

Manuscrito aceptado/ Accepted Manuscript

Título	Variabilidad climática y disponibilidad hídrica en los valles de Ubaté, Chiquinquirá y Alto Chicamocha, Colombia
Title	Climatic variability and water availability of the Ubaté and Chiquinquirá valleys and Alto Chicamocha, Colombia
DOI	10.15446/acag.v68n3.69082
Recibido/Received	2017-11-28
Aceptado/Accepted	2019-07-03

Este es el archivo PDF de un documento aceptado para publicación en una versión preliminar. El manuscrito pasará por una serie de fases previas a publicación en su versión final. Por favor tener en cuenta que durante el proceso de producción el documento puede tener cambios que afecten el contenido.

This is the PDF file of a document accepted for publication in a preliminary version. The manuscript will go through a series of phases prior to publication in its final version. Please note that during the production process the document may have changes that affect the content.

Manuscrito aceptado/ Accepted Manuscript

Variabilidad climática y disponibilidad hídrica en los valles de Ubaté, Chiquinquirá y Alto Chicamocha, Colombia

Climatic variability and water availability of the Ubaté and Chiquinquirá valleys and Alto Chicamocha, Colombia

Alexandra Estefanía Fajardo Rojas

Agrosavia, Cúcuta, Colombia. Autor para correspondencia: estefaniafajardorojas@gmail.com

Rec.: 2017-11-28 Acep.: 2019-07-03

Resumen

En este estudio se analiza la variabilidad climática de dos regiones de importancia agropecuaria en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (Colombia). Se identifican comportamientos modales de variables climáticas de interés agropecuario, así mismo, se realiza el análisis intra-anual de eventos extremos y se identifican áreas con deficiencias y excesos hídricos a través de un balance hidroclimático. Además, se identifican zonas con mayor frecuencia de condiciones de deficiencias y excesos hídricos en el suelo a escala mensual por medio del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI). Los resultados indican que ambas zonas de estudio no muestran grandes diferencias climáticas entre sí, sin embargo, es importante realizar el estudio por separado con la intención de proporcionar información local de utilidad para los productores. Saboyá en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Sotaquirá en el Alto Chicamocha son altamente afectados por eventos tanto de deficiencia como exceso hídrico. El evento El Niño 1997 tuvo un impacto más fuerte en el área del Valle de Ubaté y Chiquinquirá, mientras que en el Alto Chicamocha se registró la mayor reducción de la precipitación en 1992, lo que coincidió con un evento El Niño. En cuanto a excesos hídricos, 2011 registró aumentos superiores a 50% en la precipitación en las regiones del estudio, este comportamiento responde al evento La Niña registrado ese año.

Palabras clave: Recursos hídricos, agrometeorología, clima, precipitación atmosférica, variación estacional, balance hídrico, sequía, producción ganadera.

Abstract

The climatic variations make difficult to plan activities in agricultural systems, it is necessary to update the knowledge of local climate conditions. This study analyzes the climatic variability of relevant agricultural regions in Boyacá and Cundinamarca. Modeling behaviors of climatic variables of agricultural interest are identified, likewise, the intra-annual analysis of extreme events is carried out and areas with water deficiencies and excesses are identified through a hydroclimatic balance. Finally, areas with greater frequency of deficiencies and water excess conditions in soil were identified on a monthly basis by index of the Palmer Drought Severity Index (PSDI). The results indicate that the two zones of study do not show great climatic differences between them, however, it is important to carry out separately study of them looking for provide local useful information for producers. Saboyá in the Ubaté Valley and Chiquinquirá and Sotaquirá in the Alto Chicamocha were affected by both, deficiency and excess, water events. The 1997 El Niño event had a stronger impact in the Ubaté Valley and Chiquinquirá area. Moreover, Alto Chicamocha region showed the biggest rainfall reduction registered in 1992, which matches with an El Niño event. In terms of excess

water, 2011 perceived rainfall increases of more than 50% in those two regions, this behavior responded to La Niña event that year.

Keys words: Water resources, agrometeorology, climate, atmospheric fallout, seasonal variation, water balance, drought, livestock production.

Introducción

Como lo menciona Torres (2011) la ganadería es la actividad rural con mayor aporte a la economía del sector agropecuario del país y a su vez con mayor presencia en el espacio rural colombiano. En Colombia, los Valles de Ubaté y Chiquinquirá y Alto Chicamocha son importantes nichos de producción de leche ubicados en el altiplano Cundiboyacense (Corpoica, 2009).

