar las familias de fracturas abiertas o cerradas. Para el área de trabajo, se han medido 10 fallas geológicas mesoscópicas, que permiten establecer preliminarmente los (paleo)esfuerzos tectónicos operantes. El resultado de esfuerzos obtenido para el predio de Cerro Seco muestra similitudes con trabajos de geología realizados por Fierro para Tapia²⁵ (2006) y otros como el de Fierro & Ángel (op. cit.) y Casallas (op. cit.), que muestran datos de dirección de esfuerzos a partir de medición de fallas a nivel de afloramiento.

Si se tiene el contexto general de Cordillera, las fallas transversales NE-SW tienen componente dextral-inverso (origen transpresivo, Kammer y otros), mientras que poco trabajo se tiene de las transversales NW-SE. Se propone que estas fallas son un sistema conjugado, con las NW-SE con sentido sinistral y componente general normal.

²⁵ Tapia, G. (2006). Estudios detallados de Geología y Geomorfología para Análisis de Riesgos. Colegio Margaritas, sector de Bella Flor (Ciudad Bolívar)

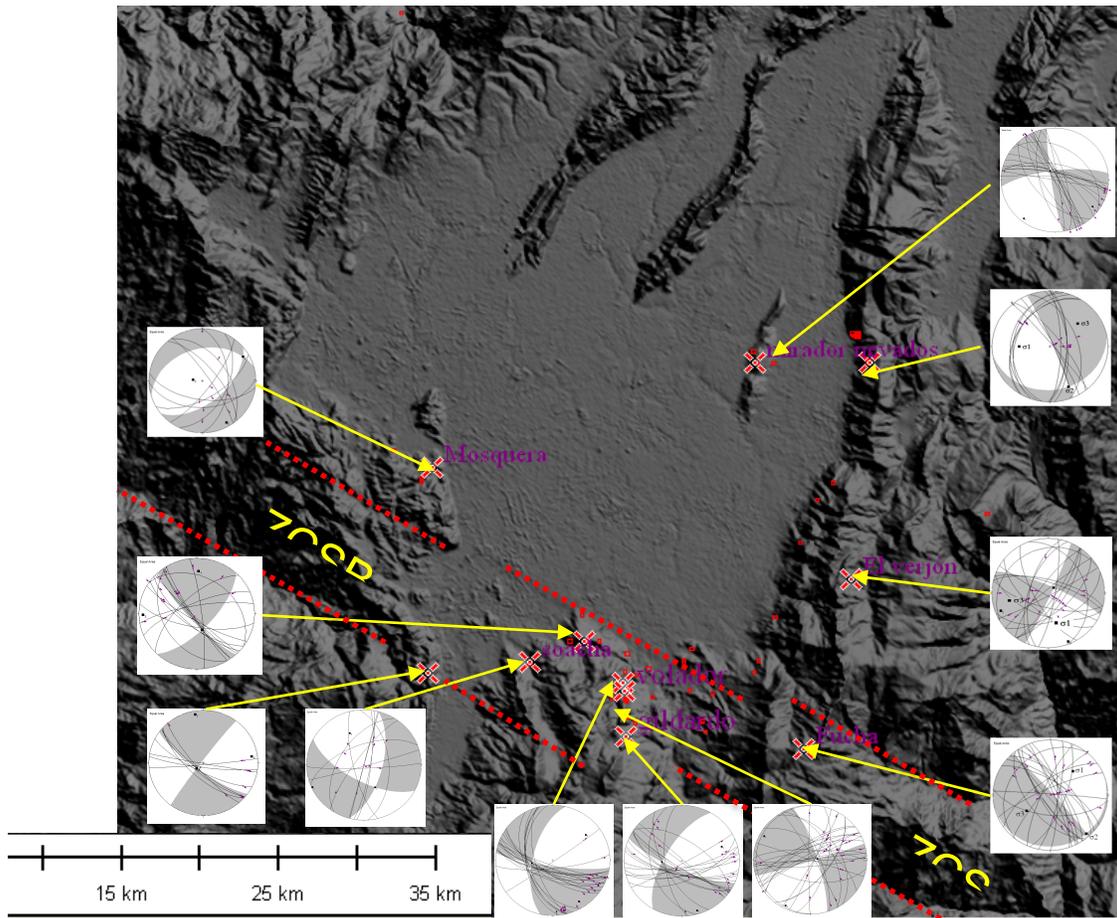


Figura 41. Sistema estructural del Sur de Bogotá con diagramas tectónicos cinmáticos en 11 puntos de la Sabana de Bogotá N=476 datos de fallas con indicadores de movimiento. Nótese el predominio de fallas de rumbo sinestrales en la zona de cizalla del sur de Bogotá (ZCSB). Interpretación general con un eje de tensión NNW-SSE (σ_3 diedro sombreado) y de contracción ENE-WSW (σ_1 diedro blanco) (Tomado de Fierro-Morales & Ángel-Amaya, op. cit.).

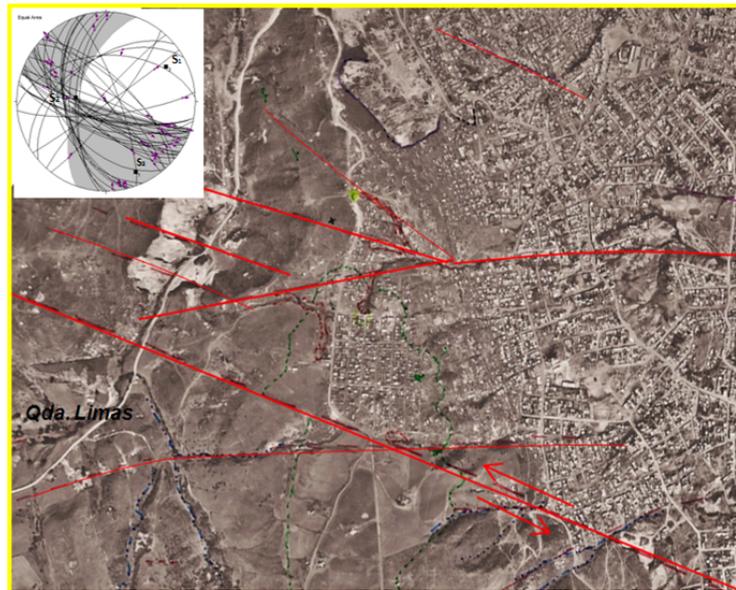


Figura 42. Fotointerpretación de rasgos tectónicos transversales (en rojo) en la cuenca de la quebrada Limas. Se muestra también el campo de esfuerzos con base en mediciones de campo. Tomado de Tapia (2006)

El resultado obtenido en Cerro Seco muestra un esfuerzo principal mayor (σ_1) orientado en dirección cercana a N45E y con inclinación cercana a la horizontal, un esfuerzo principal menor (σ_3) orientado en dirección cercana a N45W y un esfuerzo intermedio (σ_2) con inclinación cercana a la vertical.

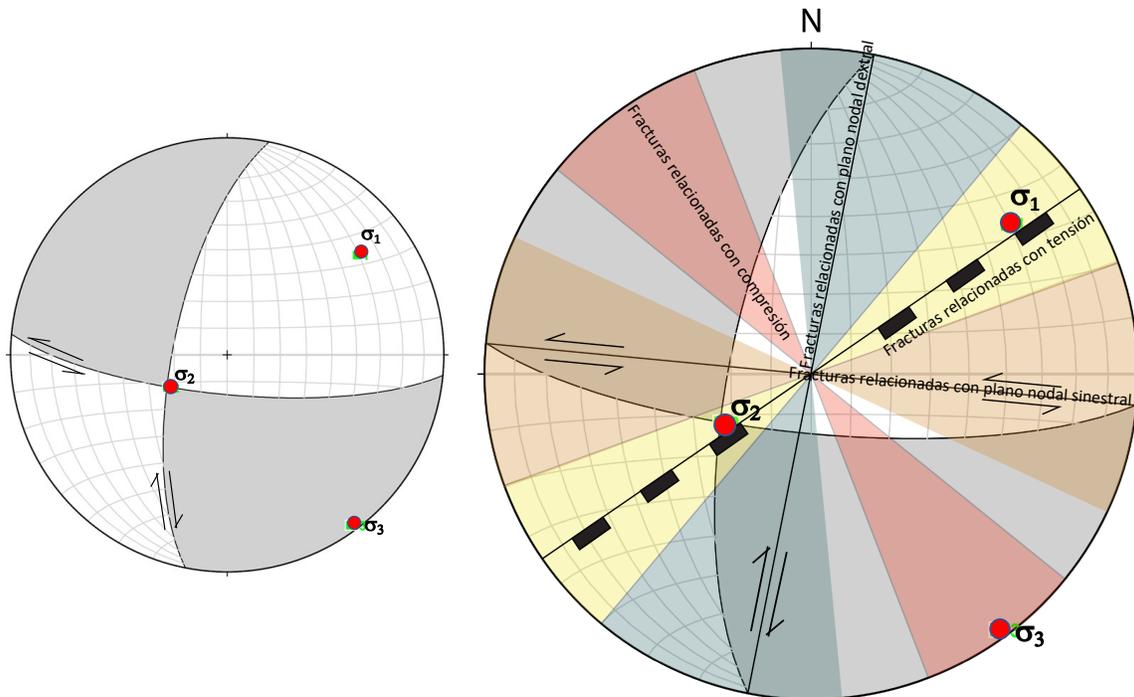


Figura 43. A la izquierda, campo de esfuerzos tectónicos obtenidos en Cerro Seco con base en mediciones de campo. Elaboración propia. A la derecha, interpretación de zonas de esfuerzos para el cálculo del factor de susceptibilidad en función de la orientación de elementos tectónicos. Elaboración propia.

Las principales interrelaciones de estos resultados con los caminos de las aguas subterráneas en rocas cuyo fracturamiento se relacionan con el hecho de que si las rocas son sometidas a tensión (σ_3), se generaran fracturas muy abiertas con direcciones aproximadamente perpendiculares a la del esfuerzo (se escogió un rango de mas o menos 15º para representar la incertidumbre).

También se ha visto, como en el caso de las estructuras tectónicas en quebrada Limas, que las fallas y fracturas sinestrales que tienen dirección cercana a N70W tienen componentes de tensión, de manera que éstas (con sus fracturas Riedel relacionadas) también tienden a ser abiertas.

En cuanto a las fallas dextrales con dirección cercana a N15E (y sus fracturas Riedel relacionadas) suelen tener componentes de compresión, así que tienden a ser poco abiertas, igual que las fracturas perpendiculares a la compresión (σ_1). En este caso, el soporte para la propuesta de transpresión son los estudios regionales como los de Kammer.

Con estas caracterizaciones, se le dio un peso ponderado a la dirección de los alineamientos en el modelo de susceptibilidad a la infiltración, que se resume en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valor del factor de las susceptibilidades en función de la orientación de elementos tectónicos en el área de influencia. Elaboración propia.

Tipo de falla	Rango en acimut de rumbo (º)	Valor del factor de susceptibilidad
Fallas por tensión	40 a 70	10
Fallas NW transtensivas sinestrales	70 a 110	8
Fallas NE transpresivas dextrales	0 a 40	5
Fallas por compresión	130 a 160	2
Otras	110 a 130 160 a 180	5

Los valores se han convertido a un espacio normalizado utilizando siguiente función de utilidad:

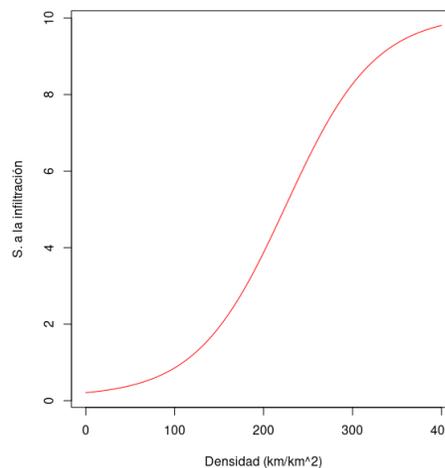


Figura 44. Función de utilidad para la densidad de alineamientos. Elaboración propia.

Con esta función de utilidad o normalización se busca convertir las mediciones de densidad a un espacio común con las demás variables del problema. Dicha función refleja dos efectos: 1) a medida que la densidad de alineamientos se acerca a cero, disminuye progresivamente la facilidad con la que el agua se infiltra en el subsuelo, dado que en un área de referencia se llega a un límite en el que solo se tiene una fractura, 2) en un valor límite se alcanza un nivel de fracturamiento tal equivalente al comportamiento del suelo. Los resultados de esta transformación se ven en la siguiente figura.

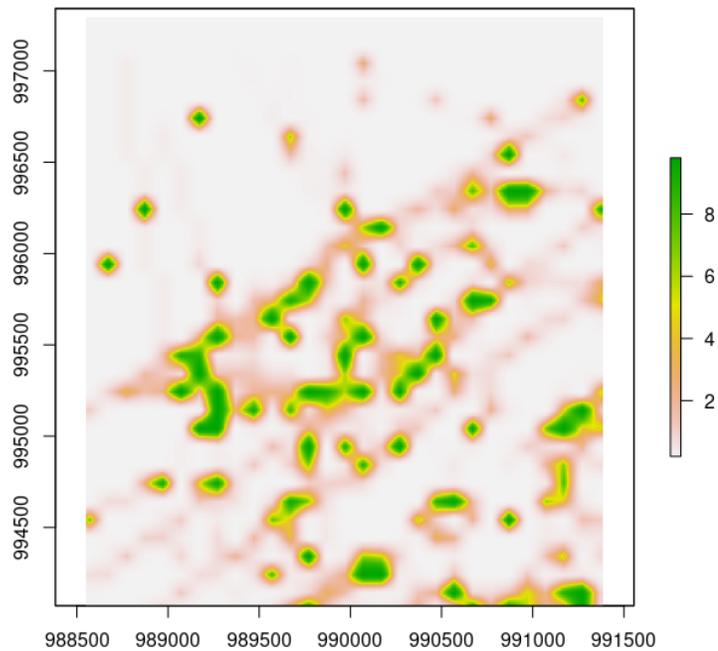


Figura 45. Mapa de densidad de alineamientos ajustados a la normalización a partir de las funciones de utilidad.
Elaboración propia.

ii. *Geomorfología (pendientes, rugosidad, curvatura)*

En el caso de la geomorfología se considera como insumo principal el modelo de elevación del terreno para el parámetro de rugosidad del terreno Únicamente se ha considerado esta variable puesto que las demás, pendiente, curvatura, entre otras, son derivadas del modelo de elevación digital y esencialmente reflejan algo similar. Dicha capa se muestra en la siguiente figura.

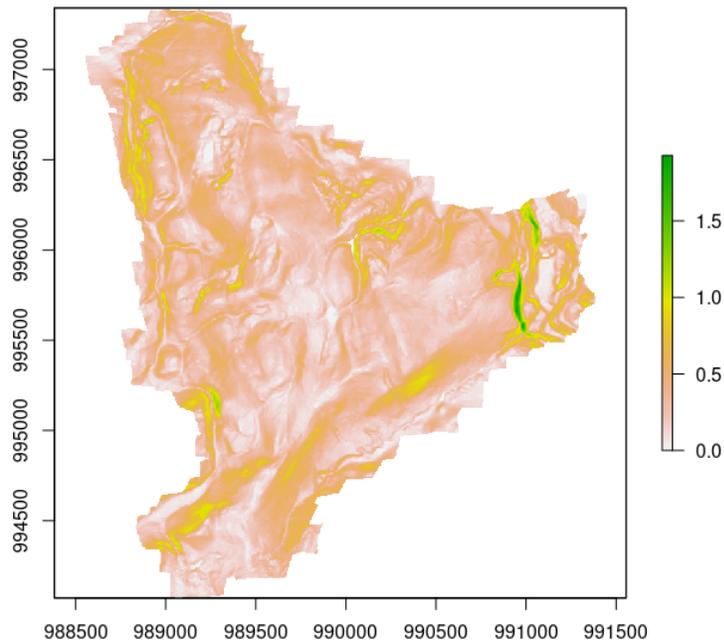


Figura 46. Mapa de rugosidad del terreno a partir del modelo de elevación digital. Elaboración propia.

Este parámetro puede interpretarse de forma tal que las zonas con mayor rugosidad dificultan la circulación de agua y de esta forma incrementa la posibilidad de infiltración. Teniendo en cuenta esto en la siguiente figura se muestra la función de utilidad que normaliza este parámetro.

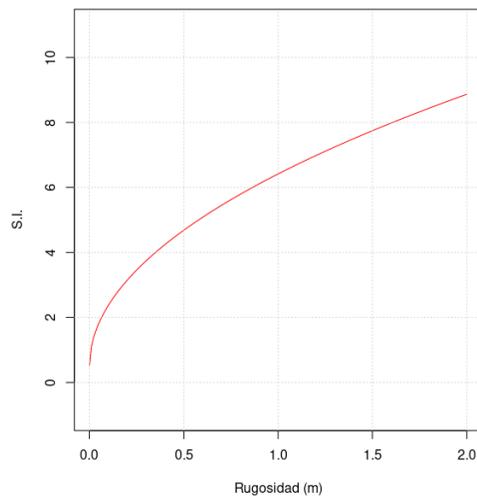


Figura 47. Función de utilidad para el parámetro de rugosidad del terreno. Elaboración propia.

Al aplicar esta función a la capa de entrada se obtiene una capa de susceptibilidad a la infiltración asociada a la rugosidad. Esto se muestra en la siguiente figura.

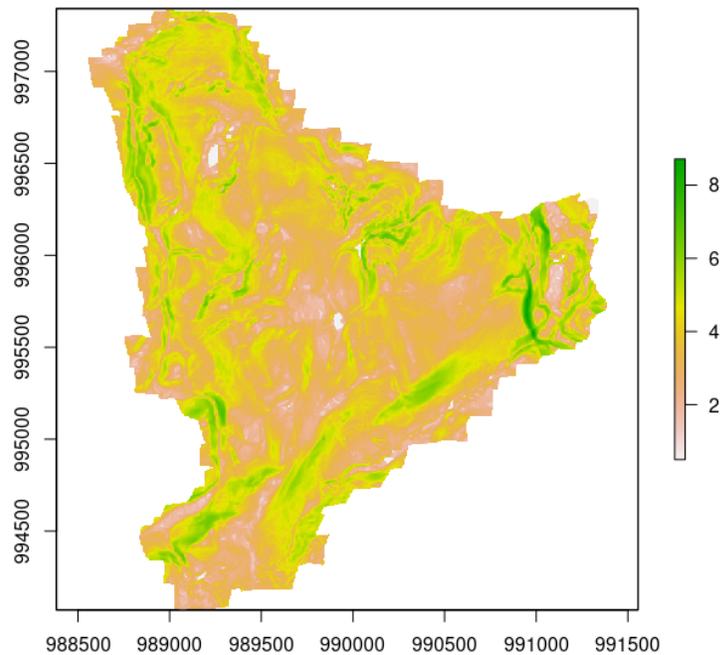


Figura 48. Mapa de susceptibilidad a la infiltración a partir de la rugosidad del terreno. Elaboración propia.

iii. Hidrología (densidad de drenaje)

La infiltración condiciona el comportamiento de los cuerpos de agua superficiales. Esto se debe a que zonas con bajo drenaje se puede entender como zonas en las que si una gota de agua cae tiene mayor potencial de infiltrarse, lo opuesto sería, si el drenaje se encuentra desarrollado. La información para la construcción de esta capa fue obtenida a partir de la cartografía hídrica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. En la siguiente figura se puede ver el resultado.

