

*Zonas morfoclimáticas y su aporte a la delimitación del clima:
El caso de la frontera agrícola y el páramo de Güicán en
Boyacá, Colombia*

*Morphoclimatic zones and their contribution to the
delimitation of the climate: The case of the agricultural
border and the páramo de Güicán in Boyacá, Colombia*

*Zonas morfoclimáticas e sua contribuição para a
delimitação do clima: O caso da fronteira agrícola e do
páramo de Güicán em Boyacá, Colômbia*

Carlos Enrique Castro Méndez
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
cecastro@igac.gov.co

Yolima Del Carmen Agualimpia Dualiby
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
yagualimpiadualiby@gmail.com

Resumen

Se consideró necesario revisar los planteamientos metodológicos y conceptuales utilizados desde hace más de cuatro décadas y que inciden en la cartografía del clima ambiental la cual es clave en la delimitación de los suelos a escala semidetallada. Se aplicó un procedimiento que mejora los límites de las unidades climáticas empleadas en los levantamientos de suelos siguiendo el principio de zonificación climática basado en la condición de humedad según Holdridge. Esta representación del clima ambiental se diseñó a escala semidetallada y mediante procesos geomáticos con la aplicación de un método cuantitativo basado en la normal climatológica 1980 – 2010. Dentro de este contexto, el objetivo de esta investigación fue aplicar esos conocimientos para proponer ajustes en la frontera agrícola para 69 municipios colombianos y mostrar su utilidad en la implementación de los servicios ecosistémicos y las políticas públicas. La consistencia temática debe iniciar en el conocimiento adquirido durante la elaboración de la cartografía de los suelos y en el mejoramiento de los procedimientos cuando esa representación es más próxima al terreno.

Palabras Clave: Zonas Morfoclimáticas, Frontera Agrícola, Levantamiento de Suelos, Representación Cartográfica.

Resumo

Considerou-se necessário rever as abordagens metodológicas e conceituais utilizadas há mais de quatro décadas e que influenciam o mapeamento do clima ambiental, fundamental na delimitação de solos em escala semi-detalhada. Foi aplicado um procedimento que melhora os limites das unidades climáticas utilizadas nos levantamentos de solo, seguindo o princípio do zoneamento climático baseado na condição de umidade de acordo com Holdridge. Esta representação do clima ambiental foi desenhada em escala semidetalhada e por meio de processos geomáticos com a aplicação de um método quantitativo baseado na normal climatológica 1980 - 2010. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi aplicar este conhecimento para propor ajustes de fronteira agrícolas para 69 municípios colombianos e mostram sua utilidade na implementação de serviços ecossistêmicos e políticas públicas. A consistência temática deve partir dos conhecimentos adquiridos durante a elaboração da cartografia do solo e no aprimoramento dos procedimentos quando esta representação estiver mais próxima do terreno.

Palavras-Chave: Zonas Morfoclimáticas, Fronteira Agrícola, Levantamento de Solos, Representação Cartográfica.

Abstract

It was considered necessary to review the methodological and conceptual approaches used for more than four decades and that affect the mapping of the environmental climate, which is key in the delimitation of soils on a semi-detailed scale. A procedure was applied that improves the limits of the climatic units used in the soil surveys following the principle of climatic zoning based on the humidity condition according to Holdridge. This representation of the environmental climate was designed on a semi-detailed scale and through geomatic processes with the application of a quantitative method based on the climatological normal 1980 - 2010. Within this context, the objective of this research was to apply this knowledge to propose border adjustments agriculture for 69 Colombian municipalities and show its usefulness in the implementation of ecosystem services and public policies. Thematic consistency should begin with the knowledge acquired during the elaboration of the soil cartography and in the improvement of the procedures when that representation is closer to the terrain.

Keywords: Morphoclimatic Zones, Agricultural Frontier, Soil Survey, Cartographic Representation.

Introducción

La segunda fase de la zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos se orientó a verificar la consistencia que hay en la delimitación de la frontera agrícola en lugares próximos al páramo de Güicán en Boyacá, Colombia, tomando como referencia el análisis morfoclimático realizado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, a través del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC), por AGUALIMPIA Y CASTRO (2016).

En la fase inicial se pretendía mejorar la representación del clima ambiental del suelo mediante la definición de zonas morfoclimáticas colombianas que permitieran delimitar de manera técnica y científica los pisos térmicos con la utilización de un método cuantitativo que involucraban los gradientes de temperatura del aire y del suelo

en algunos casos especiales con la aplicación de técnicas cualitativas cuando la manifestación de los déficit de humedad en las tierras se reflejaba en cambios estructurales de las coberturas vegetales, es decir, cuando abundaban especies vegetales representativas de enclaves secos, diferentes al clima que se obtiene con información de las estaciones meteorológicas.

En la figura 1 se presenta la distribución de zonas morfoclimáticas de Colombia en la que se resumen estudios parciales de varios investigadores que indicaban variaciones regionales de la temperatura del aire cuando se asciende por vertientes o se camina por unidades fisiográficas que presentan diferentes gradientes de temperatura en el ambiente.

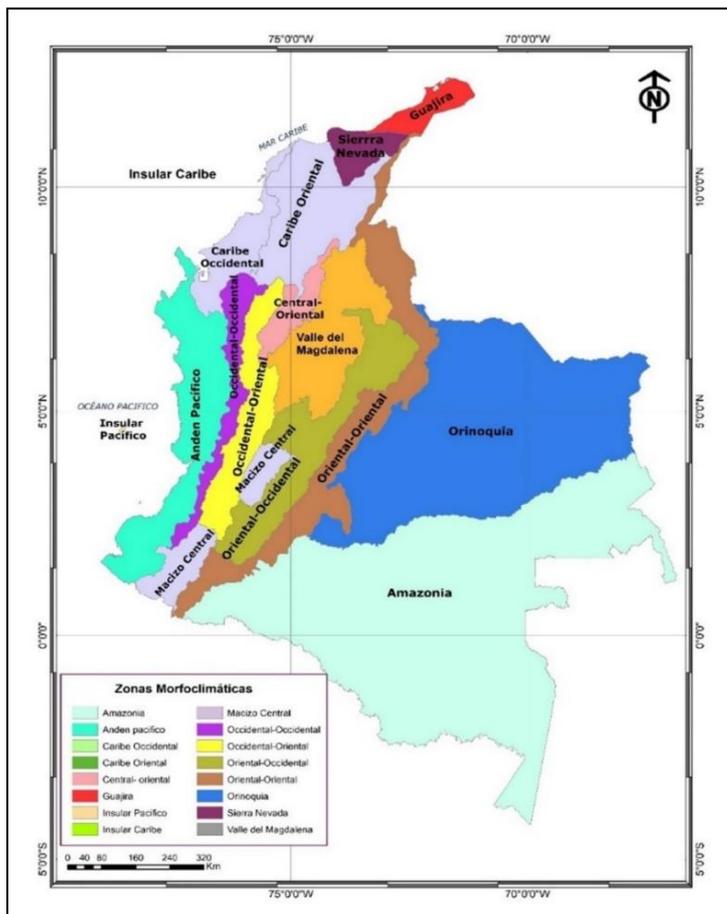


Figura 1. Zonas morfoclimáticas de Colombia
Fuente: AGUALIMPIA y CASTRO (2018).