Los sistemas productivos agropecuarios en este altiplano presentan una alta variabilidad frente a amenazas asociadas con la variabilidad climática intra e interanual, que según diversos estudios se ha intensificado en las últimas décadas (IPCC, 2014; CEPAL, 2015). La preocupación entre los productores es creciente y perciben una alta incertidumbre frente al comportamiento del clima (Corpoica, 2012). De acuerdo con Tapasco et. al. (2015) y tomando en cuenta los escenarios más probables de cambio climático (IPCC, 2014), en las próximas décadas se presentaría una notoria disminución en la producción de leche y carne, siendo más grande el efecto sobre la primera.

El evento La Niña 2010-2011 (CPC, 2017) afectó 63.4% del área del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y el 59% del área del Alto Chicamocha. El mayor impacto se presentó sobre las pasturas de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) (Corpoica, 2012), que constituyen 80% del recurso de alimentación ganadera en la región (Criollo et al., 2012).

Los impactos asociados con la variabilidad climática hacen evidente que el sistema ganadero es altamente vulnerable frente cambios climáticos. En este sentido, es necesario conocer las características de clima y evaluar la oferta hídrica integrando los ciclos interanuales como insumos para la selección y recomendación de alternativas de manejo que permitan disminuir el riesgo frente eventos climáticos extremos.

El objetivo del presente trabajo fue generar información climática de interés agropecuario presentando las condiciones de disponibilidad

hídrica en los Valles de Ubaté y Chiquinquirá y Alto Chicamocha que sea de utilidad en la planificación de actividades productivas, de investigación y de capacitación tendientes a reducir la vulnerabilidad de los sistemas ganaderos de la región frente a la variabilidad climática.

Manuscrito aceptado/ Accepted manuscript

Materiales y métodos

Área de estudio

El Valle de Ubaté y Chiquinquirá se encuentra ubicado entre los 5° 03' y los 5° 54' N y 73° 21' y los 72° 30' O, con un área aproximada de 218,600 ha y comprende los municipios de: Tausa, Sutatausa, Carmen de Carupa, Cucunubá, Ubaté, Lenguazaque, Guachetá, Fúquene, Susa, Guasca, Villapinzón y Simijaca en Cundinamarca y San Miguel de Sema, Saboya, Caldas, Ráquira y Chiquinquirá en Boyacá.

El Valle del Alto Chicamocha tiene una extensión aproximada de 363,900 ha entre 4° 33' y los 5° 8' N y los 73° 35' O, comprende los municipios de: Samacá, Cucaita, Tunja, Sáchica, Chiquiza, Motavita, Combita, Oicatá, Sotaquirá, Tuta, Toca, Pesca, Tota, Cuitiva, Duitama, Firavitoba, Iza, Nobsa, Paipa, Santa Rosa de Viterbo, Sogamoso, Tibasosa, Corrales, Busbanzá, Floresta, Cerinza, Belén y Tutazá (Corpoica, 2009) (Figura 1.).

Información de clima

Se utilizó el catálogo oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2013) para identificar y seleccionar las estaciones climáticas ubicadas en el área de estudio. De acuerdo con los lineamientos de la Guía de prácticas climatológicas de la OMM (OMM, 2017), a partir de 1980 se trabajó con series históricas de 30 años de variables climáticas de impacto agropecuario, entre ellas: precipitación, temperatura del aire (temperatura máxima media, temperatura mínima media y temperatura media), humedad relativa y brillo solar.

Se seleccionaron series de tiempo con máximo 30% de datos faltantes para las diferentes variables. Sin embargo, siendo la temperatura una variable importante en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), y debido a la limitada disponibilidad de estaciones con registros de esta variable, se aceptaron series de tiempo con 40% de datos faltantes.

El control de calidad de series climáticas fue realizado por el grupo de Agroclimatología de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria en un protocolo consensuado con el IDEAM que incluyó

procesos de complementación de datos faltantes, tomando como referente a Vicent-Serrano et. al. (2010), donde a través de planos de correlación-distancia (Guijarro, 2014) se agruparon las estaciones con comportamientos similares y en cada grupo se aplicó el test de Alexandersson (1986) para detectar heterogeneidades en las series, finalmente las series con heterogeneidades fueron rechazadas. Los datos faltantes se generaron utilizando el método de proporciones citado por Guijarro (2011) a partir de la interpolación espacial de las variables registradas en estaciones vecinas y teniendo en cuenta la distancia entre ellas. La validación del proceso de calidad se realizó mediante el test de McCuen (McCuen, 1998) que compara las diferencias entre las medidas mensuales en las series de datos generados respecto a las originales.