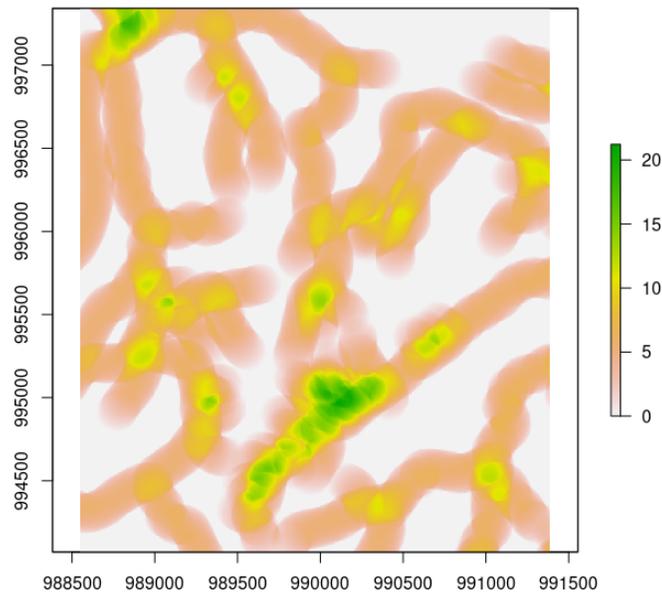


Figura 49. Mapa de densidad de drenaje. Elaboración propia.

Al igual que el caso anterior se ha usado una función de utilidad para normalizar esta capa, la tendencia de ella se muestra en la siguiente imagen.

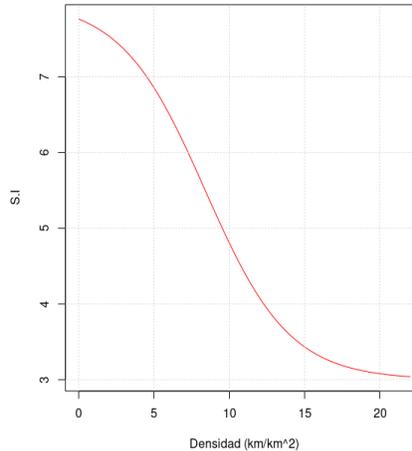


Figura 50. Función de utilidad para la densidad de drenajes. Elaboración propia.

Los resultados de aplicar esta función a la capa de drenaje se muestran en la siguiente figura.

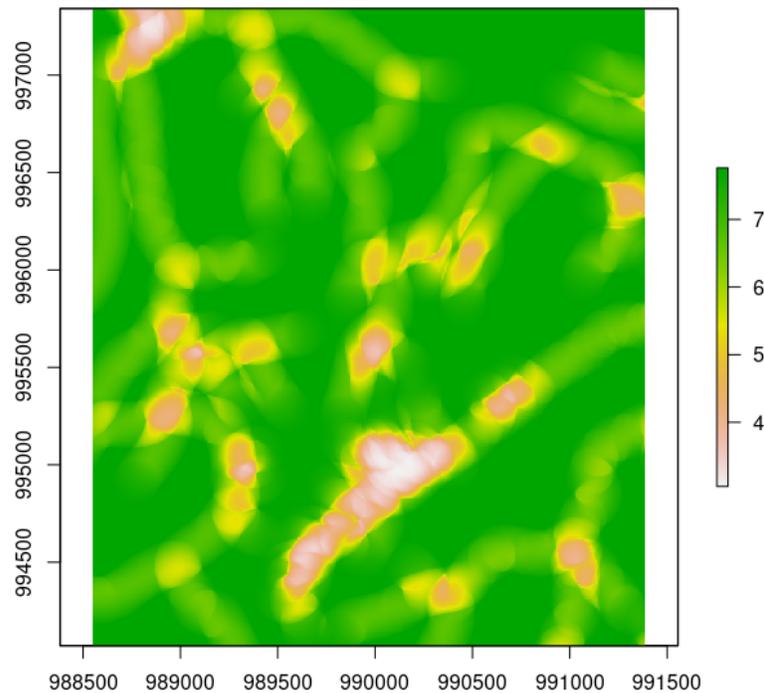


Figura 51. Mapa de susceptibilidad a la infiltración a partir de la densidad de drenaje. Elaboración propia.

Es de notar que en este caso, y como se evidenció en la prueba de infiltración, el subsuelo tiene una conductividad hidráulica media y una capacidad relevante de retener agua por procesos de capilaridad, es por esto que el límite inferior de la función no es cero.

iv. Hidrología (Lluvias)

A partir de la estimación simplificada de balance hídrico en el área de estudio expuesta en el capítulo del componente de hidrología, el cual mediante el cálculo de la evapotranspiración estima a partir de un proceso semiautomático de álgebra de mapas el parámetro precipitación útil (P-ETP), obteniendo una aproximación al comportamiento a largo plazo de un sistema hidrológico. Cuyos resultados gráficos se pueden ver en el componente de hidrología.

En este componente se concluye que los meses de menores lluvias corresponden al periodo de diciembre – febrero y otra temporada entre junio – septiembre. Los meses con mayores lluvias en la zona de estudio corresponden a los periodos comprendidos entre abril – mayo y posteriormente entre octubre – noviembre, siendo el mes de noviembre el mes que más volumen de precipitación ha registrado en el periodo de 1999 – 2020.

Adicionalmente, el anterior capítulo evidencia que es junio el mes con mayores valores de evapotranspiración asociado directamente a los valores temperaturas reportadas para este mes seguido de periodos comprendidos entre marzo y abril donde el ecosistema tiene más agua disponible para evapotranspirar. De acuerdo al cruce de variables para el cálculo de la precipitación útil en la zona, los periodos húmedos, es decir, cuando la precipitación excede la evapotranspiración se presentan durante abril y mayo, y entre octubre y noviembre, es principalmente en estos meses cuando se presenta una precipitación potencialmente útil para la recarga.

Sin embargo, de acuerdo con la figura presentada en el anterior capítulo denominada “Mapas mensuales de Precipitación útil promedio mensual multianual (P-ETP)” donde se representan la diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo es enero el mes con mayor déficit en el balance directo. Es decir, las posibilidades más bajas de presentarse una precipitación útil para la recarga ocurren en enero y las más altas entre los meses de abril y mayo y entre octubre y noviembre. Al considerarse solo una función de utilidad para todos los meses se busca ilustrar el efecto que tiene la ausencia de la lluvia y en cierta forma reflejar el carácter dinámico que tiene los sistemas hidrológicos, la función de utilidad se muestra en la siguiente figura.

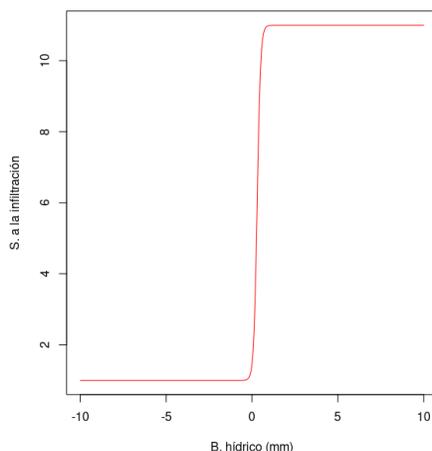


Figura 52. Gráfica que compara los valores del balance hídrico entre positivos y negativos en milímetros, y la susceptibilidad a la infiltración en función de dichos valores. Nótese que la susceptibilidad adquiere valores a 10 exactamente cuando el sistema hídrico encuentra valores positivos en su balance. Elaboración propia.

Al aplicar esta función al balance hídrico del mes de enero, el crítico en términos de extremos climáticos secos, se obtiene el siguiente resultado (ver figura siguiente), con resultados similares para el mes de octubre por ejemplo, pero con un incremento marcado de la susceptibilidad a la infiltración. Es decir que partiendo de un déficit estimado de -40 mm para el mes de enero (resultado tomado en el componente anterior) se esperaría que toda la entrada de precipitación en esta área que excedan los 40 mm se dispondrán directamente para infiltración.

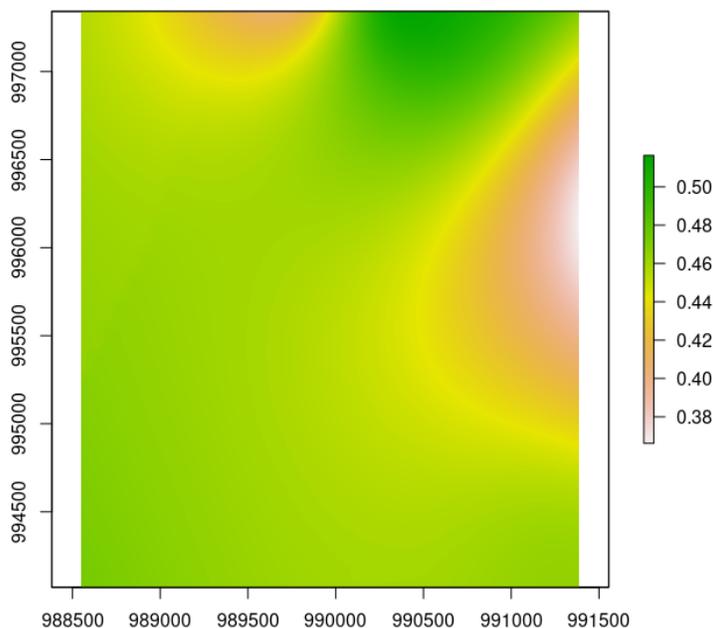


Figura 53. Mapa de precipitaciones medias del mes de enero. Elaboración propia.

v. Modelo de susceptibilidad a la infiltración

Teniendo en cuenta la ecuación ponderada con pesos se ha definido para el mes de enero la siguiente ecuación.

$$SI = 0,3 * Denli + 0,3 * Rugo + 0,1 * Bhidro$$

Por supuesto las capas de entrada se encuentran transformadas al mismo espacio o a la misma escala mediante el uso de las funciones de utilidad, y en efecto el uso de las transformaciones o funciones de utilidad (funciones bien definidas) y la posterior sumatoria es una forma de garantizar la superposición de efectos. El siguiente es, por tanto, el resultado obtenido de realizar la sumatoria. En términos espaciales se puede ver en la siguiente figura que es representativa de los dos cambios de época, en especial en el límite máximo de la escala de colores.

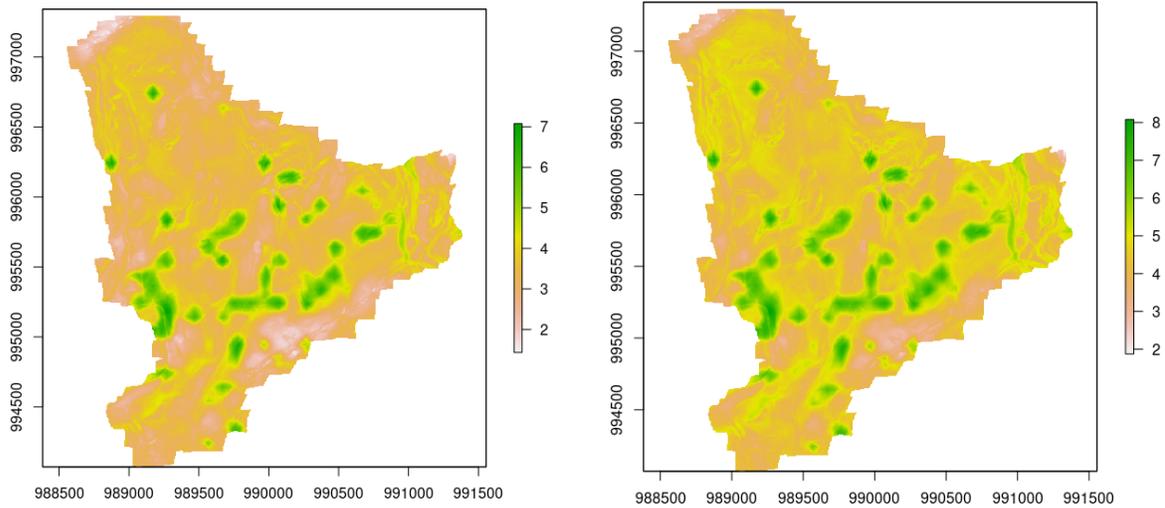


Figura 54. Mapas de susceptibilidad a la infiltración para los meses de enero (izquierda) y octubre (derecha). Elaboración propia.

Es de notar que en el sitio en donde se realizó la prueba de infiltración se constituye en el momento en un punto de calibración preliminarmente se puede decir que la prueba hidráulica arroja que la zona es de moderada capacidad de infiltración lo cual coincide con la superposición de diferentes efectos realizada en esta sección.

Adicionalmente si se analiza la frecuencia de los valores obtenidos se obtiene el siguiente histograma, para las dos épocas, en donde se ilustra en color rojo la época seca o enero y en color azul la época húmeda.

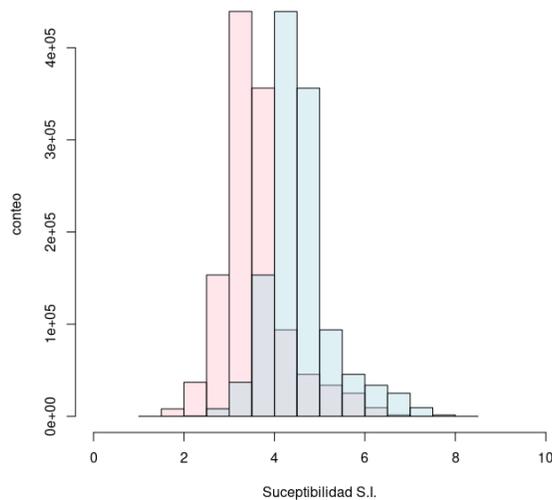


Figura 55. Histograma de la susceptibilidad a infiltración. Elaboración propia.

Basados en estos dos histogramas se puede ver cómo cambia la susceptibilidad a la infiltración y en todo caso esta se mantiene con valores por encima de 3 lo cual es representativo de zonas moderadas (correlacionable con las pruebas de infiltración que se desarrolla en campo). En este caso, por ejemplo, para el caso de época seca (color rojo) más del 70% de la muestra tiene valores por encima de este límite de 3, y en el caso de época húmeda más del 90%. Con lo anterior se concluye que **la recarga puede ser de moderada a alta**, lo cual es concordante con los resultados regionales de los mapas de la PUJ-SDA (2018).

Con todo este recorrido metodológico, la importancia en términos de zona de recarga de la zona, además de la potencialidad, es la conexidad espacial tiene toda el área de Cerro Seco, es decir, no se tienen parches aislados con susceptibilidad a la infiltración importante sino por el contrario se **conforma en Cerro seco una red conectada de zona de recarga a este nivel espacial de análisis**.

F. CONCLUSIONES

Con base en esta información se puede concluir que el sistema tiene conductividades hidráulicas que permiten categorizar lo como zonas materiales con comportamiento de acuífero, es decir, que dada esta categorización definida por Singhal y Gupta (2010), dicho material presenta condiciones idóneas para recibir, albergar y transmitir agua. Adicionalmente, ligando las condiciones geográficas de la zona con su entorno se puede ver que el nivel de energía de flujo asociado a la altura topográfica constituye a Cerro Seco como una zona de recarga de acuíferos con capacidad de captar agua para potencialmente redirigirla a la sabana de Bogotá.

Con base en la información obtenida tanto de huella química del agua hasta los análisis de discontinuidades y/o fracturamiento a diferentes escalas, se encuentra que la zona es efectivamente en su conjunto una zona de recarga y notablemente se validan las hipótesis construidas inicialmente en las que se hacía mención de un sistema de corta, mediana y larga escala espacio temporal imposible de separar. Adicionalmente, se puede afirmar que Cerro Seco es una zona de recarga que necesita una zona de amortiguación dadas las interacciones de pequeña escala que se dan en su interior y que puede llegar a afectar la resiliencia de las aguas de la sabana en tiempos de generaciones humanas.

Los efectos asociados a la mina Cerro Colorado ubicada en la esquina oriental de Cerro Seco, ha evidenciado en sectores aledaños el daño de las zonas de descarga del sistema acá planteado, especialmente porque desequilibra los flujos que potencialmente aportan agua a la sabana de Bogotá. Por esta razón, no es conveniente para la zona de Cerro Seco permitir que las canteras continúen extrayendo materiales que son acuíferos, tanto por porosidad como por fractura.

Como se señaló anteriormente, para este grupo de trabajo y teniendo en cuenta los resultados obtenidos por diferentes metodologías (incluso considerando sólo época seca), sectorizar dentro del área de Cerro Seco es un riesgo dado el potencial de recarga que tiene la zona, por ende, debe garantizarse una zona de amortiguación alrededor del parque y no es posible hacerla compatible con otra actividades y mucho menos con la actividad minera. En el contexto de los resultados, no es posible “restaurar” canteras cuya actividad implica remover grandes volúmenes de las rocas acuíferas y por tanto las actividades extractivas deben cesar inmediatamente para evitar que se siga



dando un impacto tan grave que puede clasificarse como daño ambiental, pues se están afectando componentes no renovables de los ecosistemas.

Dada la conexidad de las zonas con susceptibilidad a la infiltración no se puede aspirar a manejar esta complejidad zonificando y estableciendo límites estrictos que dividan el territorio que aun tiene posibilidad de ser protegido. Adicional a esto, se tiene el patrón fractal de las fracturas, lo que indica que efectos en la pata de cerro Seco tienen un potencial de afectación de esta zona de recarga. Dado el hecho de que el sistema es frágil por la baja disponibilidad de agua, seguir permitiendo la ampliación de actividades mineras (que remueven los acuíferos y destruyen suelos y vegetación) afectaría tanto la generación actual como las venideras dado los tiempos de movimiento del agua en el subsuelo y la destrucción de los repositorios de agua subterránea.

4. SECUENCIAS DE PALEOSUELOS EN CERRO SECO

A. INTRODUCCIÓN

Se presenta a continuación un estudio sobre las características y distribución de suelos y paleosuelos en el área conocida como Cerro Seco, los cuáles tienen importantes consecuencias para la dinámica geo-ecológica en el sitio y en la Sabana de Bogotá: **controlan la distribución del agua -y por tanto su infiltración-, soportan la vegetación, por ejemplo a través de la regulación de ciclos de nutrientes, y generan condiciones para la formación de formas únicas.**

B. LOS DATOS

El levantamiento de datos de suelos se realizó con colaboración de miembros de la comunidad local: en la medición de perfiles, registro del color y la estructura. Sin el conocimiento de la comunidad sobre el territorio, habría sido imposible visitar tantas exposiciones naturales del suelo.

La base de datos de suelos está compuesta por 62 perfiles con información en diferente detalle: 4 perfiles con datos completos de campo y laboratorio, 27 perfiles con datos de campo parciales, e.g. profundidad, nomenclatura de horizontes y color, y 31 perfiles con registro fotográfico.