Dado que los esquemas que se aplican en los levantamientos de suelos involucran un gradiente único de temperatura a la escala general, era necesario identificar zonas que, por sus características de exposición a vientos y luz solar, presentan diferencias regionales.

Colombia sitúa a la región amazónica en la línea ecuatorial que, de acuerdo con el fenómeno de variabilidad climática por el que pasa la humanidad, afectaría el desplazamiento de los pisos térmicos que acorde con las nuevas visiones de estudios semidetallados y detallados de suelos pueden generar el desplazamiento de la temperatura óptima para la producción de cultivos específicos.

Los fines prácticos de la zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos, puede revisarse con generación de la frontera agrícola recientemente delimitada para Colombia (MADR - UPRA, 2018).

Para el caso de la delimitación de los pisos térmicos acorde con la metodología implementada para los levantamientos de suelos por AGUALIMPIA y CASTRO (2016), se demostró que es una variable espacial que permite ser visualizada y es muy útil en el análisis de vertientes de montaña que muestran variaciones altitudinales, por lo que el análisis fisiográfico o combinación de relieve y clima puede generar información importante para determinar la aptitud agrícola para las tierras que se encuentran en ese análisis.

En el sistema natural y de acuerdo con IDEAM et al, (2010), este gradiente térmico permite definir los límites de los biomas como parte de los ecosistemas y que CASTRO y AGUALIMPIA (2016), consideran como el factor de formación con mayor influencia en la génesis del suelo, coadyuvado por la acción de los organismos y especialmente de la cobertura vegetal.

El conocimiento adquirido en la representación espacial de la temperatura del aire y del suelo en las tierras colombianas, puede cartografiarse con la ayuda de modelos digitales del terreno que transfieren una mayor aproximación a la realidad en el campo de la pedología, pues determina los índices de intemperización de las rocas y los procesos genéticos de los suelos. Esto es indispensable conocerlo a la escala semidetallada para adquirir mayor precisión en la forma como se distribuyen los suelos en el paisaje.

El objetivo de la presente investigación es validar los avances en la zonificación climática aplicada a levantamiento de suelos, mediante la comparación de cartografía de clima extractada del levantamiento general de suelos y el subproducto derivado de la delimitación de la frontera agrícola, con la zonificación climática derivada de gradiente de temperatura y el índice de humedad de Holdridge.

Marco teórico

En la consulta de investigaciones relacionadas con la variación de la temperatura se revisaron los planteamientos iniciales centrados en el análisis fisiográfico y en los análisis de gradientes de temperatura realizados por PULIDO y GARZÓN (1987); FLÓREZ (1986); CALLEJAS y CASTELLANOS (1991); PINZÓN (1989); JIMÉNEZ y FLÓREZ (1993); VILLASECA (1995); POVEDA, VÉLEZ y MESA (2000); IGAC (2014); CASTRO y AGUALIMPIA (2014), las similitudes encontradas de estos resultados y la identificación de zonas morfoclimáticas basadas en la armonización de la cartografía oficial del IGAC junto con los trabajos de campo permitieron su delimitación.

Como resultado de estos estudios se presentó a la comunidad académica la identificación de las zonas morfoclimáticas colombianas y los gradientes de temperatura de la tierra (Tabla 1.) como aporte a la correlación entre el clima ambiental y el régimen climático del suelo (AGUALIMPIA y CASTRO, 2018).

Además de los elementos cartográficos oficiales (IGAC, 2002), la consulta de estudios regionales específicos PABÓN, ESLAVA y GÓMEZ (2001) y los análisis de correlación altitud y temperatura (JIMÉNEZ y FLÓREZ, 1993), comparación de regímenes de temperatura y rangos de precipitación (GUZMÁN, RUÍZ y CADENA, 2014), se consultó la representación cartográfica de las zonas de vida de Colombia (ESPINAL, 1978) y los datos reportados en los trabajos de reconocimiento de suelos que realizó el IGAC entre el 2011 al 2016.

Tabla 1. Modelos de regresión temperatura del aire y altitud por unidad morfoclimática

NÚMERO	UNIDAD MORFOCLIMÁTICA	R ²	REGRESIONES	GRADIENTE TÉRMICO °C/100 m
1	AMAZONIA	0,73	Temp amb = 26,727 + (-0.005* h)	-0,50
2	ORINOQUIA	0,83	Temp amb = 27,425 + (-0.0052* h)	-0,96
3	ORIENTAL - ORIENTAL	0,99	Temp amb = 28,040 + (-0.0058*h)	-0,47
4	ORIENTAL- OCCIDENTAL	0,98	Temp amb = 29,711 + (-0.0061*h)	-0,81
5	MACIZO CENTRAL	0,99	Temp amb = 30,136 + (-0.0064*h)	-0,64
6	VALLE DEL MAGDALENA	0,98	Temp amb = 28,601 + (-0.0057*h)	-0,55
7	OCCIDENTAL- ORIENTAL	0,98	Temp amb = 30,062 + (-0.0064*h)	-0,64
8	OCCIDENTAL- OCCIDENTAL	0,78	Temp amb = 27,541 + (-0.0055*h)	-0,61

NÚMERO	UNIDAD MORFOCLIMÁTICA	R ²	REGRESIONES	GRADIENTE TÉRMICO °C/100 m
9	ANDEN PACIFICO	0,62	Temp amb = 27,015 + (-0.0050*h)	-0,50
10	CENTRAL-ORIENTAL	0,89	Temp amb = 28,2387 + (-0.0016*h)	-0,52
11	GUAJIRA	0,97	Temp amb = 28,338 + (-0.0081*h)	-0,57
12	SIERRA NEVADA DE STA MARTA	0,99	Temp amb=29,097+(-0,0063*h)	-0,57
13	CARIBE OCCIDENTAL	0,82	Temp amb =27,542 +(-0,0057*h)	-0,56
14	CARIBE ORIENTAL	0,83	Temp amb =27,668 +(-0,0056*h)	-0,62
15	INSULAR	0,94	Temp amb =30,738 +(-0,0294*h)	0,38

Fuente: AGUALIMPIA y CASTRO, 2018.