Análisis de clima

Los diferentes análisis fueron realizados con el objetivo de identificar y caracterizar valores extremos y comportamientos normales de clima en series de 30 años para cada variable, de acuerdo con los lineamientos de la OMM (2017) para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y la región del Alto Chicamocha. Así mismo se generaron gráficos y mapas para visualizar la distribución espacial y temporal de los fenómenos presentados y de esta forma argumentar el comportamiento climático local para la zona de estudio.

Precipitación. Se analizó la distribución espacial de los promedios anuales, el análisis del comportamiento intra-anual promedio por periodos agrícolas (trimestres) y la variación inter-anual (identificación de los años con valores climáticos extremos) para cada región. Adicionalmente se calcularon los porcentajes anuales de aumento y disminución de lluvias (anomalías anuales) para el período 1980 - 2011 (multianual) para identificar y caracterizar los valores extremos.

Para analizar alteraciones climáticas asociadas con eventos ENSO, se categorizaron las series de tiempo de cada variable como eventos El Niño y La Niña (CPC, 2017). Para cada evento se calcularon los promedios mensuales y se hicieron comparaciones entre sí para identificar la intensidad y duración media de las alteraciones.

Temperatura, humedad relativa y brillo solar. Se realizó un análisis general del comportamiento modal de estas variables climáticas identificando áreas con características particulares. La información de estas variables climáticas sirvieron como insumo para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) a través de la metodología FAO Penman Monteith (Allen et al., 2006).

Balance hidroclimático. Para el cálculo de la ET_o se aplicó la metodología FAO Penman Monteith (Allen et al., 2006) y se utilizaron las series de datos climáticos de temperatura de aire, humedad relativa y brillo solar; los datos de viento se tomaron de la información nacional de esta variable (IDEAM, 2006).

Con la diferencia en volumen entre precipitación y ET_o se identificaron áreas donde se presentan condiciones de excesos o deficiencias hídricas por región. Los valores positivos indicaron condiciones de excesos y valores negativos condiciones de deficiencia.

Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI). A partir de códigos diseñados en lenguaje R, integrando variables de clima y de suelos (IGAC, 2000; IGAC, 2005) se calculó el PSDI a escala mensual en la serie de 30 años para cada estación climática. Posteriormente, para cada estación se realizó el conteo del número de meses con condiciones de sequía y con condiciones de humedad, comparando con el número de meses con condiciones cercanas a lo normal (Palmer, 1965). Las salidas se representaron cartográficamente a través de interpolaciones espaciales (Shepard, 1968) que permiten identificar áreas con alta, media o baja frecuencia de eventos de sequía y/o humedad en el suelo a escala mensual.

Resultados

Consolidación de la información climática

Una vez terminado el análisis de calidad de la información, se encontraron 82 estaciones con registros climáticos ubicadas en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y 108 en la región del Alto Chicamocha (Tabla 1 y Figura 1).

Tabla 1. Número de estaciones IDEAM según categoría, por regiones en el estudio. Colombia.

Categoría de estación	Indicador	Valle de Ubaté y	
		Chiquinquirá	Alto Chicamocha
Climatológica Ordinaria	CO	13	12
Climatológica principal	CP	7	8
Meteorológica Especial	ME	2	1
Pluviográfica	PG	19	18
Pluviométrica	PM	42	66
Agrometeorológica	AM	1	3
Total		82	108

El número de series dependió de la variable climática, fue así como algunas estaciones no registraron información de todas las variables, por tanto, se encontró que la variable precipitación contaba con 82 series en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá, mientras que en la región del Alto Chicamocha se identificaron 108 series de la variable. A diferencia de lo que ocurre con las variables de temperatura, donde el número disminuyó incluso a 8 series en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá (Tabla 2).

Tabla 2. Número de series por variable climática, por regiones en el estudio. Colombia.