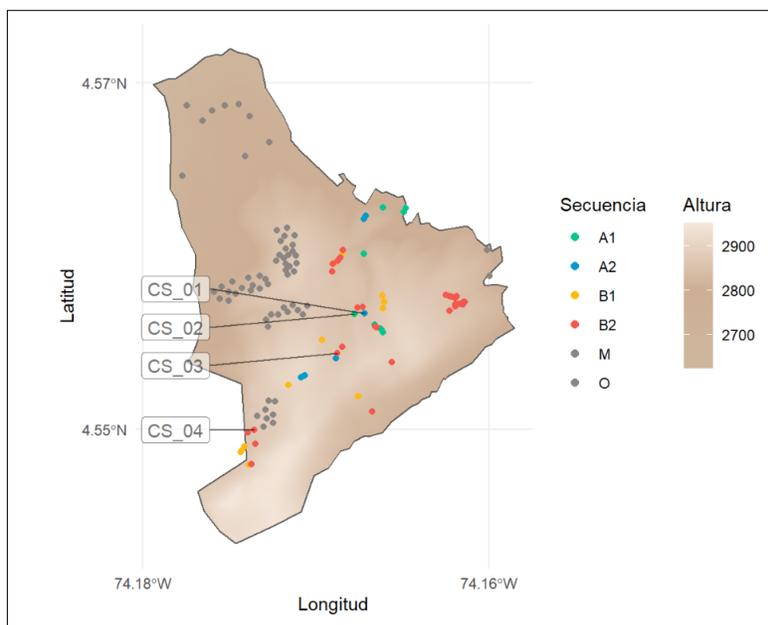


Figura 56. Localización de los perfiles con caracterización de campo y laboratorio.

Los perfiles de suelo estudiados en detalle y los estudiados en campo se utilizaron para interpretar aquellos que solo contaban con registro fotográfico. De esta interpretación se generalizaron dos tipos de secuencias de horizontes paleosuelos (A y B), las cuales tienen relevancia para la infiltración de agua, el soporte de la vegetación y los procesos de modelado del paisaje.

Debido a la sensibilidad del paisaje y a la accesibilidad a diferentes zonas, los perfiles de suelo estudiados corresponden a exposiciones naturales de suelo, en cárcavas, a lo largo de una franja orientada NE-SW. Algunas de las exposiciones de suelos registradas en campo necesitan estudio

con técnicas especializadas para su caracterización subsuperficial y fueron obviadas. Para otras localizaciones las condiciones de acceso a superficies modificadas por la acción de la minería, en rellenos y taludes de denudación, denominados O y M respectivamente, fueron la limitante.

C. LAS SECUENCIAS DE PALEOSUELOS

En el transcurso del Cuaternario se han acumulado depósitos de materiales piroclásticos, provenientes de los centros volcánicos de la Cordillera Central. Debido a la distancia entre los focos eruptivos y la Sabana de Bogotá, estos materiales fueron depositados en forma de lluvia de cenizas finas, que se preservaron en capas no alteradas en el fondo de los lagos o sufrieron transformaciones cuando cayeron sobre los relieves expuestos. Como se muestra mas adelante, en Cerro Seco se encuentran paleosuelos (suelos antiguos que reflejan condiciones ambientales de otras épocas) desarrollados sobre dichas cenizas que reflejan dos tipos condiciones ambientales y momentos en el tiempo distintos: la Formación Mondoñedo y la Formación Balsillas.



Foto 2. Paleosuelos arcillosos, de color claro, con concentraciones amarillas de óxidos de hierro típicos de la Fm. Balsillas.

En algunas áreas, las cenizas más antiguas se transformaron en productos arcillosos que forman actualmente depósitos importantes -como en la zona de Mondoñedo- de lo que se conoce como la formación (Fm.) Balsillas (Helmens & Van der Hammen, 1994). Paquetes de las mismas características se encuentran conservados en paleovalles y antiguas topografías favorables a la acumulación de materiales en la región. La parte más antigua de esta formación fue datada en $4,0 \pm 0,4$ Ma.

En general consiste de sedimentos coluviales relativamente finos, caoliníticos (halloysitas) con colores blancos rojizos o verdosos de granulometría fina (Padilla & Calderón, 2004). La presencia de halloysita junto con los patrones de distribución de los óxidos de hierro, típicos de suelos con fluctuación del nivel freático, indican que se trata de un paleosuelo sepultado.

Posterior a las condiciones que dieron lugar a la Fm. Balsillas ocurrieron subsecuentes aportes de ceniza volcánica, esta vez, sobre terreno elevado con buen drenaje de los suelos. Estos materiales

se conocen como la Fm. Mondoñedo, la cual está conformada por sedimentos coluviales de los últimos 10.000 años (último ciclo glacial-interglacial) (Van der Hammen, 2003), compuesto por arenas, limos, con clastos de composición, forma y tamaño heterogéneo, cenizas volcánicas alteradas, e intercalaciones de horizontes pedogenéticos negros, donde se acumuló materia orgánica. Se encuentra cubriendo varios depósitos de la secuencia Plio-Pleistocena o directamente sobre la roca (Padilla & Calderón, 2004). En el municipio de Mondoñedo los sedimentos yacen sobre la Fm. Balsillas o sobre arenitas del Grupo Guadalupe.



Foto 3. Intercalación de paleo-horizontes pedogenéticos negros entre depósitos limosos, eólicos y coluviales en la Fm. Mondoñedo.

Un factor común en ambas unidades son los materiales constituidos por vidrios volcánicos, feldespatos, cuarzo y algunos productos ferro-magnesianos, que son marcadores muy eficaces de las condiciones ambientales prevalecientes en la zona de depósito. Los vidrios se alteran y dan productos arcillosos característicos que dependen de la saturación o déficit hídrico dentro del perfil. Los suelos resultantes son testigo de condiciones paleo-ambientales o climáticas locales en el momento del depósito y su evolución en el tiempo (Favre, 1988; Favre & Gaviria, 1992).

Las secuencias que se presentan a continuación son una generalización de las formas de ocurrencia de las Fm. Balsillas y Mondoñedo en el área de Cerro Seco:

Tipo A: La Fm. Mondoñedo que yace directamente sobre roca de la Fm. Plaeners o Arenisca Dura.

- **Tipo A1:** secuencia de un único horizonte (de espesor entre 30 a 50cm) limo-arenoso, de color gris, gris oscuro o café, que yace sobre roca. En el caso del perfil CS_02 (representativo de este tipo), sobre la Fm. Plaeners. Debido al bajo de bases, arcillas y al pH elevado, se interpreta como un horizonte A/E, de eluviación, con leve enriquecimiento actual de materia orgánica por la acción de la vegetación.
- **Tipo A2:** La Fm. Mondoñedo yace sobre roca y muestra más de dos horizontes, típicos son el A/E y Bth, que abarcan entre 50 y 100cm. Algunos perfiles (ejemplo Foto 3) pueden abarcar mas de 2m. El perfil CS_01 es representativo de una secuencia potente (más de 50cm) de éste tipo. El horizonte característico Bth (Figura 57) se conoce comúnmente como neme y es

resultado de iluviación de materia orgánica y arcilla. El proceso de iluviación se reconoce en campo por la disposición de materia orgánica como revestimientos de terrones.

Tipo B: La Fm. Mondoñedo yace sobre la Fm. Balsillas. El cambio de una a la otra se observa en campo en un horizonte endurecido, con nódulos de hierro.

- **Tipo B1:** La Fm. Mondoñedo es muy delgada, presenta un único horizonte (más de 50cm), sobre la Fm. Balsillas. Esta ocurrencia es típica en zonas expuestas donde la Fm- Mondoñedo parece haber sido erosionada (Foto 2).
- **Tipo B2:** La Fm. Mondoñedo, de espesor moderado a potente (más de 70cm), con más de dos horizontes yace sobre la Fm. Balsillas. Los perfiles CS_03 y CS_04 son representativo de una secuencia de más de 2 horizontes. En CS_03 la roca que subyace a la Fm. Balsillas es la Fm. Plaeners. Para el perfil CS_04 se desconoce el espesor de la Fm. Balsillas y la roca subyacente.

Tipo M: Suelos no caracterizados en zonas con actividad minera.

Tipo O: Otros suelos no caracterizados, por ejemplo rellenos de minería.

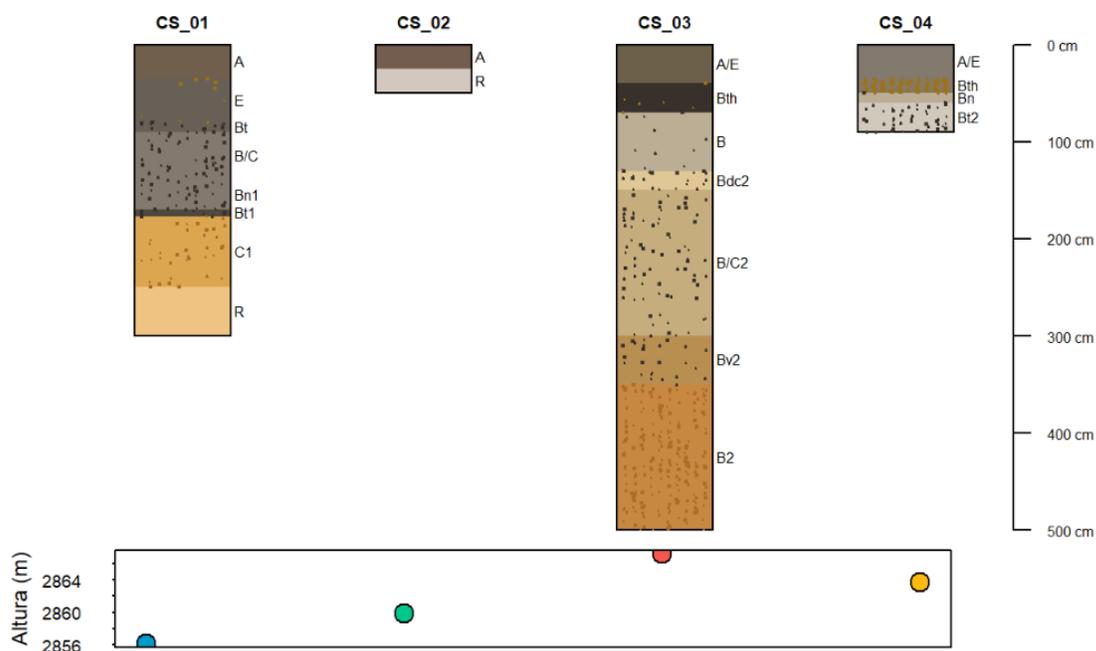


Figura 57. Modelos de perfiles de suelos. Los colores en la leyenda de altura corresponden a la leyenda de secuencia de la Fig. 56.

D. PROPIEDADES RELEVANTES PARA INFILTRACIÓN, VEGETACIÓN Y EROSIÓN.



Foto 4. Perfil CS_03 con la Fm. Mondoñedo (gris, superior) sobre la Fm. Balsillas (tonos naranjas, inferior).

A continuación, se presenta la distribución de propiedades químicas (y algunas físicas) a lo largo de los perfiles tipo. Los análisis se encargaron a los laboratorios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En la Figura 58 se presenta la distribución de partículas de arena, limo y arcilla, que tiene un patrón similar para las secuencias tipo B1 y B2 (CS_03 y CS_04): un horizonte arenoso / areno-limoso superficial (A/E) que facilita la infiltración y escorrentía subsuperficial, subyacente por uno o más horizontes arcillosos (Bt), que dificultan la infiltración a través de la matriz del suelo. El horizonte Bt más superficial tiene un alto contenido de bases, que indican que los procesos de lixiviación -y por tanto la infiltración- son escasos. A aproximadamente 1m de profundidad se observa un horizonte duro, debido en parte a enriquecimiento de minerales estables de Fe, y con notables grietas verticales. El perfil CS_03 (Foto 4) presenta a cerca de 3 m de profundidad un horizonte con endurecimiento por hierro (Bv), extremadamente duro, que bloquea la infiltración a través de la matriz.

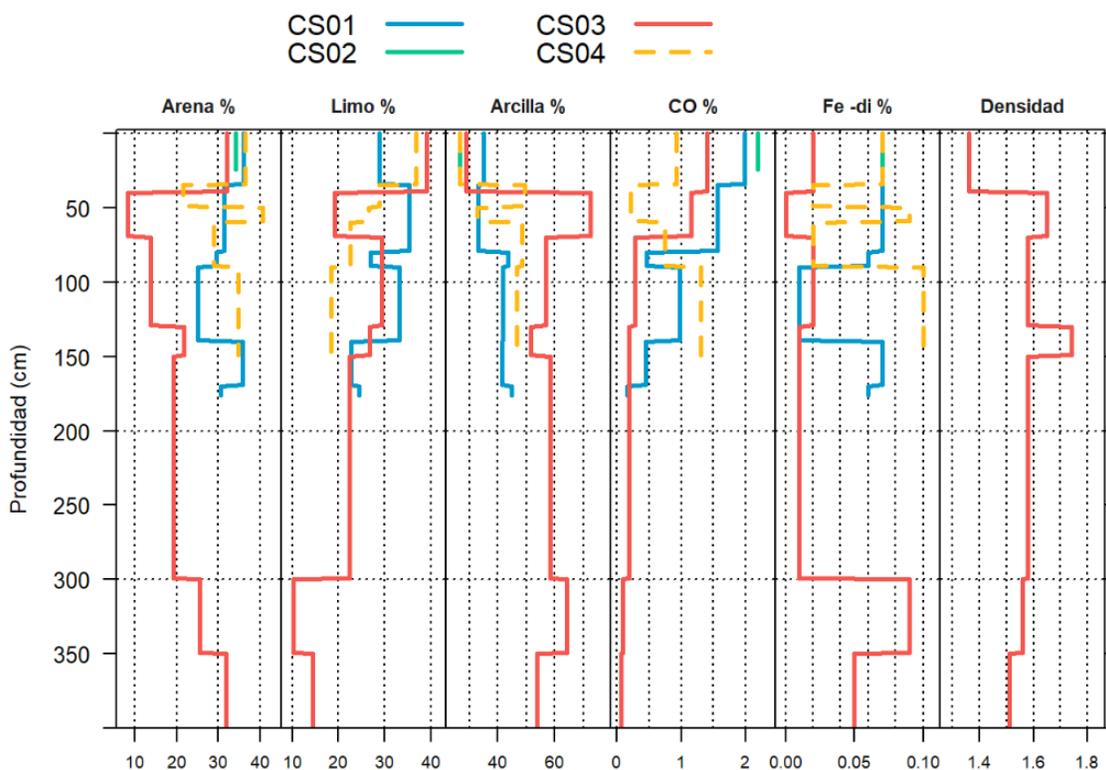


Figura 58. Propiedades que afectan la infiltración del agua en los suelos.

La secuencia tipo A tiene, en comparación con la secuencia tipo B, más arena y limo que arcilla, como se observa en el perfil CS_01. Se observan algunos horizontes Bt delgados, ricos en arcilla, materia orgánica y bases, que dificultan la infiltración a través de la matriz. Sin embargo, la materia orgánica cubre las caras de terrones estables de forma angular y subangular, facilitando la infiltración por macroporos. Los óxidos de hierro estables e inestables ocurren en horizontes limosos y arenosos sin formar capas endurecidas.

Además de los horizontes que dificultan la infiltración a través de la matriz del suelo, se observan numerosas grietas. Estas grietas se deben a la acción de las raíces y a la composición mineralógica de los paleosuelos, que tiene parte de esmectita, la cual es susceptible a la contracción y expansión en ciclos de sequía y humedecimiento. Los suelos presentan por tanto pedalidad compuesta: estructuras de tipo columnar, que contienen prismas angulares y sub-angulares, las cuales facilitan la infiltración.

La Figura 59 presenta la distribución de propiedades químicas que tienen efectos en la vegetación. La textura areno-limosa que presentan todas las secuencias en los primeros 50 cm (Fig. 58) facilita la penetración de raíces. A esta profundidad, sin embargo, no hay buena disponibilidad de nutrientes, como lo evidencian el pH bajo, bajo contenido de materia orgánica, fósforo y baja capacidad de intercambio catiónico. La presencia de mineraloides de aluminio y sílice (Si-ox) en mayor concentración en el perfil CS_04 a este nivel indica, sin embargo, potencial para almacenar nutrientes.

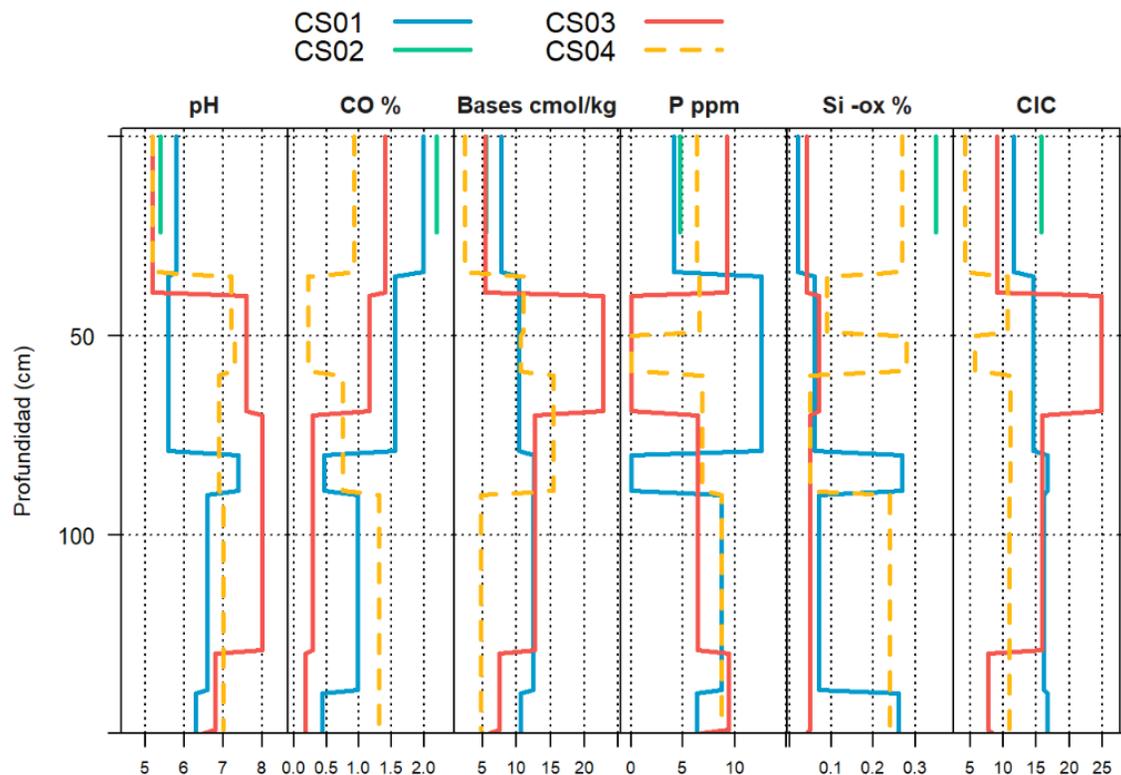


Figura 59. Propiedades que afectan la vegetación.

Por debajo de los 50 cm las condiciones de nutrientes mejoran en varios aspectos: el pH es neutro a básico, el fósforo (al menos para la secuencia tipo A) aumenta, y la capacidad de intercambio catiónico aumenta. Estas características explican la presencia de raíces penetrando horizontes arcillosos a profundidad de 1m en algunos suelos, generando a su vez un efecto positivo en la infiltración.