Las zonas morfoclimáticas de Colombia, permitieron el ajuste de las cotas índices para cada piso térmico acorde con las condiciones regionales, lo que permite cartografiar los límites climáticos indicados en la tabla 1. Como aporte adicional para la revisión de la frontera agrícola se presentan los rangos óptimos de régimen de lluvias distribuidas espacialmente acorde con la rasterización de la precipitación.

En segunda instancia y luego de definir el gradiente de temperatura en cada zona morfoclimática fue indispensable revisar los métodos que se aplican en las latitudes más altas del planeta, en donde ocurren las estaciones, solo para mostrar los errores conceptuales que se aplican aún en Colombia cuando se realizan zonificaciones climáticas que fueron creadas para otros contextos y son sensibles a otras condiciones climáticas diferentes a las que se presentan en la zona intertropical colombiana.

Las zonas climáticas globales delimitadas a partir de grados de latitud se basaban en la incidencia de los rayos solares desde la línea ecuatorial hacia los polos (FINCH y TREWARTA, 1944); inicialmente se clasificaban en tierras cálidas, templadas y frías demarcadas desde la línea ecuatorial hacia los polos. Dado que en la línea ecuatorial estos desplazamientos hacia los sentidos norte o sur hacia los polos no presentaban gran influencia en las características climáticas. En 1802 Francisco José de Caldas determinó la clasificación climática basada en los pisos térmicos de acuerdo con registros de temperatura que seguían la misma categorización asignada a las zonas climáticas globales (ALBIS y MARTÍNEZ, 2000).

Lo anterior representa un esfuerzo intelectual de Caldas para definir una zonificación climática ajustada a la zona intertropical. En otro contexto OLIVER (2005) afirmó que los tipos de vegetación fueron los primeros referentes climáticos que aplicó KOEPPEN en 1931 para definir su clasificación climática, especialmente hacia distinción de los climas áridos y los semiáridos, aunque también se apoyaba en la presencia de especies caducifolias que son comunes en las zonas templadas.

DOKUTCHAEV (1883) se interesó en los efectos que se identifican en los suelos cuando la evapotranspiración supera la precipitación; siguiendo en esa línea de investigación en 1920 Richard Lang relacionó la precipitación con la temperatura y las asoció a diferentes tipos de paisaje como los bosques y las praderas (IDEAM, 2005).

MARTONNE en 1926 propuso el análisis del déficit de humedad mediante el índice de aridez, conocido como índice termo-pluviométrico en el que se relaciona la precipitación media anual con la temperatura aumentada en diez grados. Este índice climático hace parte de las metodologías que permiten el análisis de tierras desérticas y tienen poca utilidad para identificar variaciones en zonas húmedas; en ese sentido el índice de aridez tiende a sobrevalorar la presencia de agua en un espacio de tierra.

En cuanto al tema de humedad de las tierras HOLDRIDGE (1979) propuso un indicador para identificar las formaciones vegetales que resultó muy útil en la masificación de catastro rural en Colombia y fue utilizado en la metodología de zonas homogéneas de tierras (IGAC, 1997).

El indicador de biotemperatura en el que se estima el crecimiento de las plantas en el rango 0°C a 30°C, no presenta utilidad práctica en los estudios de clima en Colombia debido a que las tierras la latitud norte no supera los 5° y las variaciones por posición en el globo terráqueo son insignificantes a la escala semidetallada. En ese sentido el gradiente de temperatura Hallado por AGUALIMPIA y CASTRO (2018), para cada vertiente o zona morfoclimática reemplaza el ajuste por biotemperatura que propuso Holdridge (1979).

En Colombia las decisiones sobre la zonificación climática provenían de Instituciones especializadas; no obstante, las nuevas necesidades de cartografía de suelos más detallada requería una revisión profunda de los procedimientos y de poner a prueba paradigmas muy arraigados en el subconsciente, una de ellas es el uso del índice de Lang como un sustituto del índice de Holdridge que incrementa la extensión de tierras con mayor humedad que la que se percibieron en los trabajos de campo realizados en 15 levantamientos de suelos y en una extensión de 2.061.000 hectáreas suficientes para verificar su aplicación (Agualimpia y Castro, 2018).

Metodología

Se escogieron 69 municipios del departamento de Boyacá, 8 de Santander y uno de Casanare que cubren un bloque continuo de 1.359.746 ha. de los cuales 558.580,1 ha (41,08%) corresponde a frontera agrícola localizada en el departamento de Boyacá (Figura 2).

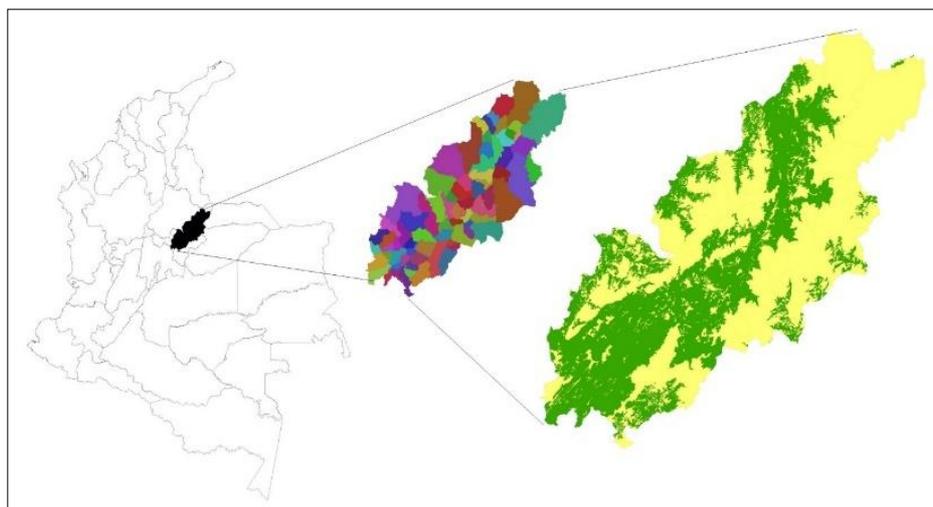


Figura 2. Localización del área analizada y proporcionalidad de la frontera agrícola.