Variable	Valle de Ubaté y	
	Chiquinquirá	Alto Chicamocha
Precipitación (PPT)	82	108
Temperatura media (Tmed)	8	11
Temperatura máxima media (Tmáx)	6	10
Temperatura Mínima media (Tmin)	8	9
Humedad Relativa (HR)	8	18
Brillo Solar (BS)	6	12
Total	118	168

La región del Alto Chicamocha cuenta con 50 series de precipitación más que el Valle de Ubaté, sin embargo, dada su mayor extensión (145,333 ha más que el Valle de Ubaté y Chiquinquirá) debería

contar con un mayor número de series de tiempo para cumplir las recomendaciones de la OMM (2017) (Figura 2A.)

Distribución espacial de los promedios anuales de precipitación

Al realizar el análisis global de la precipitación en el área de estudio, se identificaron tres patrones de comportamiento de lluvias, los cuales se designaron como conglomerado 1, 2 y 3, respectivamente (Figura 2B.).

El conglomerado 1 (color azul) agrupa 16 estaciones del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y 18 del Alto Chicamocha, de las cuales 7 y 10, respectivamente, se ubican en el departamento de Santander. Estas estaciones presentan los mayores valores de precipitación con un promedio en el período 1980 - 2011 de 2212 mm/año con una distribución bimodal (Figura 2B.).

El conglomerado 2 (color rojo) agrupa 17 estaciones del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y 18 del Alto Chicamocha, con un promedio anual de lluvias de 927 mm/año y 1619 mm/año, respectivamente, (Figura 2B). Debido a la influencia de los patrones de lluvia del piedemonte llanero, las estaciones en este conglomerado presentan distribución monomodal (Corpoica, 2012).

El conglomerado 3 (color verde) agrupa 50 estaciones del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y 73 del Alto Chicamocha con precipitación promedio de 947 mm/año y 944 mm/año, respectivamente. En esta zona se presenta la menor precipitación promedio anual en la región del Alto Chicamocha (Figura 2B.). El conglomerado 3 comprende la mayor área en estudio, por lo que los análisis del comportamiento de la precipitación se concentraron en él.

Distribución intra-anual de precipitación por períodos agrícolas.

Según la distribución de las lluvias, se identificaron: una temporada seca (diciembre, enero y febrero, trimestre DEF), una de lluvias en el primer semestre (marzo, abril y mayo —MAM), y un período de transición entre las temporadas de lluvia (junio, julio y agosto —JJA) y la temporada de lluvias del segundo semestre (septiembre, octubre y noviembre, trimestre —SON). Las lluvias del trimestre DEF representaron 15% de la

precipitación anual, mientras que los trimestres lluviosos (MAM y SON) comprendieron, aproximadamente, 32% cada una (Figura 2B).

No existieron grandes diferencias en los volúmenes trimestrales de precipitación entre ambas regiones (máximo 10 mm). En las temporadas secas se observaron menores valores de lluvias en la región del Alto Chicamocha, así como mayores valores de lluvia acumulada durante las temporadas húmedas (Figura 2B). Esto indica que, en promedio, se presentan mayores fluctuaciones en la precipitación a través del año en el Alto Chicamocha que en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá.

La diferencia trimestral de lluvias permite afirmar que la disponibilidad hídrica es menor durante el trimestre DEF, periodo en que se presentan los mayores problemas relacionados con ataque de plagas asociadas con aumento de temperatura del aire durante del día (Corpoica, 2012).

Variación interanual de la precipitación. En las Figuras 3 y 4 se observan las anomalías encontradas a partir de los promedios anuales en cada región. Las máximas anomalías positivas (exceso de lluvia) se registraron en 2010 y 2011 y las negativas (deficiencia de lluvia) en 1992 y 1997, lo cual coincide con eventos La Niña (exceso) y El Niño (deficiencia) (CPC, 2017).

Comportamiento de la precipitación en años extremos (exceso y déficit)

En el Valle de Ubaté y Chiquinquirá se observan grandes diferencias en el volumen de precipitación respecto al promedio durante los trimestres MAM y SON con las mayores diferencias en abril (cerca de 200 mm) y octubre (cerca de 100 mm). En el trimestre JJA se observan menores diferencias, lo que supone una menor influencia de las fuentes de variabilidad climática durante este período en la región (Figura 5).