La Figura 60 presenta propiedades que afectan la erosión. Las partículas de tamaño limo son más propensas a la erosión física que la arena (debido a su peso) y la arcilla (debido a su aglomeración), particularmente cuando el contenido de materia orgánica es bajo. En este sentido, la secuencia tipo B es más propensa a la erosión por escorrentía superficial. El socavamiento subsuperficial ocurre por acción química en horizontes arcillosos, que se observa cuando el sodio intercambiable aumenta, la relación calcio:magnesio es menor o cercana a 2 y la conductividad eléctrica es baja. Estas condiciones se observan en varios horizontes de las secuencias A y B por debajo de 1 m. El aumento de pH a esta profundidad genera un efecto destabilizante para los coloides de arcilla, debido al incremento de cargas negativas, en la superficie de los minerales, que generan un efecto repulsivo entre partículas. La evidencia de esta dinámica a profundidad es evidencia de la infiltración de agua a través del perfil de suelo.

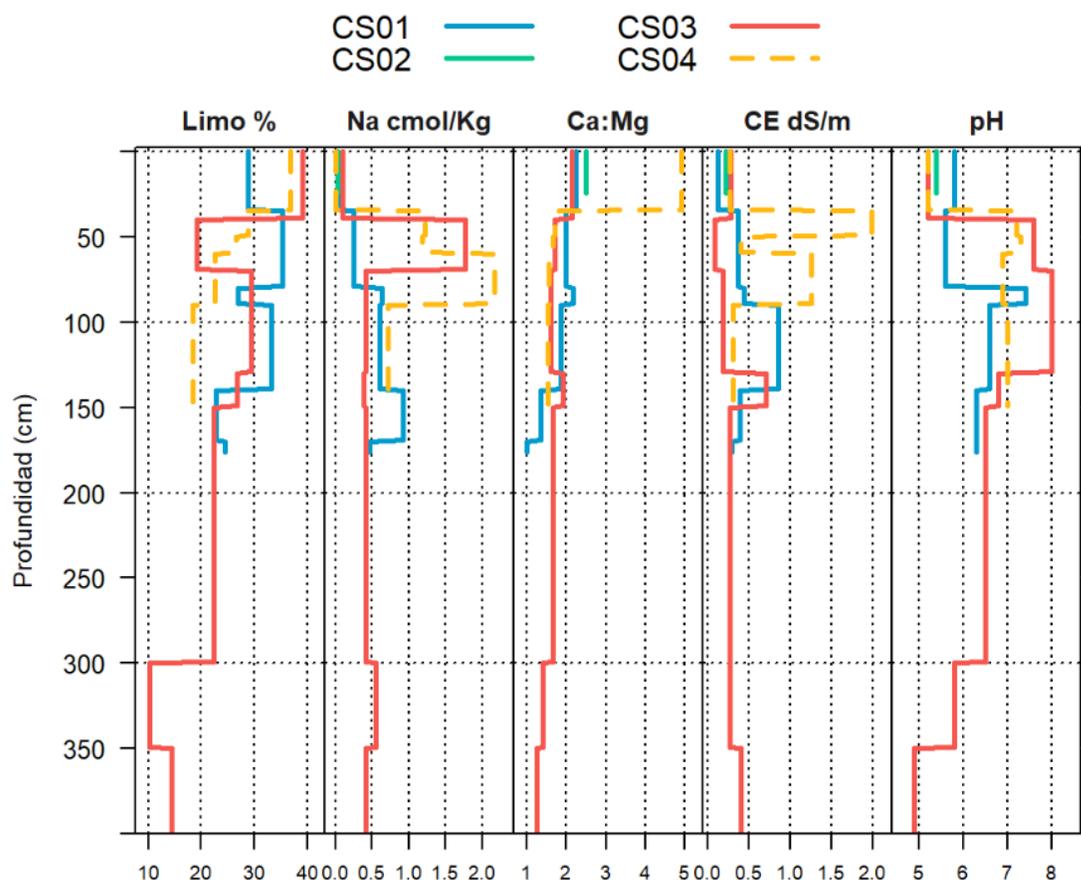


Figura 60. Propiedades que se relacionan con la erosión de los suelos.

E. LA MINERALOGÍA Y SU SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL

Los análisis por difracción de rayos X (DRX) ayudan a reconocer la huella volcánica en los materiales de origen de los paleosuelos de Cerro Seco, tomando muestras de un perfil representativo que incluye la secuencia de horizontes de la Formación Mondoñedo y de los materiales de la Formación Balsillas (CS_03).

Esta técnica de caracterización permite reconocer las estructuras cristalinas propias de minerales primarios, arcillas y óxidos, producto de la meteorización en el perfil y da -en menor grado- información sobre presencia de minerales menos cristalinos (amorfos). La respuesta de los rayos X cuando interactúan con los diferentes planos cristalográficos produce señales características que son interpretadas con ayuda de patrones conocidos cuando se analiza el material en polvo (Dixon y Weed, 1989).

Para la identificación de arcillas, minerales con estructura laminar que proveen información relevante sobre la evolución de los suelos en los (paleo)ambientes de la zona, se efectúan análisis DRX sobre la fracción menor de 2µm en lámina orientada. En este caso se realizaron cuatro tratamientos por muestra: en estado natural (N); expandida con etilen-glicol (EG), molécula que penetra en las inter-láminas de especies expansivas; a 100°C para extraer moléculas de agua inter-

laminares y a 500°C para reconocer estructuras que se destruyen a esta temperatura (Thorez,, 1976; Besoain, 1985).

Se analizaron los paleosuelos de la Fm. Mondoñedo (3 muestras) sobre paleosuelos sepultados de la Fm. Balsillas (3 muestras), hasta una profundidad de 5 metros en el sitio CS_03 (Foto 3) y algunas muestras procedentes de la secuencia espesa de paleosuelos de Fm. Mondoñedo (3 muestras) sobre la Fm. Plaeners en el sitio CS01.

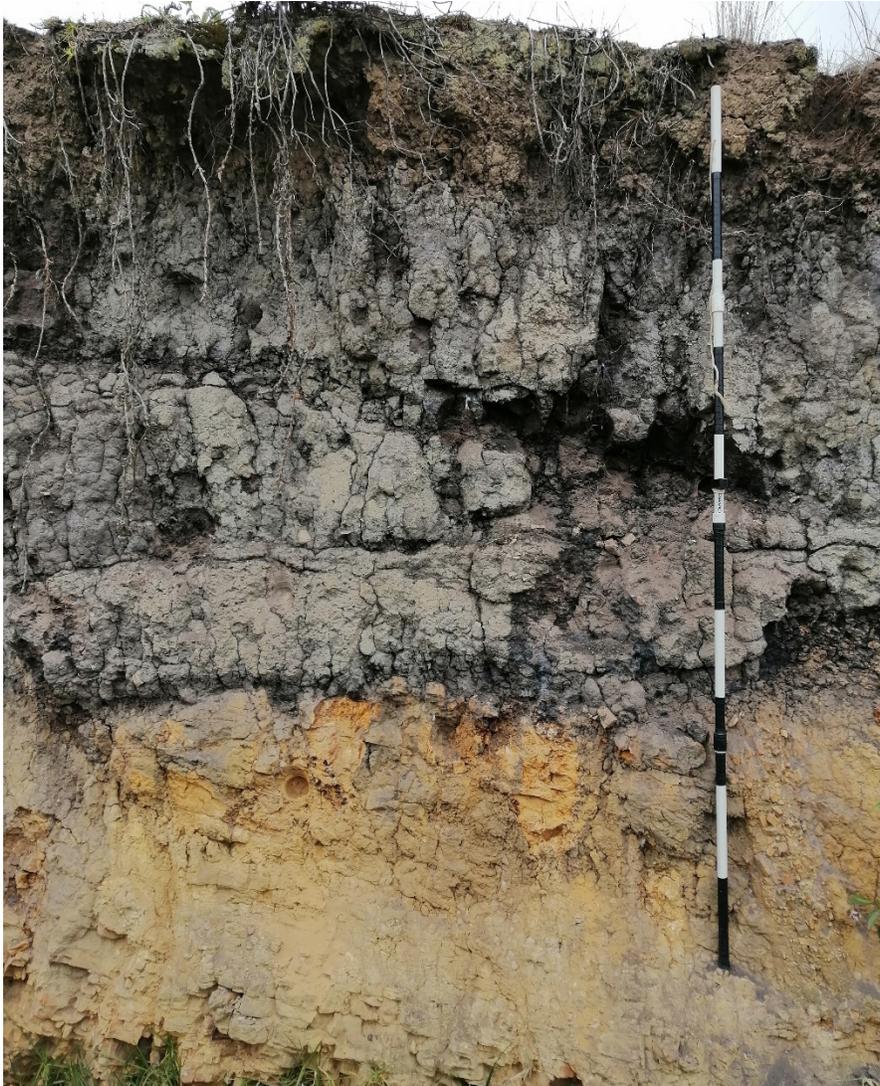


Foto 5. Perfil CS_01: Fm. Mondoñedo con deposito coluvial entre dos paleo-horizontes Bth. El horizonte A/E tiene fuerte actividad de raíces.

El cuarzo (Q) es el mineral predominante en todos los niveles de paleosuelos, en el horizonte eluvial de superficie de CS03 el contenido es muy alto, mientras que en el horizonte iluvial es menos abundante (Figura 61a). Los tres horizontes de la Fm. Mondoñedo contienen feldespato potásico (Fk) y plagioclasa (Pg), probablemente andesina. En el horizonte superficial son más abundantes, disminuyen hacia abajo del perfil de suelos, primero desaparece la plagioclasa, y no se encuentran

feldespatos en los sedimentos. Todas las muestras, excepto la más profunda, contienen cristobalita (Cr), polimorfo del cuarzo de alta temperatura, que indica aporte de cenizas en la región.

Dos muestras del sitio CS01 contienen los mismos minerales primarios: cuarzo, feldespatos, hornblenda y cristobalita, dentro de la secuencia de paleosuelos superpuestos (Figura 61b). Estos minerales primarios se han concentrado en el horizonte superior de cada paleosuelo, durante procesos sucesivos de eluviación. Su presencia confirma la ocurrencia de aportes de cenizas volcánicas en esta unidad.

En cuanto a productos de meteorización, se reconoce en este ensayo la halloisita deshidratada (Ha d), presente en ambas secuencias, con espesor inter-laminar de 7,25Å. Se percibe también la presencia de estructuras mal cristalizadas de mayor espesor laminar, fases que se discuten en los análisis de la fracción arcilla. Los óxidos de hierro, goethita (Gt) y hematita (Hm) aparecen en la base de los suelos y aumentan en profundidad en los niveles de sedimentos.

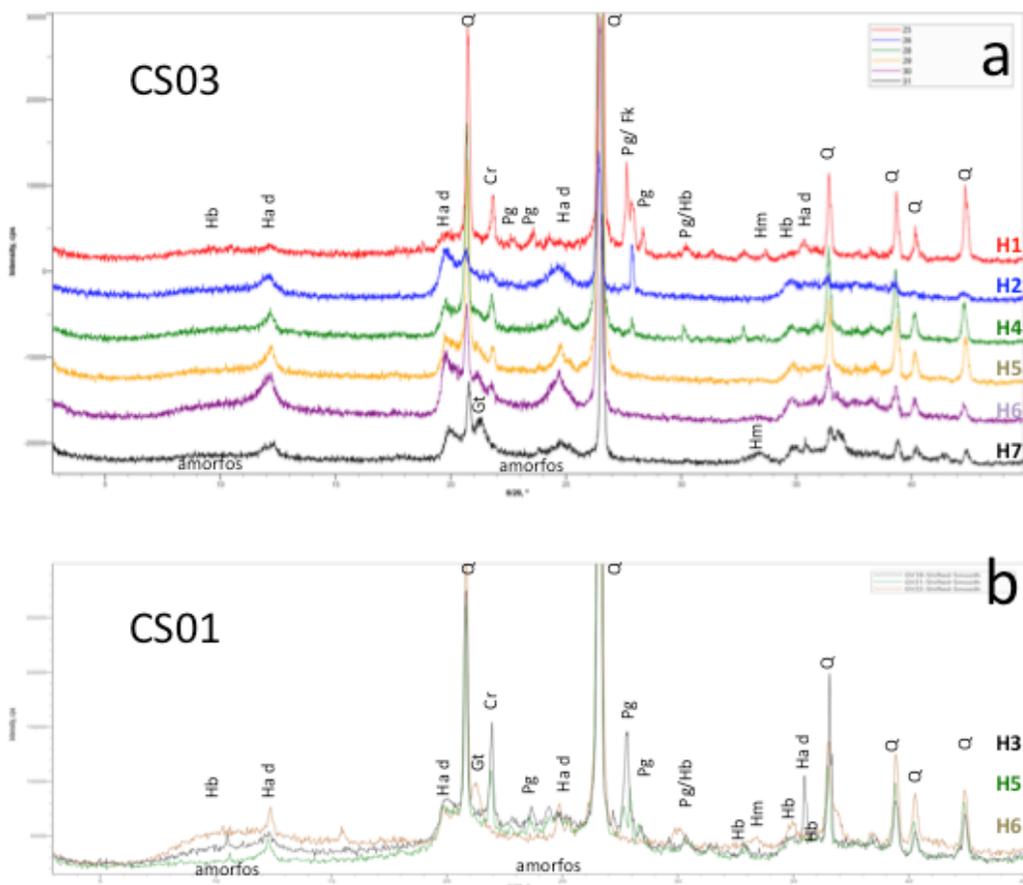


Figura 61. Difractogramas de muestras de suelo en polvo. a. Perfil CS03, horizontes H1,H2,H4,H5,H6,H7. b. Perfil CS01, horizontes H3,H5,H6. Q=Cuarzo; Fk= Feldespato potásico; Pg=Plagioclasa; Hb=Hornblenda; Cr=Cristobalita; Ha d=Halloisita deshidratada; Gt=Goethita; Hm=Hematita; Amorfos.

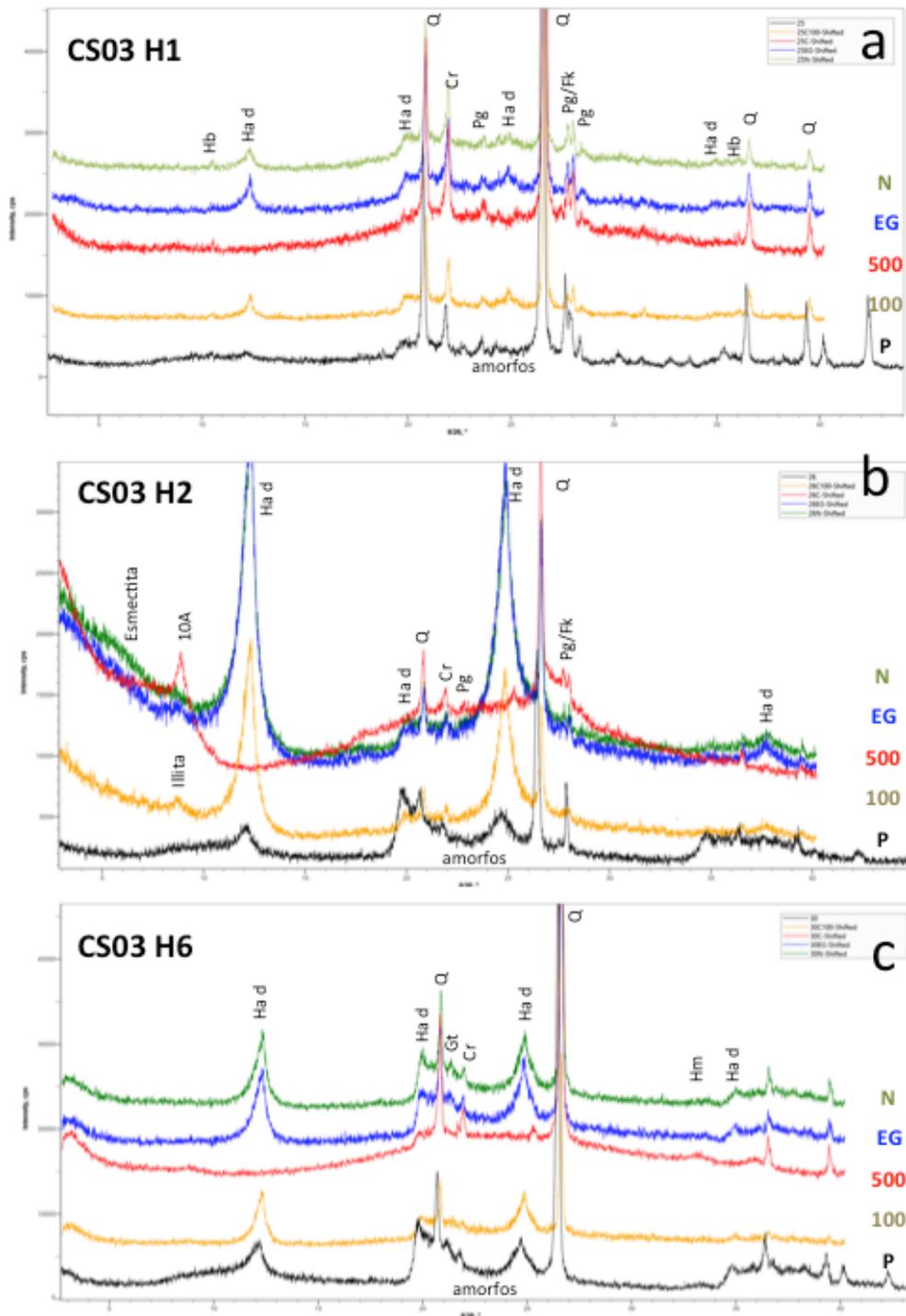


Fig. 62. Difractogramas la fracción <2mm del perfil CS03. 2a. Horizonte eluvial H1; 2b. Horizonte iluvial H2; 2c. Horizonte de alteración H6. N=Natural, EG=Etilenglicol, 100°C, 500°C, P=Polvo. Q=Cuarzo; Cr=Cristobalita; Ha d=Haloisita deshidratada; Esmectita; Illita; Gt=Goethita; Hm=Hematita, Amorfos.

El análisis de la fracción arcilla de algunas de las muestras de la secuencia CS03 se presenta en la Figura 62: horizonte eluvial (Fig. 62a), horizonte iluvial (Fig. 62b) y horizonte de alteración (Fig. 62c).

En el horizonte eluvial los minerales primarios dominan la fracción arcilla que está constituida exclusivamente por halloisita deshidratada (Fig. 62a). Esta especie está mal cristalizada en su estado natural (N), la estructura mejora con los tratamientos EG y 100°C por la salida de aguas interlaminares y desaparece a 500°C, comportamiento típico de un aluminosilicato de relación 1:1 neoformado, por cristalización incipiente de vidrios volcánicos meteorizados. Este proceso implica cambios de humedad y sequía ambiental.

El horizonte iluvial se forma por el transporte de coloides en suspensión a través del perfil. Se enriquece en arcillas y concentra halloisita deshidratada bien cristalizada con picos intensos y agudos (Fig. 62b). Una fracción de illita aparece con la pequeña señal de 10A (angstroms) que permanece en todos los tratamientos. Llama la atención la presencia de una banda ancha a ángulos bajos en la muestra natural, que se hincha levemente con EG y colapsa parcialmente a 10A. Este comportamiento es típico de esmectitas, minerales arcillosos expansivos que en este caso están muy mal cristalizados.