El primer elemento del clima mejorado a la escala semidetallada fue la representación espacial de la temperatura del aire como resultado del análisis de las zonas morfoclimáticas obtenidas a partir del modelo digital del terreno y el análisis de rugosidad a través de la correlación entre datos medios de temperatura anual georeferenciada en 685 estaciones del IDEAM, escogidas para la normal climatológica de 30 años.

Al generar los 15 modelos de correlación altitud temperatura se genera la representación espacial de valores puntuales dependientes de la rugosidad de los relieves que pueden identificarse con la ayuda de un modelo SRTM con una celda de 30 m. El modelo aplicado a la zona de estudio corresponde a la vertiente occidental de la cordillera oriental que presenta un gradiente de descenso de la temperatura de $0,81^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros de ascenso en la montaña.

Cada estación climatológica fue armonizada de acuerdo con el valor de altura contenida en su base de datos y localizado acorde con el municipio reportado, por cuanto hubo un trabajo de readecuación de la información que se encontraba referenciada con coordenadas que no contenían decimales y esto ocasionaba un desplazamiento de la información de estaciones entregadas por el IDEAM en algunos casos de centenares de metros.

Cada zona morfoclimática en formato de capa digitalizada sirvió para cortar el modelo digital del Terreno MDT SRTM de 30 metros y en cada zona se corrió el modelo de regresión (Tabla 1) y con la herramienta *raster calculator* de *Arc Gis* se obtuvo la distribución de la temperatura del aire; luego se hizo un proceso de intercorrelación para armonizar los valores entre zonas morfoclimáticas. El resultado fue un mapa nacional de temperaturas del aire para toda Colombia (AGUALIMPIA y CASTRO, 2018).

Se definió un área de verificación que contaba con una amplia red vial para hacer recorridos y tomar registros de coordenadas, fotografías y observaciones en terreno para constatar áreas de producción agrícola y grados de aptitud de estos usos dentro de la frontera agrícola y verificar la incidencia de la distribución de los climas. Se aplicó un método cualitativo basado en la observación de experto en uso de las tierras, para visualizar controversias o problemas de planificación del uso de la tierra en estos 69 municipios.

Luego de generado el raster de temperatura y de escoger el sector para realizar el transecto donde se revisó la delimitación de la frontera agrícola y los usos de protección ambiental en el páramo de Güicán, se procedió al cálculo de valores de evapotranspiración recomendados por HOLDRIDGE (1978).

$$ETP = \text{Temp. del aire} \times 58,93$$

ETP es la evapotranspiración

58.93 es el factor de humedad de Holdridge

Temp. del aire es el valor puntual obtenido del modelo matemático por zona morfoclimática.

La figura 3 muestra la similitud que hay entre rasters de precipitación y evapotranspiración - ETP cuando se aplica el factor de humedad de Holdridge (1979); se observa mayor temperatura y mayores índices de ETP en los valles intramontanos.

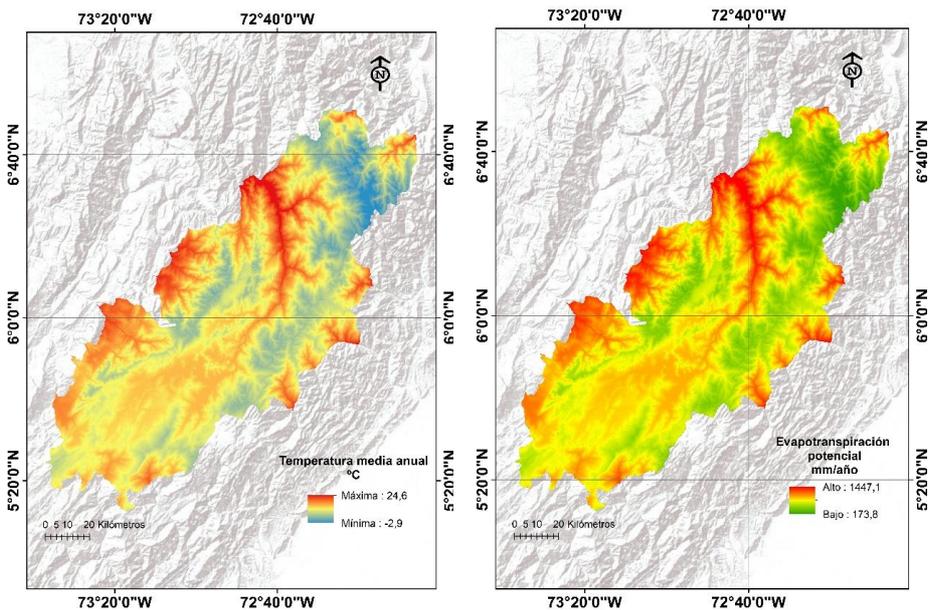


Figura 3. Temperatura del aire obtenida por gradiente de temperatura y el resultado de la Evapotranspiración potencial obtenida por el método de Holdridge.

Fuente: los autores

Para obtener información de la precipitación se utilizaron los datos de precipitación puntual de la normal climatológica del IDEAM (1980 – 2010) y se obtuvo el raster de distribución de la precipitación aplicando interpolación de valores (Figura 4).

Hay varios métodos para realizar la interpolación de valores; Arc Gis tiene las opciones Spline, Natural Neighbor, Kriging e IDW (Inverso proporcional de la distancia). El Método Spline se aplica a terrenos de relieve plano; el método Neighbor es útil cuando hay demasiados puntos de referencia; el método kriging es útil cuando existe una alta correlación espacial entre los datos; y el IDW es el más simple, considera un valor y distancia de puntos desconocidos a cada celda cuyo valor se quiere calcular.