En el sur del valle se presentaron las mayores anomalías positivas, en el municipio de Cucunuba, donde se registró un aumento de 100% en la precipitación durante 2011. Los municipios Simijáca, Carmen de Carúpa, Ubaté, Sutatausa y Ráquira presentaron las mayores reducciones (entre 40% y 60%) durante 1997 (Figura 6).

En el municipio Lenguaque se presentaron aumentos entre 60% y 80% durante el evento La Niña 2011 y reducciones entre 0 y 20% durante el evento El Niño 1997 (Figura 6).

En el Alto Chicamocha se observaron diferencias considerables en los volúmenes de precipitación respecto al promedio, principalmente en abril y octubre (Figura 7). En los municipios de Samacá, Tunja, Motavita y Toca se duplicaron los promedios históricos durante el evento La Niña 2011; sin embargo, en algunas estaciones se registraron anomalías negativas, principalmente en Tutazá (Figura 8). En Samacá se presentaron aumentos entre 80% y 100% durante el evento La Niña de 2011 y reducciones entre 0 y 20% durante el evento El Niño de 1992 (Figura 8). En el evento El Niño 1992, en la región se presentaron reducciones entre 20% y 40% en la precipitación, mostrando un comportamiento más homogéneo que el observado en La Niña 2011 (Figura 8).

Precipitación en eventos El Niño y La Niña

Existe una relación entre la precipitación y los eventos climáticos La Niña y El Niño (Caicedo, 2007). En las Figura 9 y 10 se observan incrementos de la precipitación bajo eventos La Niña (anomalía positiva) y reducciones bajo eventos El Niño (anomalía negativa) por trimestre. En las dos regiones se evidencian mayores anomalías durante los trimestres secos (DEF y JJA) que durante los trimestres de lluvia (MAM y SON).

Temperatura del aire

Las estaciones ubicadas en el área del Valle de Ubaté y Chiquinquirá no registran o no cumplen los parámetros de calidad para la variable temperatura del aire, por tanto a partir de interpolaciones de información registrada en estaciones ubicadas alrededor del área de estudio (en un diámetro de 30 km) se encontró que la temperatura máxima media fluctúa entre 18 y 23°C con los mayores valores hacia el norte en límites con el departamento de Santander y valores entre 18 y 20°C en municipios como Cucunuba y Lenguaque. La temperatura mínima media varió entre 8 °C y 9 °C, con los menores valores hacia el sur del valle en los municipios Ubaté, Cucunuba, Sutatausa y Tausa.

En el Alto Chicamocha los menores valores se presentan hacia el nororiente en los municipios de Tutazá y Belén (entre 16 °C y 20 °C) y hacia el suroccidente en los municipios Tunja, Cucaita, Samacá y Motavita (entre 18 °C – 19 °C). La región del Alto Chicamocha es montañosa con pendientes que generan alta variabilidad de la temperatura del aire en función de la altitud sobre el nivel del mar (Corpoica, 2012). Los promedios anuales de temperatura mínima media de la región varían entre 6 °C y 12 °C, con los promedios más bajos hacia los municipios de Sogamoso, Tunja, Paipa y Samacá. La relación entre los promedios de temperatura mínima media y altitud es menos clara que la encontrada con la temperatura máxima, lo cual coincide con lo registrado por el IDEAM (2009), donde indica que esto puede ser debido a que el enfriamiento nocturno del aire está asociado con otros factores adicionales a la altitud, como son la dirección de los vientos, orientación de las pendientes y características de los suelos y coberturas.

En el trimestre DEF se presentaron las temperaturas máximas más altas (23 °C) y las temperaturas mínimas más bajas (8 °C) en ambas regiones, lo cual es favorable para especies vegetales que responden positivamente a estos cambios de temperatura, no obstante, es un factor de riesgo para las especies vegetales sensibles a fuertes cambios de temperatura durante el día (Snyder y Melo, 2010). La temperatura media del aire varió entre 13 °C y 15 °C en las dos regiones, siendo MAM el trimestre más cálido y JJA el más frío.

Humedad relativa

Los valores de la humedad relativa variaron entre 70% y 85% en ambas regiones. Los mayores valores en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá se observaron hacia el sur en los municipios Tausa y Cucunubá, sin embargo, estos valores son producto de interpolaciones a partir de estaciones cercanas, ya que la disponibilidad de información de humedad relativa es limitada en esta región. Se obtuvieron datos de la estación IDEAM del municipio de Fúquene: En esta estación los valores promedio de humedad relativa para el período 1980 - 2011 están en el orden de 78%, lo cual puede ser representativo para la zona central del valle.