Dentro de la interlámina de las esmectitas existen pilares de aluminio que impiden el cierre completo de la estructura pues a 500°C mantiene un hombro entre 10 y 14A. Este mineral es un producto intermedio de cristalización de vidrios volcánicos en presencia de cationes básicos que son invadidos en algún momento de la síntesis por iones aluminio procedentes de la meteorización de los vidrios. La banda que aparece en el material en polvo centrada en 10A es indicativa de la persistencia de productos amorfos aluminosos en este nivel.

F. LA DISTRIBUCIÓN DE PALEOSUELOS EN EL PAISAJE

Existen varias formas de cartografiar suelos: en un extremo, generalizando la ocurrencia de clases de suelos en unidades geomorfológicas, en el otro, la cartografía digital predictiva, que usa variables ambientales que representan los factores de formación del suelo para predecir y explicar su ocurrencia.

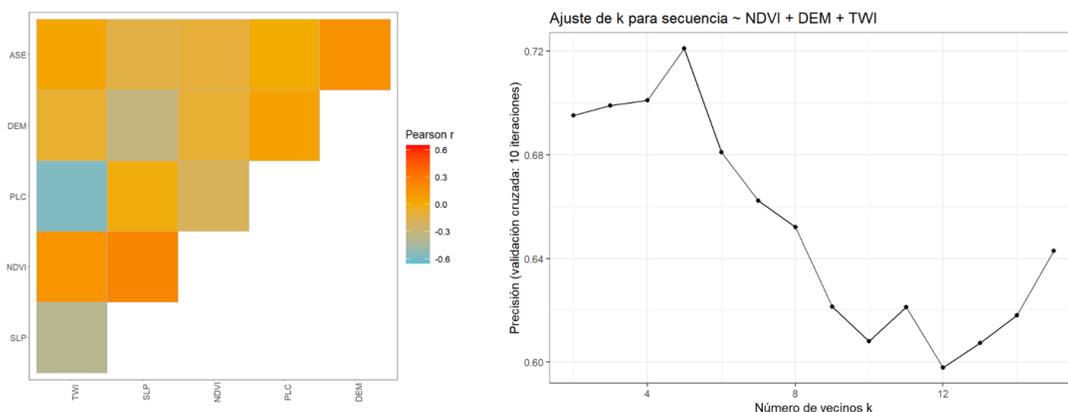


Fig. 63. Correlograma de covariables ambientales (izquierda) y curva de optimización del parámetro k en el modelo de k-vecinos más próximos (knn), como función de NDVI, DEM y TWI.

En el caso de la distribución de paleosuelos, la generalización con base en geoformas no logra capturar la ocurrencia de secuencias distintas en el rango de decenas a cientos de metros. Una posible explicación es que la distribución de secuencias de paleosuelos obedece a una mezcla de factores de formación antiguos -que no representan el paisaje actual- y actuales, además de posibles micro ambientes de depósito para las cenizas volcánicas.

La cartografía digital podría predecir y explicar la distribución de secuencias de paleosuelos, si se contase con una distribución homogénea de observaciones en el área y con una colección de variables ambientales apropiada. Este no es el caso en Cerro Seco, debido a los conflictos que dificultan el acceso a sitios y a la escasa documentación ambiental que existe en el área. Aquí se utiliza un acercamiento intermedio: la interpolación de clases de suelos con ayuda de covariables ambientales, las cuales fueron seleccionadas entre numerosos índices del terreno debido a su baja correlación entre sí (Figura 63) y a través de un proceso de validación cruzada para optimizar la precisión (Guio Blanco et al. 2018).

La Figura 64 muestra el modelo predicho por el algoritmo k-vecinos más próximos (knn) entrenado con $k=5$ y las covariables NDVI (un proxy para la cobertura vegetal), DEM (la elevación) y TWI (un proxy para la acumulación de humedad debido a las características del relieve). La predicción funciona debido a que las covariables representan factores de formación del suelo (Jenny, 1994).

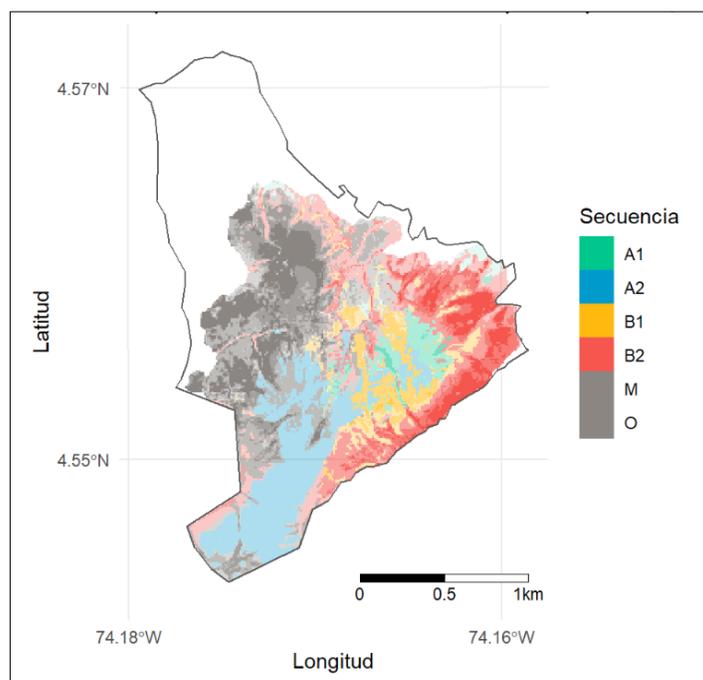


Fig. 64. Mapa de secuencias de paleosuelos generado mediante entrenamiento del algoritmo knn, con $k=5$ y las covariables NDVI, DEM y TWI. Incertidumbre = 0,72, Kappa = 0,62. El grado de transparencia de los colores en el mapa aumenta a menor probabilidad de ocurrencia de una secuencia con relación a las demás.

G. CONCLUSIONES

El predominio de secuencias de secuencias potentes de paleosuelos (A2 y B2) en Cerro Seco tiene varias consecuencias para la dinámica del ecosistema: en relación con el agua, la presencia de varios

horizontes heterogéneos, pero interconectados a través de una red de grietas -facilitada por la acción biológica, química y mineralógica- tiene un efecto favorable en la regulación hídrica, tanto para almacenamiento como para redistribución. Cada tipo de condición hidropedológica en el parque es importante: en la zona suroeste predomina la ocurrencia de la Fm. Mondoñedo directamente sobre la roca, lo cuál facilita la infiltración de forma más directa hacia el acuífero. En la zona este-sureste, donde la Fm. Balsillas tiene mayor ocurrencia -en zonas de pendientes moderadas a altas- su espesor potente, mayor contenido de arcilla y horizontes cementados intercalados, se favorece la redistribución lateral de agua a través de escorrentía subsuperficial, hacia cuerpos de agua cercanos. Esta característica hace también que los procesos erosivos sean mas fuertes allí, aprovechando concentraciones subsuperficiales de sodio, y se desarrolle con mayor intensidad el paisaje de cacavas, con sus micro-ecosistemas.

Contrario a lo que se piensa comúnmente, los suelos y paleosuelos en Cerro Seco tienen propiedades favorables para el establecimiento de vegetación particular, adaptada a las condiciones climáticas semi áridas y con mecanismos particulares de optimización de recursos por debajo de 50 cm. La presencia de secuencias compuestas de paleosuelos, en la mayor parte del parque, indica que hay variadas condiciones de disponibilidad de nutrientes y agua. En este sentido, los suelos en la parte de bajas pendientes al suroeste serían los mas favorables para vegetación mas generalista, debido a la posibilidad de encontrar varios horizontes intercalados Bt, que almacenan nutrientes, a la vez que retardan la infiltración, mientras en el el sector este-sureste debido a la mayor dinámica de carcavamiento, la vegetación necesita especializarse, incluso llegando a ocupar las carcavas como microambientes.

Las condiciones de evolución de los suelos en un ambiente seco y con llegada de cenizas volcánicas en diferentes momentos que abarcan al menos los últimos 3 millones de años, generan condiciones para la formación geoformas únicas que incluyen carcavamiento con colores intensos que pueden ir del rojo al negro. Estas geoformas han ido desapareciendo de la ciudad por ocupación o por arrasamiento – nivelación con depósitos antrópicos. Cerro Seco es de los pocos donde aun se conservan dichas geoformas.

Desde el punto de vista hidropedológico Cerro Seco no es un terreno homogéneo y baldío, sino una rica mezcla de condiciones que prestan variados servicios. Esto implica que su conservación no puede ser sectorizada.

El nuevo conocimiento que se presentó se desarrolló gracias a un esfuerzo conjunto con miembros de la comunidad local. El intercambio de información con ellos y ellas nutrió nuestra percepción, y demuestra además que el entendimiento del ecosistema en Cerro Seco trasciende el interés técnico-científico de los autores, sirviendo a la comunidad para fortalecer vínculos con el territorio.

5. FLORA DE CERRO SECO Y SU ÁREA DE INFLUENCIA: CONSIDERACIONES SOBRE LA CONSERVACIÓN DEL ÚLTIMO RELICTO DE SUBXEROFITIA AL SW DE BOGOTÁ

A. INTRODUCCIÓN

El Distrito Capital se destaca por poseer importantes coberturas vegetales de los principales ecosistemas montañosos y paramunos conocidos para la cordillera Oriental. Entre todos estos, **el Cerro Seco se destaca al ser el único enclave de ecosistemas semisecos de la franja altoandina que posee en el extremo suroccidental del casco urbano (subxerofitia andina)**, siendo el resultado de miles de años de evolución de los Andes colombianos.

La presión de la expansión capitalina y del vecino municipio de Soacha ha venido acrecentándose especialmente desde la década de 1970, dejando su huella evidente sobre el área. Pese a esto, el Parque proporciona hábitats únicos de los cuales dependen numerosos organismos que aún sobreviven en estos espacios particulares, viéndose seriamente amenazados ante la posible transformación y desaparición de sus espacios mínimos vitales.

Diversas organizaciones sociales y comunitarias impulsan propuestas para su protección y rehabilitación junto con su integración a la red de áreas distritales de manejo especial. No obstante, la falta de conocimiento mínimo sobre grupos bióticos esenciales como su flora impide resaltar su valor ecosistémico ante la ciudadanía y las autoridades ambientales, pesando fuertemente ante los tomadores de decisiones otras propuestas dirigidas hacia el desarrollo económico de la región, a expensas de sus últimas áreas seminaturales.

Una búsqueda de información sobre la biota regional demostró que durante las décadas de 1940-1960 se adelantaron algunas iniciativas de herborización en los alrededores, sumándose a esfuerzos aislados adelantados en años recientes por instituciones como el Jardín Botánico de Bogotá y la Universidad Nacional de Colombia, pero ninguna de ellas estuvo dirigida hacia la caracterización sistemática de la biota de Cerro Seco. La naturaleza de sus ambientes y sus coberturas vegetales permanece sin ser documentada en detalle.

De esta manera, **el área ha permanecido ausente de la agenda ambiental del Distrito**, constituyendo un espacio invisible y malinterpretado sujeto a medidas de manejo inadecuadas basadas en la ausencia de información biológica, generalmente diseñadas para los entornos boscosos típicos de sectores capitalinos como los Cerros Orientales. Las propuestas que actualmente se discuten para su ordenamiento tampoco satisfacen sus necesidades ecosistémicas, reduciendo y transformando su espacio mínimo vital dando prioridad a actividades de sectores como infraestructura y minero.

Con el propósito de aportar al conocimiento de los elementos naturales regionales e impulsar su declaratoria como área protegida distrital, la presente investigación consideró la caracterización rápida de la flora actual y potencial más representativa del Parque y su área inmediata de influencia, siendo el componente crítico de las coberturas vegetales y el edificio biótico en el cual la fauna habita y desarrolla sus actividades fundamentales. Se discute sus implicaciones en la toma de decisiones.

B. MÉTODOS

Para la presente evaluación se propuso una aproximación múltiple, considerando la revisión exhaustiva de fuentes impresas y electrónicas alusivas a la flora y vegetación del área de estudio y otros ecosistemas secos de la sabana de Bogotá y el altiplano Cundiboyacense, y el **levantamiento de nueva información a partir de reconocimientos sobre el terreno y el estudio de recolectas botánicas**, en conjunto con el tratamiento de diferentes insumos cartográficos disponibles para la zona.

i. Información secundaria

Se revisaron cerca de 150 documentos alusivos a la flora, las comunidades vegetales, las condiciones bióticas y la historia ambiental y paleoambiental de Cerro Seco y la subxerofitia del altiplano Cundiboyacense. Finalmente se depuraron las fuentes directamente relacionadas con la flora identificada en otros sectores de la subxerofitia y los valles secos del altiplano, así como en las caracterizaciones de posibles ensamblajes vegetales afines a las coberturas actuales presentes en el área de estudio.

Entre los listados florísticos más relevantes sobre las plantas vasculares y no vasculares de algunos sectores de la subxerofitia del altiplano se cuentan los de Fernández-Alonso (1997) para Checua-Nemocón; Pinzón & Linares (2001, 2006) para La Herrera-Mosquera; Avellaneda-Cadena & Betancur (2007) para Suesca; Torres-Merchán & Sarmiento (2009) para Nobsa; Ariza-Cortés et al. (2010) para los enclaves secos de Soacha colindantes con Cerro Seco; y González-Martínez & López-Camacho (2012) para Ráquira. Fernández-Alonso & Rivera-Díaz (2002) y Giraldo-Pastrana & Alcázar-Caicedo (2008) ofrecieron algunas pautas generales sobre los endemismos observados en las regiones subxerofitias del centro del país, mientras que Giraldo-Cañas (2020) proporcionó anotaciones sobre el entorno en el que crece *Agave sylvestriana* Giraldo-Cañas, **especie recientemente descrita para el sector Piedra del Indio en Cerro Seco**.

Reseñas generales de comunidades vegetales propias de sectores aledaños a Cerro Seco se encontraron especialmente en las contribuciones de Cortés-Sánchez (2008a, 2008b) sobre las cuencas de los ríos Tunjuelo y Bogotá. Otras fuentes sobre la vegetación subxerofítica seminatural del altiplano corresponden a Wijninga et al. (1989) para La Herrera; van der Hammen (1997, 2008), Groenendijk et al. (2005) y Cortés-Sánchez (2011) para el valle del río Checua; Cortés-Sánchez et al. (1999, 2000) y Cortés-Sánchez (2003) para la serranía de Chía (Majuy); Rivera-Ospina et al. (2004) para los corredores secos del norte (Guatavita, Nemocón, Suesca) y centro de la sabana (Suba, Chía); y Rangel-Churio & Aguirre-Ceballos (1986) para Tota. Calvachi-Zambrano (2012) ofreció una visión general para los diferentes sectores del altiplano. Anotaciones sobre las relaciones entre las coberturas vegetales actuales de la subxerofitia respecto a las del pasado fueron presentadas por autores como van der Hammen & González (1965), van Geel & van der Hammen (1973), van der Hammen & Cleef (1983), Hooghiemstra (1984), y van der Hammen (2008), entre otros. Los estudios de Cantillo-Higuera & Gracia-Cuellar (2013) y Hernández-Roa & Rangel-Churio (2009) permitieron efectuar algunas comparaciones respecto a la vegetación de los Cerros Orientales y los humedales de Bogotá.

El inventario de la flora conocida para el área de influencia de Cerro Seco se complementó con registros históricos y recientes existentes en colecciones biológicas colombianas. Se hicieron consultas a colecciones virtuales como las de los herbarios Nacional Colombiano (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/>) y del Jardín Botánico de Bogotá (<http://herbario.jbb.gov.co/>), así como a portales de datos en línea como los de la Infraestructura Mundial de Información sobre Biodiversidad – GBIF (<https://www.gbif.org/>), y el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia – SiB (<https://sibcolombia.net/>), entre otras. Dado que la cantidad de registros de ejemplares botánicos para la zona es escasa, se alimentó el juego de datos con observaciones provenientes de la plataforma de ciencia ciudadana iNaturalist Colombia (<https://colombia.inaturalist.org/>), previa corroboración de la calidad taxonómica de las ocurrencias por parte de los curadores del Herbario J.J. Triana.

ii. Nueva información

Para el levantamiento de información sobre el terreno, entre marzo de 2018 y abril de 2021 se efectuaron diferentes visitas de reconocimiento florístico y herborización en algunos de los ambientes más representativos del Parque en Bogotá y otros sectores complementarios del municipio de Soacha, en colaboración entre la Corporación Geoambiental TERRAE y la Fundación Trópico Alto con organizaciones como el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, el Jardín Botánico de Bogotá, y algunos colectivos ambientales de la localidad. Se consideraron tanto grupos vasculares (angiospermas, helechos, licofitas) como no vasculares (musgos, hepáticas, líquenes), involucrando elementos nativos e introducidos con el ánimo de establecer un diagnóstico sobre su estado de conservación. Los procesos curatoriales de preservación e identificación taxonómica contaron con la colaboración técnica y logística del Herbario J.J. Triana (HJT).

iii. Estandarización y análisis

Observaciones y recolectas de Cerro Seco fueron documentadas con metadatos sobre localización, estado morfológico-fenológico de las plantas, y descripción de hábitat y coberturas vegetales. Se integró a su vez la información sobre la composición florística de las principales regiones subxerofíticas del altiplano, junto con algunos referentes sobre sectores altoandinos de Tunjuelo y los Cerros Orientales de Bogotá.

La sistematización y análisis básico de la información proveniente de las diferentes fuentes se efectuó en el programa Microsoft Excel®, siendo sometida a un proceso detallado de integración y estandarización. La validez de los nombres taxonómicos fue corroborada a partir del Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia en línea (<http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/>), y otras bases de datos botánicas como TROPICOS y POWO de los jardines botánicos de Missouri (<https://www.tropicos.org/home>) y Kew (<http://www.plantsoftheworldonline.org/>), entre otras.

Se verificaron aspectos críticos para la conservación de las plantas como su distribución geográfica restringida (endemismo), su estado conocido de amenaza según los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), y su protección frente a su aprovechamiento indiscriminado de acuerdo con vedas nacionales o regionales decretadas por el

estado colombiano, o con los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).

La ubicación geográfica de los ejemplares botánicos y las ocurrencias sobre el terreno fueron validadas empleando el programa Google Earth Pro® ver. 7.3.3.7786 (64-bit). Las imágenes recientes de sensores remotos y el modelo digital de elevación disponibles en esta herramienta fueron aprovechados igualmente para corroborar las observaciones efectuadas sobre los ambientes más representativos del sector y establecer una **zonificación básica de coberturas vegetales actuales** mediante fotointerpretación, proceso desarrollado por la Corporación Geoambiental TERRAE.

Los listados depurados fueron empleados como base para una **aproximación preliminar a la riqueza de la flora del sector y su estado de conservación**, de acuerdo con la presencia y distribución de elementos botánicos que enfrentan grados significativos de amenaza. Se aprovecharon además para evaluar la flora compartida entre Cerro Seco y las demás regiones de la cordillera Oriental, permitiendo abordar el grado de relación florística regional existente respecto a otros sectores de la subxerofitia y el bosque altoandino, así como la posible presencia en el Parque de algunos de los tipos de vegetación previamente descritos para estos sectores. Para el primer caso, se efectuó un análisis de agrupamiento de tipo aglomerativo (clustering) empleando el programa PC-ORD para Windows® ver. 7.08, combinando distancias de Sørensen (presencia-ausencia) con el método de agrupamiento de Distancia Promedio Ponderada.