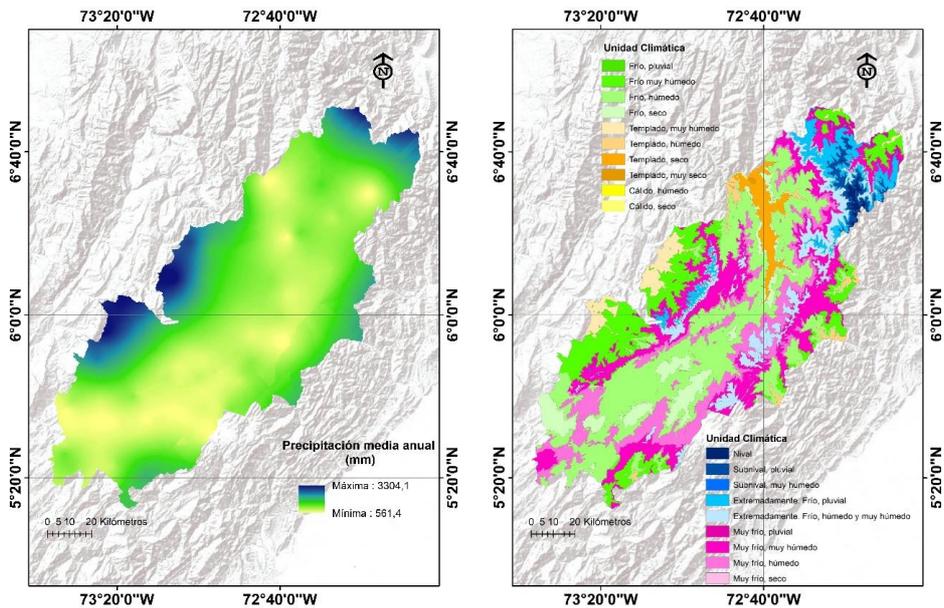


Figura 4. Distribución de la precipitación y unidades climáticas
Fuente: los autores

El proceso que se siguió para la delimitación de las unidades climáticas comienza con la determinación de las cotas de los pisos térmicos regidos por los valores de temperatura promedio anual derivadas del raster de temperatura proveniente de las zonas morfoclimáticas. Los índices de los pisos térmicos para Colombia se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Pisos térmicos y su equivalente de régimen térmico del suelo

PISO TERMICO	TEMP DEL AIRE °C	TEMPERATURA DEL SUELO °C	REGIMEN TÉRMICO DEL SUELO
Cálido	>24	>22	Isohipertérmico
Templado	18 - 24	15 A 22	Isotérmico
Frío	12 A 18	8 A 15	Isoméxico
Muy frío	8 A 12	0 A 8	Isofrígeno
Extr. frío	8 A 4		
Subnival	0- 4		
Nival	< 0	<0	Criico

Fuente: IGAC (2014) USDA (2014)

Delimitados los pisos térmicos el paso siguiente fue calcular el índice de humedad de las tierras propuesto por HOLDRIDGE (1979). El método consistió en estimar la relación de evapotranspiración (ETP), calculada a partir de la información rasterizada de temperatura del aire y dividirla por el raster de precipitación para cada piso térmico; la interpretación del índice de humedad se realizó a través de la tabla 3. Esto permitió un mayor detalle cartográfico de la delimitación de las zonas húmedas y las zonas áridas.

Tabla 3. Interpretación del índice de humedad de las tierras por el sistema Holdridge

Relación Evapotranspiración/precipitación	Índice de Humedad
>4	Árido
4 – 2	Muy seco
2 – 1	Seco
1 - 0.5	Húmedo
0.5 - 0.25	Muy húmedo
0.25 - 0.125	Pluvial

Fuente de datos: HOLDRIDGE, 1979.

La combinación de pisos térmicos y condiciones de humedad corresponde a la unidad climática que se aplica en los levantamientos de suelos en Colombia; el avance se centró en ajustar los pisos térmicos y el detalle de como se distribuye la condición de humedad en los paisajes.



Figura 5. Aspectos fisiográficos del páramo de Güicán (área de conservación) arriba a la izquierda la parte más alta el pico Ritacuba; arriba a la derecha el valle glaciar con el nacimiento del río y abajo panorámica laderas, coluvios y morrenas (Lida López, 2019).

El trayecto escogido para verificar la frontera agrícola y las zonas de conservación se realizó mediante el recorrido desde Bogotá a Tunja en donde se hicieron observaciones del uso actual y los suelos para las áreas dentro de la frontera agrícola durante el recorrido de Tunja a Soata (Boyacá); los límites de la zona de conservación (ambiental) se verificaron desde Soata hasta Güicán con entrada al Parque Nacional Natural El Cocuy (Figura 5).

Se subió al aplicativo Avenza la cartografía de zonificación climática establecida por el método y los límites de frontera agrícola para hacer seguimiento con el GPS; se realizaron anotaciones sobre las características de los suelos, información sobre como se distribuye la población y se verificó la capacidad de uso de las tierras dentro de la frontera agrícola.

Resultados y Análisis

En la Tabla 4 se resumen las unidades climáticas que se encuentran dentro de la frontera agrícola analizada para los 69 municipios del departamento de Boyacá; el principio que rige las clasificación por pisos térmicos derivados del gradiente de temperatura está en que las cotas de altitud que representan la franja climática de cada piso térmico y depende de la zona morfoclimática; para el caso de estudio corresponde al modelo correlacional de la temperatura y la altitud de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental (zona No, 4) y sus unidades están referidas en metros sobre el nivel de referencia del mar (msnm). Esta vertiente cuenta con la mayor cantidad de estaciones por área analizada lo que permite un mayor grado de confiabilidad. Es importante destacar que hay una alta variabilidad de climas que se distribuyen desde los pisos térmicos muy altos como es el extremadamente frío delimitado entre las cotas 3.450 y 4.070 msnm hasta el piso térmico más cálido con la altitud más baja en el sector de 837 msnm.

Para el análisis de la importancia del clima en la identificación de zonas homogéneas para el catastro, se analizaron 265 leyendas de áreas homogéneas de tierras - AHT, correspondiente a 4372 registros de características de tierras y se encontró que los valores más bajos se encontraban en tierras erosionadas sin importar la unidad climática, estas tierras contienen abundantes fragmentos de roca y son muy superficiales.

A la clase 12 que tiene una aptitud muy baja para agricultura con usos muy restringidos todo el año se encuentra en clima extremadamente frío y en contraste con lo anterior las mejores tierras para agricultura son las que se encuentran en pisos térmicos, cálidos, templados y fríos y todos húmedos o muy húmedos. De acuerdo con esos registros documentales el 81% de las tierras localizadas en la frontera agrícola analizada en Boyacá tienen aptitud para la agricultura si se analiza la cuestión climática; no obstante, es necesario observar otras variables como la pendiente, la profundidad del suelo, la textura y la erosión para identificar plenamente esa vocación de uso de las tierras.