En el Alto Chicamocha se logra un mejor ajuste debido a que se cuenta con información de siete estaciones ubicadas en el área. A partir de esta información se encuentra que los municipios con ambientes más húmedos (85%) son Tota, Cuitiva y la parte norte de los municipios de Duitama y Paipa. Por otro lado, Nobsa, Tutazá y la parte central y sur del municipio de Paipa, presentaron menores porcentajes de humedad relativa promedio en el período 1980 - 2011 (73%).

El análisis intra-anual muestra correspondencia con las temporadas secas y lluviosas modales en la zona, con los valores más altos de humedad relativa en el trimestre MAM (83%) y los más bajos en el trimestre DEF (79%).

Brillo Solar

En el Valle de Ubaté y Chiquinquirá se observa un acumulado anual promedio de 1847.7 horas de brillo solar. La mayor acumulación de horas de brillo solar coincide con la mayor acumulación en la temporada seca (DEF) y los menores valores en la temporada de altas precipitaciones (MAM). Tal como se observa en las Figuras 11 y 12, las variables humedad relativa y precipitación se encuentran directamente relacionadas, mientras que brillo solar y precipitación muestran un comportamiento inverso (Corpoica, 2012).

En la región del Alto Chicamocha se observa un comportamiento similar entre las variables mencionadas al encontrado en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá (Figura 12), sin embargo, el acumulado anual promedio es menor en 121 horas de brillo solar (1726.6 horas), lo que indica que esta región tiene mayor nubosidad y esto interviene con la entrada directa de rayos solares a la superficie terrestre.

Balance hidroclimático regional

En el Valle de Ubaté y Chiquinquirá la precipitación, promedio anual, fue de 1183 mm, mientras la ETo promedio fue de 1121 mm/año, lo que indica condiciones cercanas al equilibrio hídrico anual. Sin embargo, el promedio de precipitación en las estaciones del conglomerado 3 es de 947 mm/año frente a una ETo de 1122 mm/año; lo que indica que la deficiencia hídrica anual es de 175 mm.

En el municipio de Saboyá, en límites con el departamento de Santander, se evidencia un exceso hídrico de aproximadamente 100 mm por año; contrario a lo que se registra para el municipio de Cucunuba, el que presenta mayor déficit hídrico con cerca de 300 mm al año (Figura 13).

En el Alto Chicamocha el promedio de precipitación fue de 1259 mm/año, mientras que el promedio de ETo fue de 1103 mm/año. Lo anterior indica que a escala anual existe un excedente hídrico regional. No obstante, si se analizan sólo las estaciones del conglomerado 3, el promedio de precipitación fue de 944 mm/año frente a un promedio de ETo de 1148 mm/año, lo que indica deficiencias hídricas de aproximadamente 203 mm por año, siendo este valor mayor que lo presentado en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá.

Los municipios de Sogamoso, Tibasosa, Iza, Toca, Pesca, Oicata y Tunja presentaron el mayor déficit hídrico de la región. Por otro lado, las áreas que limitan con el departamento de Santander registraron excesos hídricos que alcanzan los 1000 mm al año (Figura 13).

Susceptibilidad a excesos y deficiencias hídricas (PSDI)

En la Figura 14 se observa la distribución espacial de la frecuencia con que la disponibilidad hídrica toma valores categorizados como eventos de deficiencia de humedad en el suelo según el índice PSDI (Palmer, 1965) en relación con la ocurrencia de condiciones normales.

En el Valle de Ubaté y Chiquinquirá el 28% del área muestra alta frecuencia a eventos de deficiencia hídrica, principalmente en los municipios Susa, Fúquene, San Miguel de Sema, Chiquinquirá y Saboyá (Figura 14). De manera general, esto significa que estos municipios son altamente susceptibles a la presencia de eventos de deficiencia hídrica a escala mensual.

En la región del Alto Chicamocha se observó alta frecuencia de ocurrencia de eventos de deficiencia hídrica en el 36% del área, principalmente en los municipios Motavita, Combita, Oicata, Tuta, Paipa, Sotaquirá, Tibasosa y hacia el norte, en los municipios Santa Rosa, Cerinza, Tutazá y Belén (Figura 14).