C. RESULTADOS

i. Registros florísticos

La caracterización preliminar de la flora de Cerro Seco y su área inmediata de influencia se adelantó a partir de 529 ocurrencias identificadas para la zona, incluyendo 203 registros de colecciones biológicas (93 especímenes del proyecto, 110 de otras colecciones) y 326 observaciones complementarias, ya sea propias del proyecto Cerro Seco (152), consultadas en plataformas de ciencia ciudadana en línea (92), o derivadas de literatura (82) (Figura 65).

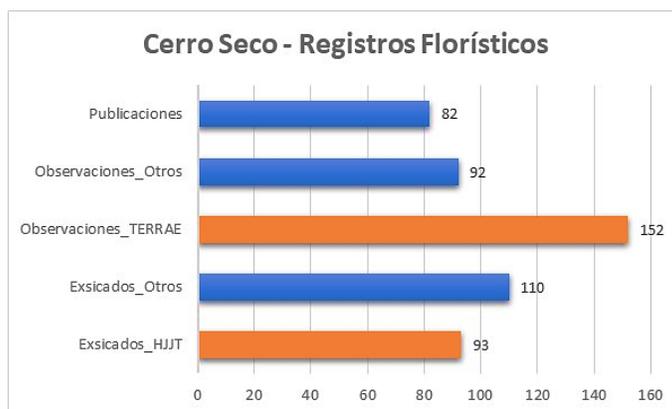


Figura 65. Representatividad de las fuentes empleadas para la caracterización florística de Cerro Seco

La información representa un período de siete décadas (1948-2021). Se observan dos ventanas de tiempo: un primer período entre 1948-1967 representado en 80 colecciones históricas provenientes de sectores colindantes como la antigua hacienda Terreros, cuya parte alta (sector Tibanicá) se extendía hasta el área actual del parque, información crítica para establecer su perfil botánico potencial. El segundo período se extiende entre 2001-2021, integrando el conjunto principal de muestreos y observaciones florísticas contemporáneas.

Los datos de colecciones provienen principalmente de ejemplares depositados en los herbarios J.J. Triana (HJTT), Nacional Colombiano (COL) y Jardín Botánico de Bogotá (JBB), con algunas observaciones complementarias del herbario de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDBC) y de la Colección de Solanáceas Tuberíferas en Colombia (Wild Potato Collection in Colombia) promovida por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

ii. Flora regional

El conjunto de información recopilada para Cerro Seco evidencia la presencia de 338 taxones de plantas (304 vasculares, 34 no vasculares), incluyendo 270 angiospermas, 35 helechos, 4 licofitas, 12 musgos, 1 hepática y 16 líquenes. 284 taxones han sido determinados hasta la categoría de especie (84 %) y 51 hasta género (15 %). 140 de estos taxones (41 %) se registran por primera vez para la zona en el presente estudio, y 43 de los reportados en literatura (13 %) ya fueron corroborados en las visitas de campo.

El grupo más rico identificado hasta el momento corresponde al de las plantas vasculares. En número de especies, géneros y familias, se destacan las angiospermas (e 230, g 177, f 58) seguidas por helechos y licofitas (e 35, g 31, f 12). En cuanto a las plantas no vasculares, los líquenes presentan especial importancia (e 10, g 13, f 8), seguidos por las briofitas (e 9, g 11, f 7) (Figura 66).

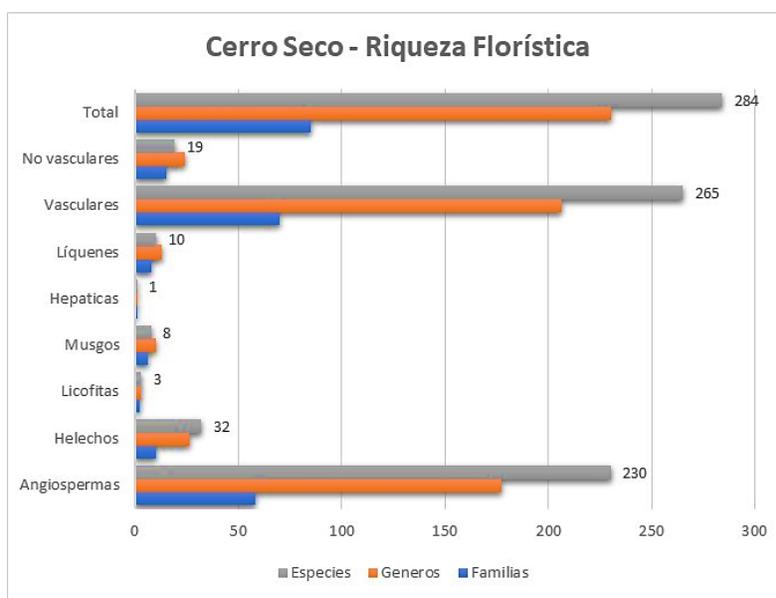


Figura 66. Riqueza de los principales grupos florísticos identificados en Cerro Seco y su área de influencia

Las familias de angiospermas más ricas en especies y géneros son Asteraceae (e 43, g 30) y Orchidaceae (e 20, g 14), seguidas por Solanaceae (e 16, g 6), Poaceae (e 15, g 14) y Fabaceae (e 14,

g 12). En helechos y licofitas se destacan Polypodiaceae (e 8, g 7), Dryopteridaceae (e 7, g 5), Pteridaceae (e 6, g 5) y Lycopodiaceae (e 2, g 2). Los grupos no vasculares más ricos están representados por la familia de líquenes Parmeliaceae (e 4, g 4), y las de musgos, Pottiaceae (e 4, g 4) (Tabla 6).

Tabla 6. Familias botánicas más ricas identificadas en Cerro Seco y su área de influencia

Grupo	Familia	No. Especies	No. Géneros
Angiospermas	Asteraceae	43	30
	Orchidaceae	20	14
	Solanaceae	16	6
	Poaceae	15	14
	Fabaceae	14	12
	Rosaceae	6	6
	Ericaceae	6	5
	Rubiaceae	6	5
	Verbenaceae	6	5
	Piperaceae	6	2
Helechos	Polypodiaceae	8	7
	Dryopteridaceae	7	5
	Pteridaceae	6	5
Licofitas	Lycopodiaceae	2	2
Líquenes	Parmeliaceae	4	4
	Cladoniaceae	2	2
Musgos	Pottiaceae	5	5
	Bryaceae	2	2

En cuanto a los géneros botánicos, en angiospermas se destacan *Epidendrum* (6), *Solanum* (5), *Stelis* (5), *Bidens* (4), *Gaultheria* (4), *Peperomia* (4) y *Salvia* (4). En helechos se destacan *Pleopeltis* (3), *Asplenium* (2), *Blechnum* (2), *Cheilanthes* (2) y *Serpocaulon* (2), y en Musgos, *Bryum* (2) (Tabla 7).

Tabla 7. Géneros botánicos más ricos identificados en Cerro Seco y su área de influencia

Grupo	Género	No. Especies
Angiospermas	<i>Solanum</i>	9
	<i>Baccharis</i>	5
	<i>Epidendrum</i>	4
	<i>Peperomia</i>	4
	<i>Stelis</i>	4
	<i>Bidens</i>	3
	<i>Cestrum</i>	3
	<i>Chromolaena</i>	3
	<i>Conyza</i>	3
	<i>Gaultheria</i>	3
	<i>Hypericum</i>	3
	<i>Lantana</i>	3
	<i>Passiflora</i>	3
	<i>Salvia</i>	3
Helechos	<i>Elaphoglossum</i>	3
	<i>Asplenium</i>	2
	<i>Cheilanthes</i>	2

Grupo	Género	No. Especies
	<i>Pleopeltis</i>	2
	<i>Serpocaulon</i>	2
	<i>Thelypteris</i>	2
Líquenes	<i>Parmotrema</i>	2
Musgos	<i>Bryum</i>	2

Se adelantan actualmente varios esfuerzos dirigidos al estudio de la flora de Cerro Seco, especialmente dirigidas hacia zonas que no han sido visitadas por investigadores. Se espera que el número de sus especies registradas se incremente, permitiendo una aproximación más acertada sobre el número de plantas vulnerables que se refugian en la zona y su distribución en sus diversos ambientes.

Una muestra gráfica de la flora observada en la región puede consultarse en línea en el proyecto colaborativo “Flora subxerofítica del Parque Cerro Seco y su área de influencia (Bogotá-Cundinamarca, Colombia)”, desarrollado en el portal iNaturalist Colombia por el Herbario J.J. Triana y la Corporación Geoambiental TERRAE (<https://colombia.inaturalist.org/projects/flora-subxerofitica-del-parque-cerro-seco-y-su-area-de-influencia-bogota-cundinamarca-colombia?tab=observations>).

iii. Flora vulnerable

87 taxones revisten especial interés en conservación por su condición amenazada y vulnerable, **equivalente al 26% de la flora de Cerro Seco** (figura 67):

- **El 8% de su flora es endémico:** Cerro Seco es el hábitat de al menos **27 especies endémicas de Colombia** (23) o del Altiplano Cundiboyacense (4), incluyendo compuestas (7), rubiáceas (3), orquídeas, apocináceas, ágaves y verbenáceas (2).
- **El 2% de su flora enfrenta amenaza inminente de extinción:** los ágaves de Cundinamarca y de Sylvester, **sus dos ágaves endémicos, se encuentran En Peligro Crítico (CR) y En Peligro (EN)**, respectivamente. Una de sus orquídeas (*Cyrtochilum revolutum* (Lindl.) Dalström) y una labiada (*Salvia rubescens* Kunth) son Vulnerables (VU), mientras que una segunda orquídea (*Epidendrum aura-usecheae* Hágsater, Rinc.-Useche & Ó. Pérez) y una bromelia (*Puya lineata* Mez) se encuentran Casi Amenazadas (NT) (Bernal et al. 2016, Giraldo-Cañas 2020).
- **El 18% de su flora ha sido vedado para su aprovechamiento:** 59 especies se encuentran vedadas por resoluciones expedidas por las autoridades ambientales para el territorio nacional (INDERENA Res. 0213 de 1997), el Distrito Capital (Secretaría Distrital de Ambiente Res. 1333 de 1997) y Cundinamarca (CAR Acu. 022 de 1993). Incluye sus 30 bromelias y orquídeas (11% de las plantas con flores) y sus 29 briofitas y líquenes (100% de las plantas no vasculares).
- **El 9% de su flora está protegido por la Convención CITES:** sus tres cactus y sus 26 orquídeas (11% de las plantas con flores) se encuentran protegidas para su exportación y comercialización internacional por el Apéndice II de la Convención CITES.

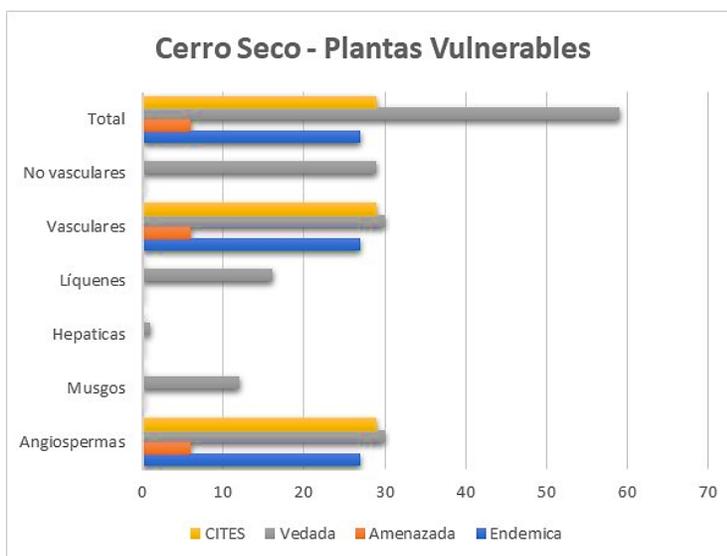


Figura 67. Vulnerabilidad de los principales grupos florísticos identificados en Cerro Seco y su área de influencia

iv. Principales ambientes y coberturas vegetales

Una clasificación general de las inclinaciones del terreno, sumada a las observaciones de los reconocimientos en el campo, nos permitió establecer al menos diez ambientes generales en los cuales se distribuye la vegetación de Cerro Seco (tabla 8). Estos fueron delimitados mediante procedimientos de fotointerpretación con base en imágenes de sensores remotos proporcionadas por el programa Google Earth Pro® ver. 7.3.3.7786 (64-bit), permitiéndonos establecer una zonificación general de las principales coberturas vegetales.

Tabla 8. Principales ambientes donde se desarrolla la vegetación de Cerro Seco

Ambiente_Tipo	Descripción
Cuerpo de agua permanente	Laguna Encantada
Drenajes estrechos de corrientes estacionales	Cañones estrechos sin corriente superficial (sustratos más húmedos)
Cárcavas	Fondos y taludes (algunas son parte de los drenajes)
Planicies y fondos de valles amplios	Prados y pastizales seminaturales a fuertemente intervenidos
Laderas onduladas moderadamente inclinadas	Matorrales enanos-herbazales
Crestones-laderas de inclinación pronunciada	Matorrales y bosques enanos seminaturales
Roquedales y afloramientos	Grandes depósitos de ladera o bloques rocosos dispersos
Ambientes ruderales	Vegetación asociada a caminos
Plantación forestal	Elementos de los demás ambientes representados en el sotobosque
Canteras	Elementos pioneros

v. Relaciones con la subxerofitia del altiplano

El inventario de especies de Cerro Seco y su área de influencia se contrastó frente a más de 2900 registros pertenecientes a listados florísticos publicados para seis regiones de la subxerofitia del

altiplano Cundiboyacense y dos sectores altoandinos geográficamente relacionados (cuena media del río Tunjuelo y Cerros Orientales) (Tabla 9). Su comparación buscó evaluar el grado de relación que presentan estas zonas respecto a la flora del Parque, por ende, a sus ambientes.

Los listados florísticos regionales se aprovecharon igualmente para adelantar una evaluación de la posible presencia de 56 tipos de vegetación previamente descritos en literatura científica y reportes técnicos, característicos de la subxerofitía del altiplano y su transición hacia ambientes propiamente altoandinos.

Tabla 9. Regiones subxerofíticas y altoandinas del altiplano Cundiboyacense consideradas en el análisis de relaciones florísticas

Regiones	Sectores
Cerro Seco	Ciudad Bolívar (Arborizadora Alta, Sierra Morena), Soacha (Panamá, Terreros)
Mosquera-Bojacá	Mosquera, Bojacá, Madrid (Mondoñedo, La Herrera)
Chía-Cajicá-Suba	Chía (Manjuy), Cajicá, Cota, Suba
Nemocón-Suesca-	
Guatavita	Nemocón (Checua), Suesca, Guatavita (Tominé)
Fúquene	Fúquene
Candelaria	Ráquira, Sáchica, Villa de Leyva (desierto La Candelaria)
Tota-Nobsa	Tota, Nobsa
Tunjuelo-Usme	Tunjuelo, Usme
Cerros Orientales	Cerros Orientales

El análisis de agrupamiento (*clustering*) adelantado para el presente estudio muestra una relación estrecha entre la flora de Cerro Seco respecto a sectores subxerofíticos como Nemocón-Suesca y Chía-Cajicá, y mediana respecto a regiones igualmente secas como Tota-Nobsa y Mosquera. En contraste, la flora de la cuena media del río Tunjuelo integra un grupo aparte con la vegetación más húmeda de los Cerros Orientales de Bogotá, mostrando mayor afinidad con grupos propios de entornos leñosos altoandinos (Figura 68).

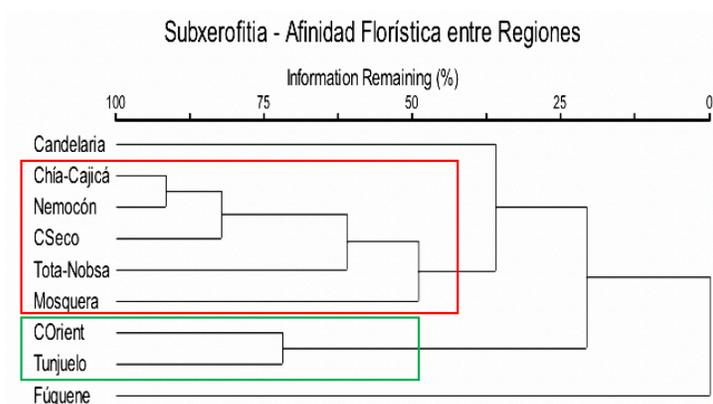


Figura 68. Relaciones florísticas entre Cerro y otras regiones subxerofíticas y altoandinas del altiplano Cundiboyacense

Las comparaciones entre la flora vascular sugieren además **la posible presencia en Cerro Seco de al menos diez tipos de vegetación previamente descritos para ambientes subxerofíticos de otras regiones del altiplano, compartiendo más del 75% de la flora que constituye estas comunidades.** Un segundo conjunto conformado por ocho tipos de vegetación seca comparte entre el 60-70% de sus especies con Cerro Seco, y un tercer conjunto presenta entre el 50-60% de sus elementos

florísticos en el área. Igualmente, al menos cinco tipos de vegetación demuestran ciertas relaciones transicionales respecto a ambientes altoandinos y subparamunos (Tabla 10).

La presencia transversal de algunos elementos leñosos dominantes como *Dodonaea viscosa*, *Chromolaena leivensis*, *Varronia cylindristachya* y *Xylosma spiculifera* determinan el alto grado de relación observada con los tipos de matorrales espinosos y enanos previamente descritos, soportando la afinidad y continuidad florística del área de estudio con la subxerofitia del altiplano. No obstante, dado el alto grado de endemismo que caracteriza estas regiones, se espera que la vegetación de Cerro Seco represente variantes de composición y estructura estrechamente afines complementados con elementos exclusivos, a su vez en ausencia de elementos de distribución restringida de las otras regiones como *Condalia thomasiana*.

El estudio de las gramíneas secas se encuentra aún en desarrollo, por lo que se espera una mayor relación con los tipos de pastizales de otras regiones, los cuales muestran hasta el momento valores intermedios (50-60%). Igualmente, el hallazgo en la laguna Encantada de plantas acuáticas como el trébol de agua (*Marsilea cf. deflexa* A. Braun) establece un vínculo con comunidades de los humedales de la Sabana como los juncales del *Ludwigia peploidis-Schoenoplectetum californici*, descritos por Hernández-Roa & Rangel-Churio (2009) para el área de Jaboque, en el cual se presenta la especie.