Se concluye que este análisis climático basado en zonas morfoclimáticas permite depurar la información con la que se tomó la decisión de establecer la frontera agrícola a la escala general.

Tabla 4. Distribución de unidades climáticas en la frontera agrícola

ÍNDICE DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	ÍNDICE DE HUMEDAD MEDIA ANUAL (ADIMENSIONAL)	UNIDAD CLIMÁTICA	AREA (ha)	%
4,0 a 8,0	1 - 0.5	EXTREMADAMENTE FRÍO HÚMEDO	5874,9	1,05
	0.25 - 0.125	EXTREMADAMENTE FRÍO PLUVIAL	488,1	0,09
8,1 a 12,0	0.25 - 0.125	MUY FRÍO PLUVIAL	223,1	0,04
	0.5 - 0.25	MUY FRÍO MUY HÚMEDO	45589,0	8,16
	1 - 0.5	MUY FRÍO HÚMEDO	75129,9	13,45
	2 - 1	MUY FRÍO SECO	2,5	0,00
12,1 a 18,0	0.25 - 0.125	FRÍO PLUVIAL	40,8	0,01
	0.5 - 0.25	FRÍO MUY HÚMEDO	52453,5	9,39
	1 - 0.5	FRÍO HÚMEDO	241576,3	43,25
	2 - 1	FRÍO SECO	69245,1	12,40
18,1 a 24	0.5 - 0.25	TEMPLADO MUY HÚMEDO	22803,1	4,08
	1 - 0.5	TEMPLADO HÚMEDO	8818,6	1,58
	2 - 1	TEMPLADO SECO	35355,1	6,33
	4 - 2	TEMPLADO MUY SECO	638,3	0,11
24,1 a 24,6	1 - 0.5	CÁLIDO HÚMEDO	68,1	0,01
	2 - 1	CÁLIDO SECO	273,4	0,05
TOTALES			558579,8	100,00

Fuente: los autores

De acuerdo con la metodología de Áreas Homogéneas de Tierras con Fines Catastrales (IGAC, 1997) la condición de humedad de las tierras es un parámetro muy importante para determinar el Valor Potencial - VP, siendo el piso térmico el elemento determinante que se aplica para definir el valor potencial de las tierras.

En ese sentido el valor potencial disminuye en la medida que se asciende a relieves más altos y las condiciones de humedad húmedo y muy húmedo tienen los más altos valores potenciales, mientras que las regiones con valores extremos como el pluvial y el desértico dan los valores más bajos, incluso negativos para el uso agrícola; esto de alguna manera indica que los climas secos tienen menores condiciones agronómicas; lo anterior para mostrar que dentro de la frontera agrícola de estos municipios de Boyacá, hay sectores que tienen menor capacidad de resiliencia y con el abuso tienden a degradarse rápidamente. De acuerdo con los datos de la tabla 5 las tierras que ocupan bosques secos tienen una extensión de 105.514 ha (18,8%), mientras que las tierras de condición pluvial apenas cubren 752 hectáreas.

Las zonas morfoclimáticas se constituyen en un aporte al conocimiento, porque permitieron la revisión regional de las cotas de los pisos térmicos los cuales se ven reflejados en la revisión de la frontera agrícola en este sector pues ayudo a identificar los pisos térmicos extremadamente frío y muy frío que representan los bosques de niebla y

la zona de matorrales que antecede al páramo, franjas de alta fragilidad ambiental, zonas en donde se condensan las lluvias horizontales y permiten la regulación de los caudales bases de las quebradas que nacen en estos lugares.

En otras investigaciones realizadas por CASTRO, AGUALIMPIA Y SÁNCHEZ (2016), la misma Cordillera oriental en la que se encuentra la zona en estudio mostró diferencias en la temperatura del aire para cada vertiente. Las llamaron Vertientes frías o solanas y vertientes internas o cálidas denominadas solana.

Güicán de la sierra es un municipio de Boyacá que tiene alta vocación para el turismo; tiene una extensión de 94.796 hectáreas. En los recorridos a campo por el páramo de Güicán, pudo divisarse el punto más alto, el pico Ritacuba que permanece cubierto continuamente de nieve y se encuentra a 5.330 metros de altitud (Video CASTRO ET AL., 2019).

Para analizar la generación de pisos térmicos a partir del modelo de regresión temperatura altitud se hizo un acercamiento a mayor escala del municipio localizado en el extremo norte de la zona de estudio, en Güicán un municipio de Boyacá que cuenta con muy poca área dentro de la frontera agrícola es donde se encuentra el pico de Ritacuba, el más alto de la Cordillera oriental (Figura 6). Mediante este método se identificaron 10 unidades climáticas distribuidas en los pisos térmicos Nival, Subnival, Extremadamente frío, Muy frío, frío y templado.

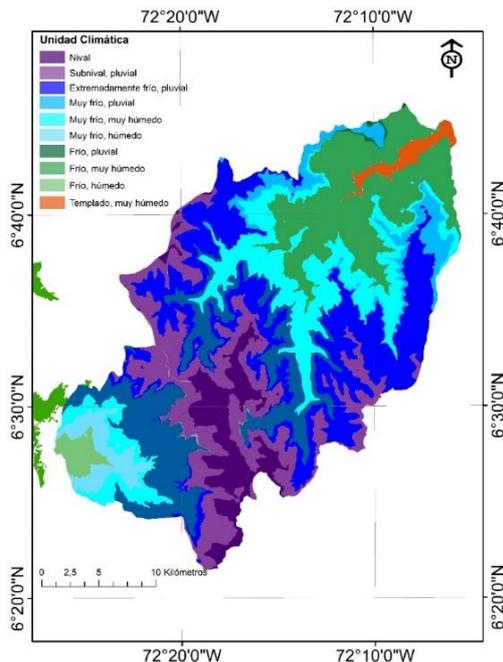


Figura 6. Zonificación climática Güicán de la Sierra, Boyacá, Colombia

Fuente: Elaboración propia a partir de la zona morfoclimática vertiente occidental de la Cordillera oriental.

Güicán es un territorio productor de agua desde la zona del nevado hasta la zona templada; las aguas corren por el cauce del río Lagunilla hacia la frontera agrícola delimitada; el territorio real propuesto por BONZZANO (2012) está representado en los paisajes de alta montaña como son los crestones, valles glaciáricos, coluvios y morrenas que poco a poco regulan las aguas de escorrentía y proveen de un caudal constante a los ríos que irrigan las tierras con vocación agrícola; con esto se aseguran los servicios ambientales que también resultan ser factores de la economía agrícola.

Esta investigación en su segunda fase de comprobación permitió mostrar que las zonas morfoclimáticas sirvieron para ajustar las cotas de los pisos térmicos en el sector de estudio en la frontera agrícola y se convierte en un instrumento rápido y seguro para mejorar la delineación de la frontera agrícola en Colombia, partiendo de la posibilidad de dejar fuera de la frontera agrícola, los pisos térmicos muy fríos y extremadamente fríos y como medida de protección de los bosques secos que es posible identificar con este procedimiento para extraer estos sectores de la frontera recientemente delimitada en Colombia (MADR;UPRA, 2018).

En la tabla 5 se resumen las cotas halladas de los pisos térmicos identificados en la zona de estudio que pueden delimitarse con la ayuda de un DEM de alta resolución.

Tabla 5. Cotas halladas de los pisos térmicos en el área de estudio de Boyacá.

Piso térmico	Cota superior (m)	Cota interior (m)	Rango temp media del aire °C
Nival	5330	4210	Menor a 0
Extremadamente frío	4210	3560	0 a 4
Muy frío	3560	2900	4 a 8
Frío	2900	1925	8 a 12
Templado	1925	937	12 a 24
Cálido	937	0	mayor de 24

Fuente de datos: con base en el modelo de regresión de la vertiente occidental de la Cordillera oriental (AGUALIMPIA y CASTRO, 2018).

De acuerdo con la información reportada por RANGEL (2002) y FLÓREZ (2003), la alta montaña puede identificarse de acuerdo con la presencia de estructuras vegetales y también por huellas dejadas por los glaciares en el paisaje; además ellos ofrecen la oportunidad de delimitar los pisos bioclimáticos como la franja altoandina (3000 a 3200 msnm), páramo alto (3200 a 3500 msnm), páramo propiamente dicho (3600 a 4100 msnm) y superpáramo (4100 a 5100 msnm).

En resumen, la Figura 7 muestra el procedimiento general que se sugiere para ajustar la frontera agrícola; en primer lugar, se toman las zonas morfoclimáticas y sus modelos de regresión altitud y temperatura y se transfieren al modelo digital para generar el raster de temperatura; mediante el factor de condición de humedad de Holdridge (58,93) se genera la espacialización de la evapotranspiración.

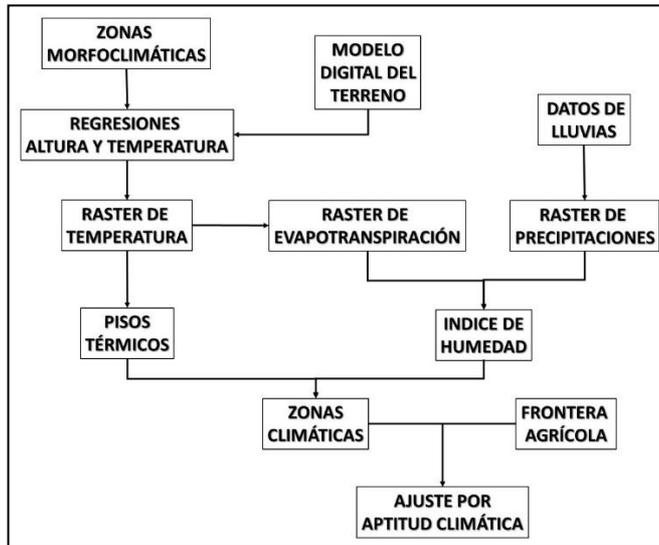


Figura 7. Esquema de procedimiento para ajustar la frontera agrícola.
Fuente: Elaboración propia.

De otro lado los datos puntuales de precipitación se llevan a un raster con igual tamaño de celda de la evapotranspiración; en el caso de 30 por 30 metros, se pueden aplicar varios métodos de interpolación disponibles en el paquete Arc Gis, se aconseja el inverso de la distancia - IDW.

Para delimitar el piso térmico se puede reclasificar el raster de temperatura acorde con las temperaturas índice de los pisos térmicos y en cada uno de ellos se procede a calcular el índice de humedad. El índice de humedad consiste en cruzar los rasters de ETP y precipitación; de acuerdo con el resultado se clasifica la condición de humedad de las tierras. La espacialización de pisos térmicos interceptados por las condiciones de humedad corresponde a las unidades climáticas.

Se tomaron las zonas delimitadas como frontera agrícola y se cruzaron con las unidades climáticas para determinar los climas que están excluidos de los procesos agropecuarios o aquellos que presentan desventajas en la disponibilidad de agua o en el exceso de agua; es posible identificar estas zonas de protección dentro y fuera de la frontera agraria para mantener los servicios ecosistémicos.

Consideraciones Finales

La consistencia temática debe iniciar en los conocimientos adquiridos durante el proceso de elaboración cartográfica de los suelos y los avances empiezan en la mejora de los procedimientos y en el acercamiento a la realidad en la medida que las escalas de esa representación se aproximan cada vez más al terreno. Cuando los esquemas mentales, elaborados a una escala entran en contradicción con lo que se observa en campo, es necesario replantear los procedimientos para obtener productos consistentes.

Los datos obtenidos de fuentes oficiales como la normal climatológica del Instituto Hidrológico, Meteorológico y de Estudios Ambientales – IDEAM es un buen inicio para sentar las nuevas bases estructurales y validar los avances en el conocimiento; en el caso de los levantamientos de suelos es el Instituto Geográfico Agustín Codazzi el que debe mostrar sus debilidades en la zonificación climática aplicada a la delimitación de los suelos y son a su vez los grupos de investigación y las instituciones universidades las llamadas a apoyar los procesos de investigación de manera que puedan verificarse y avalar los métodos y procedimientos utilizados en la búsqueda de conocimiento científico.

Los resultados mostrados en esta investigación, así como los subproductos materializados en los gradientes de temperatura y en la distribución de variables climatológicas son motivo de revisiones en campo y muestran una versión de zonificación climática de Colombia que es mejorada en la medida que se realizan salidas a campo, se comprueban datos con geotermómetros y se identifican especies vegetales indicadoras del clima, todo esto contemplado en la metodología que sigue el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para los levantamientos de suelos que se realizan en el país.