Tabla 10. Unidades de vegetación subxerofíticas y altoandinas del altiplano Cundiboyacense con posible presencia en el área de Cerro Seco

Unidad de Vegetación	Fisionomía	Ambiente	# Vasculares	# Compartidas	% Compartidas
<i>Opuntia schumannii</i> y <i>Chromolaena leivensis</i>	Matorral-Cardonal enano-bajo	Subxerofitia	14	13	92
<i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Chromolaena leivensis</i>	Matorral bajo	Subxerofitia	12	11	91
<i>Opuntia schumannii</i> y <i>Dodonaea viscosa</i>	Matorral espinoso	Subxerofitia	10	9	90
<i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Hesperomeles obtusifolia</i>	Matorral bajo	Subxerofitia	19	17	89
<i>Salvia bogotensis</i> y <i>Dodonaea viscosa</i>	Matorral enano	Subxerofitia	7	6	85
<i>Muhlenbergia cenchrroides</i> y <i>Dodonaea viscosa</i>	Pastizal	Subxerofitia	18	15	83
<i>Furcraea cf. hexapetala</i>	Matorral bajo-Rosetal	Subxerofitia	36	30	83
<i>Opuntia schumannii</i>	Matorral espinoso	Subxerofitia	6	5	83
<i>Condalia thomasiana</i> y <i>Dichondra repens</i>	Matorral	Subxerofitia	36	28	77
<i>Eleanthus</i> y <i>Chromolaena leivensis</i>	Matorral bajo-enano	Subxerofitia	13	10	76
<i>Weinmannia tonentosa</i> y <i>Clethra fimbriata</i>	Bosque medio	Altoandino	4	3	75
<i>Peperomia ubate-susanensis-Condalia thomasiana</i>	Bosque bajo-Matorral	Subxerofitia	40	27	67
<i>Plantago sericea</i> , <i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Puya nitida</i>	Matorral enano-Rosetal	Subxerofitia	3	2	66
<i>Poaceae con Artemisia sodiroi</i> y <i>Ophioglossum reticulatum</i>	Prado	Subxerofitia	3	2	66
<i>Noticastro-Eryngietum humboldti</i>	Herbazal	Subxerofitia	29	19	65
<i>Andropogono aequatoriensis-Epidendretum elongatae</i>	Casmófito	Subxerofitia	50	32	64
<i>Escallonia paniculata</i> , <i>Abatia parviflora</i> y <i>Varronia cylindristachya</i>	Bosque bajo	Altoandino	39	25	64
<i>Parodia erinacea</i> y <i>Dodonaea viscosa</i>	Matorral enano ralo	Subxerofitia	11	7	63
<i>Agave</i>	Matorral-Rosetal	Subxerofitia	5	3	60
<i>Xylosma spiculiferae-Condalia thomasiana</i>	Matorral-Bosque bajo	Subxerofitia	93	56	60
<i>Andropogono hirtiflori-Puyetum bicoloris</i>	Pajonal-Rosetal	Subxerofitia	67	40	59
<i>Puyetum bicoloris</i>	Rosetal	Subxerofitia	62	36	58
<i>Varronia cylindristachya</i> , <i>Oreopanax incisus</i> e <i>Ilex kunthiana</i>	Bosque medio	Altoandino	56	33	58
<i>Weinmannia tonentosa</i> y <i>Vallea stipularis</i>	Bosque bajo	Altoandino	21	12	57
<i>Dichondro repens-Cupheetum serpyllifoliae</i>	Pastizal	Subxerofitia	49	27	55
<i>Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae</i>	Matorral bajo	Subxerofitia	69	38	55
<i>Andropogonetum hirtiflori</i>	Pastizal	Subxerofitia	50	27	54
<i>Aristidetum laxae</i>	Pastizal-Pastizal corto	Subxerofitia	32	17	53
<i>Muhlenbergia cenchrroides</i> , <i>Aristida laxa</i> y <i>Jarava ichu</i>	Pastizal-Herbazal	Subxerofitia	19	10	52
<i>Andropogono hirtiflori-Trachypogonetum montufarii</i>	Pastizal-Pastizal corto	Subxerofitia	48	25	52
<i>Bouteloua simplex</i> y <i>Microchloa kunthii</i>	Pastizal	Subxerofitia	2	1	50
<i>Eragrostietum pastoensis</i>	Prado	Subxerofitia	48	24	50
<i>Sporobolietum lasiophylli</i>	Pastizal corto-Cojines vasculares	Subxerofitia	40	20	50
<i>Chaetolepido microphyllae-Espeletopsietum corymbosae</i>	Frailejonal-Matorral enano	Subpáramo	59	30	50

D. DISCUSIÓN

i. Historia ambiental

El Parque Ecológico Cerro Seco y su área de influencia representa un ecosistema altoandino único y atípico que en su pasado reciente ha sido profundamente malinterpretado, careciendo de apropiación por su verdadero valor y manejo de manera inapropiada por parte de la ciudadanía y las autoridades ambientales.

La información paleoecológica e histórica disponible describe cómo durante los últimos 28 a 14 mil años, en Cerro Seco y otros sectores subxerofíticos de la Sabana no se desarrolló un ecosistema altoandino forestal y húmedo, característico de los cerros tutelares capitalinos, sino que se consolidaron como cadenas montañosas y planicies frías de vegetación abierta y seca, similar a como actualmente lo conocemos. Las principales especies representadas en el registro palinológico aún subsisten hoy día en la región (van der Hammen 1992, Rivera et al. 2004) (figura 69).



Figura 69. Aspecto abierto de la vegetación regional de Cerro Seco (Distrito Capital-Cundinamarca). Vista desde el extremo NW de la hacienda Terreros (Soacha). Foto: F.W. Popenoe, hacia 1920 (Barbosa, 2014) (A). Paisaje actual. Foto: J.A. León, 2019 (B).

En las crónicas de la conquista española ya era descrito como un área de terrenos firmes y paisaje abierto, contrastando drásticamente con los humedales y bosques de otros sectores de la sabana de Bogotá (Fernández-Piedrahíta 1881). En fotografías de la década de 1920 tomadas por viajeros en nuestro territorio (p.ej. Frederick Wilson Popenoe, figura 69 arriba) se evidencia que las formaciones vegetales de las partes más altas de las veredas Panamá, Funsungá y cerros adyacentes ya lucían como praderas y arbustales de montaña, aún sin el impacto humano severo que se aceleró a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Para los habitantes de la sabana, acostumbrados al verdor de las laderas húmedas de los cerros Orientales, cubiertas típicamente por vegetación de porte forestal, las planicies y cerros semiáridos del suroccidente del altiplano como Cerro Seco, Mosquera o Mondoñedo tienen el aspecto de una fase terminal irrecuperable tras un largo proceso de degradación por actividades antrópicas. Y aunque la huella de la intervención humana es evidente, esta periferia urbana es el hogar de numerosas especies que evolucionaron durante miles de años para adaptarse específicamente a estas condiciones secas y frías de montaña (van der Hammen 1992).

ii. *Biota, particularidades y amenazas*

A primera vista, la zona posee una cobertura vegetal muy pobre compuesta por forrajes y elementos introducidos como acacias, pasto kikuyo o trébol carretón, esencialmente potreros desaprovechados. Esta situación es un eje común en los documentos técnicos que han sido preparados en años recientes para soportar la toma de decisiones ambientales por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente, en los cuales se hace manifiesto el valor intrínseco del ecosistema de subxerofiticia, pero el componente florístico se reduce a listados de unas cuantas especies (p.ej. Beltrán 2013: 16), impidiendo poner en perspectiva la verdadera magnitud de la vulnerabilidad y el endemismo de su flora. El presente estudio revela un panorama contrastante, con Cerro Seco como el hogar de unos 340 tipos de plantas y líquenes, especialmente compuestas y orquídeas terrestres, refugio de casi 90 especies endémicas y vulnerables. Constituye una diversidad enorme para unos supuestos lotes baldíos.

Sus pastizales y herbazales constituyen a su vez uno de los últimos hábitats conocidos de aves como la alondra cornuda o cachudita (*Eremophila alpestris peregrina* P.L. Sclater, 1855), subespecie endémica de Colombia, considerada una rareza del neotrópico, siendo la única especie de la familia Alaudide en Sudamérica, no obstante, categorizada En Peligro de extinción (EN) (Valencia & Armenteras 2004) según los criterios de la UICN. Por otro lado, Renjifo et al. (2016) estimó que el 97,8% del hábitat de la alondra está transformado e inaccesible para la supervivencia de la especie.

Cerro Seco cuenta con una población base de al menos 38 individuos registrados por la Asociación Bogotana de Ornitología (ABO) (ABO 2019), segunda población conocida más grande después de la población del embalse La Copa en Boyacá (León 2020). A pesar del conocimiento general de la presencia de esta especie, se encuentra desprotegida y en riesgo de extinción por la minería y la degradación general de su hábitat, por lo cual es una prioridad desarrollar e implementar un plan de conservación dirigido a mantener y ampliar su actual área de presencia. En contraste, **ningún**

organismo del Estado ha tenido presente que el Parque también alberga dos especies de ágaves en peligro inminente de extinción.

Buena parte de la riqueza biológica del lugar está integrada por organismos muy poco estudiados que viven en ambientes fuertemente específicos de la subxerofitia como las grietas de las rocas, las fisuras sombreadas de las cárcavas, y las costras biológicas que recubren los sustratos rocosos, donde complejos de especies de briofitas, líquenes, hongos, algas y cianobacterias coexisten con microfauna tan particular como los “osos de agua” (tardígrados), conformando microecosistemas altamente diversos que promueven fenómenos como la meteorización de los lechos minerales, retención de humedad, fijación de nitrógeno y aportes de carbono, agregación de partículas de suelo, estabilización de sustratos y prevención de la erosión, sirviendo de soporte para los bancos de semillas, sus procesos germinativos, y la nutrición de las propias plantas vasculares adaptadas específicamente a estos enclaves únicos (Castillo-Monroy & Maestre 2011).

Estas y muchas otras funciones y servicios ecosistémicos de los ambientes subxerofíticos han sido poco estudiados en el mundo, de forma que se pasan por alto en sus planes de manejo y se terminan aplicando modelos inapropiados de rehabilitación o restauración diseñados para ambientes totalmente divergentes para franjas de vida situadas a elevaciones similares, siendo el caso de fórmulas desarrolladas para el bosque altoandino húmedo predominante en la región.

Desde la perspectiva antropogénica de la naturaleza se ignoran estos microecosistemas, de los cuales depende la vida a la escala humana. Aprender del funcionamiento natural de estas sabanas secas es crítico en un mundo donde la desertificación avanza a pasos agigantados y consume al año cientos de hectáreas productivas. Colombia no es la excepción: reportes gubernamentales indican que para 2017 al menos el 17 % del territorio nacional ya ofrecía muestras de degradación de suelos por erosión, salinización y desertificación, mientras que otro 15 % presentaba susceptibilidad evidente, con cerca del 25 % del territorio de Cundinamarca (vecino al Distrito Capital) bajo desertificación natural y cerca del 17 % con diferentes grados de degradación por intervención humana (Gutiérrez-Rodríguez 2017).

iii. Costos ambientales

La responsabilidad por la extinción o supervivencia de estas especies, del colapso de sus ecosistemas y la pérdida de sus servicios ambientales recae tanto en la ciudadanía como en las autoridades ambientales, estos últimos siendo los llamados a tomar decisiones acertadas y adoptar mecanismos que garanticen la estructura ecológica principal del territorio, así como promover el conocimiento y apropiación de la biodiversidad por parte de los habitantes. Pese a las dificultades implícitas que conlleva la presión de expansión de la periferia urbana, la protección y preservación de Cerro Seco como eje de conservación es de importancia estratégica para la Bogotá-Región en su articulación con Cundinamarca, y debe asumirse como la última oportunidad que las autoridades de planeación tienen para adelantarse en el tiempo a diferentes fenómenos que ya están sucediendo.

Ciudad Bolívar es reconocida por ser una de las localidades santafereñas con concentración poblacional intermedia acompañada por una alta complejidad socioeconómica, marcada vulnerabilidad ante riesgos naturales derivada de la concentración de áreas de riesgo no mitigable por establecimiento de rellenos sanitarios y canteras de extracción de minerales (Torres-Vallejo et

al. 2019). Promover la concentración de población mediante nuevos proyectos inmobiliarios reducirá drásticamente la proporción de espacio público efectivo por habitante.

Los últimos años hemos experimentado en Bogotá y otras capitales del país un creciente número de alarmas por contaminación atmosférica, paralizando temporalmente las actividades productivas, pero acarreando a largo plazo un aumento en la incidencia de desórdenes respiratorios, cánceres y otros tipos de enfermedades en la población infantil y adulta, diezmando la calidad de vida y la productividad económica. Sumado al impacto de la mala calidad del agua, estimaciones institucionales señalan que la contaminación urbana le cuesta anualmente al país cerca de \$12 billones de pesos y más de 17 mil vidas (Bohórquez-Guevara 2019). En la región se ve especialmente agravado por efecto del tránsito frenético intermunicipal que transcurre a diario por la autopista Sur, la incesante polución y liberación de lixiviados por la actividad de las canteras, la contaminación de los cuerpos de agua circundantes, y la proximidad del Relleno Sanitario Doña Juana, entre otros.

Estudios en varios países ya han comprobado la relación directa que existe entre la escasez de áreas naturales y la pérdida de biodiversidad respecto al incremento en el impacto de brotes de nuevas enfermedades virales de origen zoonótico sobre las poblaciones humanas (Ostfeld 2009), de las cuales la actual pandemia es una entre varias que se espera experimentaremos como sociedad en el corto y mediano plazo, dejando a su vez pérdidas económicas demoledoras: Naciones Unidas estima costos globales de cerca de \$100 mil millones de dólares en las dos décadas pasadas por enfermedades zoonóticas emergentes, y de hasta \$9 billones de dólares en los dos años que puede durar la presente crisis de SARS-CoV-2/COVID-19 (Randolph et al. 2020).

La problemática ambiental de Ciudad Bolívar está enmarcada en un contexto más amplio y preocupante como la Emergencia Climática en la que se declara Bogotá, bajo estudio desde 2020 con la creación del Panel Distrital de Cambio Climático (Acuerdo 256 de 2020), siendo la primera capital de Latinoamérica que asume enfrentar la realidad de esta contingencia (Concejo de Bogotá 2020). En atención a los mandatos 1, 2 y 8 específicamente, donde se reconoce “la necesidad de dirigir el Ordenamiento Territorial alrededor del agua y los socioecosistemas; protección de la Estructura Ecológica principal (EPP) y la biodiversidad, restaurando la EPP con fuentes de financiación y responsables claramente definidos y como proceso permanente de corto, mediano y largo plazo, para la recuperación de servicios ecosistémicos, áreas protegidas del Distrito Capital, fortalecimiento de las ventajas territoriales frente al cambio climático; y la educación y la participación para una ética ambiental”; Cerro Seco y su área de influencia se posiciona como un socioecosistema estratégico frente al cambio climático y la crisis ambiental reconocida por el país.

No es responsable promover una explosión demográfica mediante la construcción de extensos complejos habitacionales en una de las áreas más densamente urbanizadas, con mayor proporción poblacional y menor espacio público efectivo por habitante del área metropolitana, sin garantizar para la población existente y futura un soporte ecosistémico, persiguiendo unos objetivos económicos inmediatos a costa de la destrucción de la biodiversidad remanente sin detenerse a cuantificar el enorme costo económico, de salud pública y ambiental que esto acarrea. Ampliar las actividades extractivistas implican además profundizar en un pasivo ambiental que en la zona se remonta a la colonia española, sin que ninguna organización pública haya asumido a la fecha su cuantificación real junto con los costos y actividades necesarios para lograr una mitigación

ambiental efectiva. La cuantificación de sus impactos acumulativos sobre la pérdida de biodiversidad, su huella hídrica, su afectación sobre la recarga de acuíferos, la contaminación por residuos químicos y emisiones atmosféricas de material particulado, y en general de sus efectos sobre la salud pública y los geoecosistemas en la zona es realmente precaria a inexistente, tal como se repite en numerosos proyectos de explotación minera a lo largo y ancho del país (Cabrera-Leal & Fierro-Morales, 2013).

Para enfrentar este desafío, no es posible adoptar medidas paliativas como la estructuración de Cerro Seco como un parque metropolitano aislado e inmerso entre construcciones, los cuales desempeñan funciones recreativas y de esparcimiento mientras ven limitado su impacto ecosistémico regional a su mínima expresión.

E. OPORTUNIDADES

Cerro Seco cumple un papel que ninguna autoridad ha considerado hasta el momento: forma parte del área altoandina de amortiguación de los páramos de Soacha y Sibaté, los cuales integran el complejo Cruz Verde-Sumapaz y se elevan inmediatamente al sur, ofreciendo una transición ecosistémica única entre los enclaves secos del altiplano y las laderas húmedas paramunas. La preservación de estas zonas es básicamente una obligación de ley: no tiene ninguna presentación ante la sociedad extender otras canteras o establecer nuevos asentamientos urbanos densamente poblados a sólo 4,3 km del páramo que surte de agua a la franja intermunicipal Ciudad Bolívar-Soacha, donde habitan más de 1,2 millones de personas. La estructuración de un corredor ideal básico ya cuenta con una primera aproximación: al revisar la actual delimitación de páramos (Sarmiento-Pinzón et al. 2013) y el mapa de ecosistemas terrestres de Colombia (IDEAM et al. 2017), en menos de cerca de 6 km se observa una sucesión natural de ambientes entre Cerro Seco y la subxerofitia andina, los arbustales y herbazales andinos húmedos, y el páramo de Pasquilla-Sumapaz (Mochuelo-Quiba-Hungría), involucrando un área protegida como la Reserva Forestal Protectora Productora Cuenca Alta del Río Bogotá.

Es indispensable aprovechar esta coyuntura para convertir la zona en el eje principal de un corredor que integre las cintas de ecosistemas secos que todavía subsisten y descienden sobre las laderas de los valles de los ríos Tunjuelo y Soacha (al oriente y occidente, respectivamente), confluyendo en el área de Cerro Seco y el humedal de Terreros. Esto brindaría una oportunidad para que las especies allí asentadas tengan el área mínima fundamental para que sus poblaciones naturales sean viables, así como para movilizarse y lograr una conectividad con otras poblaciones establecidas en otros puntos del altiplano.

Desde el punto de vista de los habitantes, la preservación y recuperación de este corredor en asocio con Cundinamarca, y en concordancia con los mandatos 3 y 6 de la Emergencia Climática declarada en Bogotá, permitiría estructurar un escudo estratégico que garantice la generación y permanencia de los servicios ecosistémicos determinantes para la sostenibilidad de la enorme población concentrada en los límites municipales, convirtiéndolo en un enorme filtro natural para mitigar el impacto de Doña Juana y los demás tensionantes previamente identificados, mejorando significativamente la calidad de vida de los habitantes. Las franjas aledañas más altas y húmedas de la transición con el páramo hacia el sur sirven a la población como zonas de producción agrícola

hace décadas, siendo vital apoyar su reconversión productiva hacia métodos agrícolas no invasivos con el páramo, y articularlos a las cadenas comerciales, pues su papel para la generación de alimentos limpios y de calidad es crucial para garantizar el aprovisionamiento que requiere una población en franco aumento.

F. RECOMENDACIONES

De acuerdo con su importancia estratégica, hacemos un llamado para que la Administración Distrital adopte una política conjunta articulada con Cundinamarca para abordar el manejo adecuado de los ecosistemas subxerofíticos del altiplano, establecer redes de áreas protegidas y corredores, y garantizar los recursos técnicos, humanos y económicos para promover la investigación y asegurar su preservación integral y la supervivencia de su biota única en el mundo.