Referencias

AGUALIMPIA, DUALIBY, Yolima; CASTRO, MÉNDEZ, Carlos. *Propuesta metodológica para la zonificación climática a diferentes escalas en Colombia, con fines de manejo sostenible del territorio. Fase I*. Bogotá: Centro de Investigaciones de la Universidad Distrital (CIUD), Grupo de investigación Programa de Gestión Ambiental en Servicios Públicos (PROGASP). Bogotá, Colombia. 2016.

AGUALIMPIA, DUALIBY, Yolima; CASTRO, MÉNDEZ, Carlos. *Definición de zonas morfoclimáticas de Colombia: un aporte a la correlación entre clima ambiental y el régimen climático del suelo*. Agua y ambiente. Experiencias y reflexiones frente al desarrollo sostenible y sustentable. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. 2018. 13 a 30 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329119028_Definicion_de_las_zonas_morfoclimaticas_de_Colombia_un_aporte_a_la_correlacion_entre_el_clima_ambiental_y_el_re_gimen_climatico_del_suelo. Accedido en: 12.01.2020

ALBIS, Víctor; MARTÍNEZ, Regino. *Las investigaciones meteorológicas de Caldas*. Meteorología Colombiana, (2), 131-140. 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264728263_Las_investigaciones_meteorologicas_de_Caldas. Accedido en: 1.03. 2021

BOZZANO, Horacio. *Territorios Reales, Territorios Pensados, Territorios Posibles. Aportes para una Teoría Territorial del Ambiente*. Espacio editorial. Argentina. 263 p. 2012.

CALLEJAS, H y CASTELLANOS, J. *Regímenes de temperatura del suelo (actual y propuesto)*. Suelos Ecuatoriales, XXI (1), 1991. Pp 39-50.

CASTRO, MÉNDEZ, Castro; AGUALIMPIA, DUALIBY, Yolima. (2014). *Gradiente de temperatura aplicado a regímenes de temperatura del suelo en páramos de la cordillera oriental*. XVII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Popayán, Colombia.

CASTRO, MÉNDEZ Carlos; PICÓN, Anthony; GAMBA, Oscar; LÓPEZ, Lida; MORA, Jennifer. *Territorio real de las áreas protegidas del Güicán en Boyacá, Colombia*. Video 4,39 minutos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2019. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=L2eve1ng84M&t=44s>

DOKUCHAEV, Vasily (1883). *Russian Chernozem*. Selected Works of V.V. Dokuchaev, 1, 14-419.

OLIVER, Jhon. (Eds.) *Encyclopedia of World Climatology*. Netherlands, New York: Editorial Dordrecht. 2005. Disponible en <http://1.droppdf.com/files/Au9Jb/encyclopedia-of-world-climatology.pdf>. Accedido en: 8.22.2019.

ESPINAL, Sigifredo (1978). *Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia*. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico escala 1:500.000. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

FINCH, Victor. y TREWARTHA, Glenn. (1944). *Elements of Geography. Physical and Cultural*. Nueva York:Mc.Graw-Hill.

FLÓREZ, Antonio. (1986). *Relación altitudinal de la temperatura del suelo y del aire en los Andes centrales de Colombia*. Revista Colombia Geográfica, 2, 5-36.

Flórez, Antonio. Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia. Unibiblos. 240 p. 2003. Disponible en https://www.academia.edu/34463424/Colombia_evoluci%C3%B3n_de_sus_relieves_y_modelados_PDF. Accedido en: 1.10. 2021

GUZMÁN, Diana., RUÍZ, José y CADENA, Miguel. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*. Disponible en <http://goo.gl/OJwfmX>. Accedido en: 12.22.2020

- HOLDRIDGE, Leslie (1979). *Ecología basada en zonas de vida*. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: autor.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). *Metodología para la elaboración de áreas homogéneas con fines catastrales*. Bogotá: Ministerio de Hacienda y Crédito Público. 1997.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). *Atlas de Colombia*. (5ta. Ed.). Bogotá: autor. 2002.
- JIMÉNEZ, Luis. y FLÓREZ, Antonio. *Modelo de correlación altitudinal entre la temperatura estabilizada del suelo y la temperatura del aire*. ZENIT, (4), 13-22. 1993.
- KÖEPPEN, Wladimir. *Climatología. Con estudio de los climas de la tierra*. México, D. F. y Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica. 1931.
- MADR; UPRA (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Unidad de Planificación Regional Agropecuaria). *Identificación General de la Frontera Agrícola en Colombia. Escala 1:100.000*. versión 1.0. Bogotá. 61 p. 2018. Disponible en: https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Projects_Documents/IDENTIFICACION%20GENERAL%20DE%20LA%20FRONTERA%20.pdf. Accedido en: 2.12.2020
- PABÓN, José. ESLAVA, Jesús Antonio. y GÓMEZ, Raúl. *Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación*. Meteorología Colombiana, (4), 47-59. 2001.
- PINZÓN, Angela. *Temperatura edáfica del páramo de Sumapaz*. Suelos Ecuatoriales, 19(1), 31-40. 1989.
- POVEDA, Germán, VÉLEZ, Jaime., y MESA, Oscar. *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín: Universidad nacional de Colombia. 2000.
- PULIDO, Carlos y GARZÓN, Cesar. *Contribución al conocimiento de los regímenes de temperatura en Colombia*. Suelos Ecuatoriales, XVII(2), 1987, pp 106-112.
- RANGEL, Orlando. *El inventario de la Biodiversidad de Colombia: Los actores involucrados y sus logros*. En: M. Wasserman, J.M. Rincón & C. Corredor (eds). Reflexiones sobre la Ciencia y la tecnología: Colombia al iniciarse el siglo XXI. Rev. Ac.Colomb.Cienc.E.Fis.Nat. Colección Memorias N° 11: 154-167. 2002.
- VILLASECA, Sergio. *La temperatura del Suelo*. Agricultura Técnica, 50(2), 1995. Pp 155-160.

Carlos Enrique Castro Méndez

Doctor (C) Geografía y Magíster en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas en la Universidad Santo Tomás. Agrólogo de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Actualmente funcionario del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Grupo Interno de trabajo Levantamiento de suelos y aplicaciones agrológicas.

E-mail: cecastro@igac.gov.co

Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby

Doctora en Ciencias Técnicas en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. Cuba. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos hídricos Universidad de los Andes. Ingeniera Civil de la Universidad de la Salle, Colombia.

Actualmente docente de planta del Programa Gestión Ambiental y Servicios Públicos, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia

E-mail: yagualimpiadualiby@gmail.com

Recebido para publicação em janeiro de 2021
Aprovado para publicação em março de 2021