Es crítica su articulación con otros ejes de la estructura ecológica principal metropolitana, integrando los relictos de subxerofitia y ecosistemas húmedos andinos de la cuenca del río Tunjuelo junto con los de la franja subxerofítica de Soacha y los páramos de Pasquilla-Sumapaz, requiriendo la preservación de la mayor extensión posible: proponemos en principio una declaratoria de protección de 360 ha en el área del Distrito Capital, la cual debería extenderse como un corredor integral abarcando zonas del municipio de Soacha, mas no reducirse.

Desde la sociedad civil y la academia estaremos gustosos de poder colaborar en la construcción de la línea base ambiental y de los lineamientos para el establecimiento de estrategias de restauración acordes con la naturaleza subxerofítica de Cerro Seco y su área de influencia, apoyándose en patrones de ensamblajes vegetales que han sido caracterizados para ambientes complementarios del altiplano Cundiboyacense.

Bibliografía

- ABO – Asociación Bogotana de Ornitología. 2019. Comunicación - Mecanismo conservación especie En Peligro de Extinción, Cerro Seco, Ciudad Bolívar Bogotá D.C.
- Angel Amaya, J., Fierro Morales, J., Ordoñez Potes, M. & Blanco, M. (2012). NW transverse fault system in Southern Bogotá, Colombia: New seismologic and structural evidences derived from focal mechanisms and stress field determination. AGU Fall Meeting Abstracts
- Antonio, F. & Obregón, N. (2011) Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). Geochemistry, groundwater and pollution. CRC press.
- Ariza-Cortés, W., J.E. Carvajal-Cogollo & A. Hernández-Ortiz. 2010. Soacha biodiversa. Caracterización de flora y fauna en el municipio de Soacha-Cundinamarca. Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Alcaldía Municipal de Soacha: 178 pp. Soacha.
- Avellaneda-Cadena, C. & J. Betancur. 2007. Las plantas vasculares de los afloramientos rocosos de Suesca, cordillera Oriental colombiana. Actualidades Biológicas 29(86): 25-39.
- Beltrán, E.L. 2013. Evaluación de la viabilidad para la declaratoria de un área protegida en el sector de Arborizadora Alta – Ciudad Bolívar. Bogotá D.C. Documento técnico de soporte. Subdirección de Ecosistemas y Ruralidad, Secretaría Distrital de Ambiente: pp. Bogotá.
- Bernal, Germán; Rosero, María; Cadena, Martha y Montealegre, Jorge. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo - Bogotá : 2007.
- Bernal, R., S.R. Gradstein & M. Celis. 2016. Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Volumen I-II. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia: 3060 pp. Bogotá.
- Bohórquez-Guevara, K.S. 2019. La contaminación en las ciudades cuesta cerca de \$12 billones anuales a la Nación. Editorial La República, Sección Ambiente, 9 de marzo de 2019.
- Cabrera-Leal, M. & J. Fierro-Morales. 2013. Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia. Pp. 89-122. Minería en Colombia Libro 1: Derechos, políticas públicas y gobernanza. Contraloría General de la República. Bogotá.
- Calvachi-Zambrano, B. 2012. Los ecosistemas semisecos del altiplano Cundiboyacense, bioma azonal singular de Colombia, en gran riesgo de desaparición. Mutis 2(2): 26-59. DOI: 10.21789/22561498.364
- Cantillo-Higuera, E.E. & M. Gracia-Cuellar. 2013. Diversidad y caracterización florística de la vegetación natural en tres sitios de los Cerros Orientales de Bogotá D.C. Colombia Forestal 16(2): 228-256.
- Casallas, W. (2008). Caracterización de la deformación frágil en la parte norte del flanco occidental del Sinclinal de Usme. Localidad de Ciudad Bolívar. Trabajo de grado Geología. Universidad Nacional de Colombia.

- Castillo-Monroy, A.P. & F.T. Maestre. (2011). La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural* 84(1): 1-21.
- Charlton, R. 2008: *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London
- Concejo de Bogotá. (2020). Proyecto de Acuerdo 256 de 2020 (noviembre 27). Por el cual se declara la emergencia climática en Bogotá D.C., se reconoce esta emergencia como un asunto prioritario de gestión pública, se definen lineamientos para la adaptación, mitigación y resiliencia frente al cambio climático y se dictan otras disposiciones. Concejo de Bogotá D.C.
- Corporación Misión Siglo XXI. 1996. Perfil ambiental de Santafé de Bogotá (1a ed.). Bogotá, DAMA, Fonade-DNP y Granahorrar. Perfil ambiental de Santafé de Bogotá (1a ed.). Bogotá.
- Cortés-Sánchez, S.P. 2003. Estructura de la vegetación arbórea y arbustiva en el costado oriental de la serranía de Chía (Cundinamarca, Colombia). *Caldasia* 25(1): 119-137.
- Cortés-Sánchez, S.P. Vegetación Potencial en la Cuenca media del Río Tunjuelo y Procesos de Cambio en la Cobertura Vegetal, otro Enfoque Metodológico para un Análisis Temporal, Jardín Botánico José Celestino Mutis. 2008
- Cortés-Sánchez, S.P. 2008a. Caracterización fisionómica, estructural y florística de algunas comunidades vegetales en la cuenca media del río Tunjuelo. *Pérez-Arbelaezia* 19: 85-114.
- Cortés-Sánchez, S.P. 2008b. La vegetación boscosa y arbustiva de la cuenca alta del río Bogotá. En: T. van der-Hammen, J.O. Rangel-Churio & A.M. Cleef (eds.). *La cordillera Oriental colombiana, transecto Sumapaz*. *Estudios de Ecosistemas Tropandinos* 7: 915-960. J. Cramer. Berlín-Stuttgart.
- Cortés-Sánchez, S.P. 2011. Estructura y diversidad florística de los bosques y matorrales conformados por la especie endémica *Condalia thomasiana* Fdez-A en el enclave seco del valle del río Checua (Nemocón-Cundinamarca-Colombia). *Pérez-Arbelaezia* 20: 15-36.
- Cortés-Sánchez, S.P., T. van der Hammen & J.O. Rangel-Churio. 1999. Comunidades vegetales y patrones de degradación y sucesión en la vegetación de los cerros Occidentales de Chía-Cundinamarca-Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 23(89): 529-554.
- Cortés-Sánchez, S.P., T. van der Hammen & J.O. Rangel-Churio. 2000. Matorrales y bosques de los cerros Occidentales de Chía, sabana de Bogotá, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 24(91): 201-204.
- Del Toro-Guerrero, F. J., Kretschmar, T., & Hinojosa-Corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 69-81.
- Dixon J.B. & Weed S.B. (Ed), 1989. *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Book Series No. 1, 1244 p.

Faivre P., (1988). Lessivage et planosolisation dans les sequences de sols caracteristiques des milieux intrandins de Colombie (Amerique du sud). These Docteur es Sciences, Universite de Nancy I, 563p

Faivre P. & Gaviria S., (1992). Suelos y formaciones volcánicas endurecidas en los Andes de Colombia. Terra, 10, número especial: Suelos volcánicos endurecidos, México, 196-206.

Fernández-Alonso, J.L. 1997. Nueva especie de *Condalia* Cav. (Rhamnaceae) y notas sobre los géneros de la familia en la flora de Colombia. *Caldasia* 19(1-2): 101-108.

Fernández-Piedrahíta, L. 1881. Historia general de las conquistas del Nuevo Reino de Granada a la S.C.R.M. de D. Carlos Segundo rey de las Españas y de las Indias. Edición hecha sobre la de Amberes de 1688. Imprenta de Medardo Rivas: 412 pp. Bogotá.

Fetter, C. W. (2001). Applied hydrogeology. Waveland Press.

Fierro-Morales, J. & Ángel-Amaya, J. (2008). Tectónica activa y sismicidad en la Sabana de Bogotá, Colombia- Suramerica. Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima, Perú.

Fierro-Morales, J. & Bernal, J. (2008). Analisis morfotectonico de la sabana de Bogotá a partir de sensores remotos. Memorias XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima, Perú.

Fierro Morales, J. – SDA (2008) Geología de la zona denominada parque minero industrial Mochuelo (Localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.). Contrato 525 de 2008. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente.

Giraldo-Cañas, D. 2020. Una especie nueva de *Agave* (Asparagaceae: Agavoideae) de Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91 (2020): e913274. DOI: 10.22201/ib.20078706e.2020.91.3274

González-Martínez, R. & R. López-Camacho. 2012. Catálogo de las plantas vasculares de Ráquira (Boyacá), flora andina en un enclave seco de Colombia. *Colombia Forestal* 15(1): 55-103.

Groenendijk, J.P., J.F. Duivenvoorden, N. Rietman & A.M. Cleef. 2005. Successional position of dry Andean dwarf forest species as a basis for restoration trials. *Plant Ecology* 181(2): 243-253.

Guío Blanco C. M., Brito Gomez V., Crespo P., Ließ M. (2018): Spatial prediction of soil water retention in a Páramo landscape: Methodological insight into machine learning using random forest. *Geoderma* 316.

Gutiérrez-Rodríguez, O.A. (2017). Diagnóstico de la tendencia a degradación de suelos por desertificación en la jurisdicción CAR. Informe técnico. Dirección de Monitoreo de Modelamiento y Laboratorio Ambiental, Grupo de Biodiversidad, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca: 143 pp. Bogotá.

Helmens, K., & Van Der Hammen, T., (1995). Memoria explicativa para los mapas del Neógeno — Cuaternario de la Sabana de Bogotá- Cuenca alta del río Bogotá (Cordillera Oriental, Colombia): *Análisis Geográficos*, No. 24, 91-142.

Hernández-Roa, J. & J.O. Rangel-Churio. 2009. La vegetación del humedal de Jaboque (Bogotá, D.C.). *Caldasia* 31(2): 355-379.

HIDROGEOCOL – DAMA (2000) Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santafé de Bogotá. Informe interno Departamento Administrativo del Medio Ambiente.

Hooghiemstra, H. 1984. Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Colombia: a continuous record of the last 3.5 million years. *Dissertationes Botanicae* 79 (El Cuaternario de Colombia 10): 368 pp. J. Cramer. Vaduz. Liechtenstein.

IDEAM-MAVDT (2010). Contrato interadministrativo No. 172 de 2009 (Numeración IDEAM). Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IAvH – Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IGAC – Instituto Geográfico Agustín Codazzi, INVEMAR – Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” & MADS – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (MEC), versión 2.1, escala 1:100.000 actualización 2017.

IDEAM Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2020) http://sirh.ideam.gov.co/Sirh/faces/oferta/detalle_estacion.jsp. Sistema de Información del Recurso Hídrico – Datos estaciones pluviográficas Quiba (2120205), Casablanca (2120197) 1990-2010

IDEAM, Atlas Climático Nacional. Vol. 2. 2018.

INGEOMINAS (2002). Modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá.

Jenny, H., (1994). Factors of soil formation. In: Dover Edit. (Ed.), *A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications, Inc, New York.

JICA-EAAB. (2003). Estudio del desarrollo sostenible del agua subterránea en la sabana de Bogotá en la República de Colombia.

Jimenez-Martínez, J., L. Longuevergne, T. Le Borgne, P. Davy, A. Russian & O. Bour. Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fractured aquifers: Insights from a frequency domain analysis. *Water Resources Research*, Vol. 49, 3007–3023, doi:10.1002/wrcr.20260, 2013.

León, J.A. (2020). Historia natural de la alondra cornuda – de Rusia a la Cordillera Oriental de Colombia – En peligro crítico en el semidesierto andino de Cerro Seco, Bogotá (Distrito Capital). *El Clarinero* 72: 5-8.

Marini, M., & Piccolo, M. (2000). El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Papeles de Geografía, Murcia, España*, (31), 39-53.

Márquez, G. 2004. Los ecosistemas de Colombia. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia

McGinnis, Ferrill, Smart, Morris, Higuera-Diaz, & Prawica, Pitfalls of using entrenched fracture relationships: Fractures in bedded carbonates of the Hidden Valley Fault Zone, Canyon Lake Gorge, Comal County, Texas. AAPG Bulletin, v. 99, no. 12 (December 2015), pp. 2221–2245

Mesa, O. J., G. Poveda, & L. F. Carvajal, 1997 Introducción al clima de Colombia, Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 390 pp.

Ordoñez, M. C. (2014). Influencia de las fallas transversales en el comportamiento de ondas sísmicas en el sur de la Sabana de Bogotá. (Universidad Nacional de Colombia).

Ostfeld, R.S. (2009). Biodiversity loss and the rise of zoonotic pathogens. *Clinical Microbiology and Infection* 15(1): 40-43. DOI: 10.1111/j.1469-0691.2008.02691.x

Padilla, J., & Calderón, Y. (2004). Cartografía geológica aplicada a la zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá.

Panizza, M., Castaldini, D., Bollettinari, G., Carton, A., & Mantovani, F. (1987). Neotectonic research in applied geomorphological studies.

Pinto Zárate, J. H., León, J. A., Cortés Pardo, M. D. & Ojeda Rodríguez, A. E. (2020). Consideraciones ambientales y de conservación del enclave subxerofítico de Cerro Seco (Distrito Capital, Colombia). 18

Pinzón, M. & E. Linares. 2001. Catálogo comentado de los líquenes y briófitos de la región subxerofítica de La Herrera (Mosquera, Cundinamarca). *Caldasia* 23(1): 237-246.

Pinzón, M. & E. Linares. 2006. Diversidad de líquenes y briófitos en la región subxerofítica de La Herrera, Mosquera (Cundinamarca, Colombia). I. Riqueza y estructura. *Caldasia* 28(2): 243-257.

Pontificia Universidad Javeriana & Secretaría Distrital de Ambiente (PUJ-SDA), (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del distrito capital.

Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28 (197): 201 – 222.

Quintero Chavarría, E. (2015). Potencial espontáneo asociado a la propagación de fluidos en medios porosos: modelamiento e inversión. Tesis de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Randolph, D.G., J. Refisch, S. MacMillan, C.Y. Wright, B. Bett, D. Robinson, B. Wernecke, H.S. Lee, W.B. Karesh, C. Machalaba, A. Fraenkel, M. Barbieri & M. Kappelle. (2020). Preventing the next pandemic: zoonotic diseases and how to break the chain of transmission. UNEP's Frontiers Report. United Nations Environment Programme & International Livestock Research Institute: 72 pp. Nairobi.

Rangel-Churio, J.O. & J. Aguirre-Ceballos. 1986. Estudios ecológicos en la cordillera Oriental colombiana III. – La vegetación de la cuenca del lago de Tota (Boyacá). *Caldasia* 15(71-75): 263-311.

- Renjifo, L.M., A.M. Amaya-Villarreal, J. Burbano-Girón & J. Velásquez-Tibatá 2016. Libro Rojo de aves de Colombia. Volumen II. Ecosistemas abiertos, secos, insulares, acuáticos continentales, marinos, tierras altas del Darién y Sierra Nevada de Santa Marta y bosques húmedos del centro, norte y oriente del país.
- Rivera-Ospina, D., J.O. Rangel-Churio & I. Soriano. 2004. Pastizales xerófilos del municipio de Ubaque y norte del altiplano de Bogotá. Pp. 156-191. En: J.O. Rangel-Churio, J. Aguirre-Ceballos, M.G. Andrade-Correa & D. Giraldo-Cañas (eds.). Memorias Octavo Congreso Latinoamericano y Segundo Colombiano de Botánica. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Asociación Latinoamericana de Botánica y Asociación Colombiana de Botánica. Bogotá.
- Rodríguez, C. (1986) Evaluación cuantitativa del acuífero de la sabana de Bogotá. Corporación autónoma regional de Cundinamarca CAR.
- Sarmiento-Pinzón, C.E., C.E. Cadena-Vargas, M.V. Sarmiento-Giraldo & J.A. Zapata-Jiménez. (2013). Aportes a la conservación estratégica de los páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: 88 pp. Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano. (2002). Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. http://srvags.sgc.gov.co/Jsviewer/Modelo_Hidrogeologico_Conceptual_Sabana_BOGOTÁ/
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer Science & Business Media.
- Tapia Muñoz, G. (2006). Estudios detallados de Geología y Geomorfología para Análisis de Riesgos. Colegio Margaritas, sector de Bella Flor (Ciudad Bolívar). Informe interno SDE Bogotá.
- Thorez J., 1976. Practical identification of clay minerals. A handbook for teachers and students in clay mineralogy, Liège State University, 90 p.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38: 55-94.
- Torres-Merchán, N.Y. & Y.C. Sarmiento. 2009. Estudio de plantas vasculares en terrenos aledaños a los yacimientos de caliza en Nobsa, Boyacá. Colombia. Luna Azul 29: 37-53.
- Torres-Vallejo, J.A., N.D. Preciado-Sánchez, C.E. Quiñones-Ladino, C.A. Torres-Casallas, C. González-Guatibonza, S.Y. González, J.E. Córdoba-Currea, M.F. Sanín-Abisambra, S.I. Echeverry-Watcher, L.F. Mejía-Garzón, L.M. Ruiz-Caicedo & N.M. Ardila-Bernal. (2019). Política de gestión integral del sector hábitat para Bogotá D.C. Documento técnico de soporte. Secretaría Distrital del Hábitat, Alcaldía Mayor de Bogotá: 409 pp. Bogotá.
- UNESCO. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Francia.
- Universidad Javeriana – SDA (2018). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del Distrito Capital. Convenio de asociación No SDA-CV 20161264. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente

- Valencia, I.D. & D. Armenteras. 2004. Modelo de hábitat y distribución de la alondra (*Eremophila alpestris peregrina*) en el altiplano cundiboyacense, Colombia. *Ornitología Colombiana* 2: 25-36.
- Van der Hammen, T. 1992. Historia, ecología y vegetación. Fondo FEN Colombia: 411 pp. Bogotá.
- Van der Hammen, T. 1997. El bosque de Condalia. *Caldasia* 19(1-2): 355-359.
- Van der Hammen, T. (2003). La estratigrafía e historia del Neógeno y Cuaternario de la cuenca alta del Río Bogotá: Una evaluación después de completar el mapeo. *Neógeno y Cuaternario Del Altiplano de Bogotá y Alrededores*, 26, 101–120.
- Van der Hammen, T. 2008. Aspectos ambientales y paleoambientales de los enclaves secos y el caso particular del valle del Checua (Nemocón, Colombia). *Pérez-Arbelaezia* 19: 35-47.
- Van der Hammen, T. & E. González. 1965. A pollen diagram from “laguna de La Herrera” (sabana de Bogotá). *Leidse Geologische Mededelingen* 32: 183-191.
- Van der Hammen, T. & A.M. Cleef. 1983. Datos para la historia de la flora Andina. *Revista Chilena de Historia Natural* 56: 97-107.
- Van Geel, B. & T. van der Hammen. 1973. Upper Quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene area (Eastern Cordillera, Colombia). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 14(1):9-92.
- Velandia Patiño, F. A. & De Bermoudes, (2002). O. Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Boletín Geol.* 24, 37–48.
- Velosa Franco, J. – SDA (2013). Sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital. OPS 723 de 2012. Informe interno Secretaría Distrital de Ambiente.
- Wijninga, V.M., J.O. Rangel-Churio & A.M. Cleef. 1989. Botanical ecology and conservation of the laguna de La Herrera (Sabana de Bogotá, Colombia). *Caldasia* 16(76): 23-40.