Ambas regiones son susceptibles a la ocurrencia de eventos de déficit hídrico en gran parte del área, ya que el 63% del área del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y el 78% en el Alto Chicamocha se encuentran en las categorías de frecuencia alta y media (Figura 14). El 58% del área del Valle de Ubaté y Chiquinquirá presenta alta y media frecuencia de ocurrencia de eventos de exceso, principalmente hacia el norte de la región (Figura 15).

Se observó que los municipios Saboyá y Chiquinquirá son altamente susceptibles tanto a frecuencia de ocurrencia de eventos de déficit como de exceso, lo cual indica que estos municipios son fuertemente afectados por eventos de variabilidad climática.

En el Alto Chicamocha 68% del área presenta frecuencias alta y media de ocurrencia de eventos de exceso hídrico (Figura 15). Se observa que las áreas con alta frecuencia de condiciones de excesos y deficiencias hídricas coinciden espacialmente. En estas áreas se encuentran los municipios: Sotaquirá, Tutazá, Belén y Cerinza ubicados al norte de la región.

Discusión

Teniendo en cuenta la importancia de la región como nicho central de la producción lechera especializada del país (Carulla y Ortega, 2016) y de acuerdo con las características climáticas encontradas en el presente estudio, es evidente el grado de vulnerabilidad al que está expuesto este renglón de la producción. Saboyá y Lenguezaque en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Sotaquirá, Paipa y Cerinza en el Valle del Alto Chicamocha, son altamente vulnerables tanto a condiciones de sequía como de exceso hídrico. Esta situación es debida en gran medida a la acumulación de fenómenos meteorológicos o climáticos que no necesariamente son considerados extremos (IPCC, 2012).

En la mayor parte del territorio estudiado se observan condiciones de deficiencia hídrica tomando como base las condiciones normales en series históricas de 30 años, esto ratifica el hecho informado por el IPCC (2012) respecto a que las sequías pueden intensificarse en algunas zonas

debido a la disminución de las precipitaciones y/o aumento de la evapotranspiración. En el caso del Valle de Ubaté y Chiquinquirá y del Alto Chicamocha esta situación se presenta principalmente por el aumento de la evapotranspiración, lo que coincide con resultados encontrados por Martínez et. al. (2017).

Las variaciones del clima en el altiplano cundiboyacense responden al movimiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y su interacción con los eventos ENSO (Narváez y León, 2001) e inciden tanto en la cantidad como en la calidad de la leche que se produce (Corpoica, 2012; Tapasco et. al., 2015); por tanto es necesario desarrollar estrategias de manejo de pasturas para amortiguar la vulnerabilidad del sistema ganadero, conociendo los riesgos asociados con las particularidades climáticas actuales. El presente estudio es una aproximación a las características del clima en los últimos 30 años en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y el Alto Chicamocha.

Conclusiones

Identificar y definir patrones de comportamiento de la precipitación por región puede facilitar la planeación de acciones de mitigación y adaptación frente a eventos de exceso o déficit hídrico a escala local.

Con los resultados alcanzados en este estudio es posible priorizar esfuerzos en cuanto a planes y programas que beneficien la adaptación de la región frente a eventos de variabilidad climática.

Es importante considerar que la variabilidad natural seguirá siendo un factor determinante en los fenómenos climáticos extremos en el futuro.

Referencias

- Alexandersson, H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. J. Climatol. Intern. J. Climat. Issue 6. p. 641-659.
- Allen, R.; Pereira, L.; Raes D.; y Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO riego y drenaje 56. URL: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- Caicedo, E. 2007. El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia. Reportes del emisor 92. p. 1-4. URL: <https://publicaciones.banrepcultural.org/index.php/emisor/article/view/7797/8177>

- Carulla, J. E; Ortega, E. 2015. Sistemas de producción lechera en Colombia: Retos y oportunidades. Arch. Latinoam. Prod. Anim. 24(2): 83-87. URL: https://www.researchgate.net/publication/317017699_Sistemas_de_produccion_lechera_en_Colombia_Retos_y_oportunidades
- CEPAL. 2015. Estudio económico de América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- Corpoica. 2009. Caracterización de los sistemas de producción de leche del trópico de altura de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Bogotá: Informe técnico final.
- Corpoica. 2012. Zonificación del impacto de la oscilación ENOS sobre las condiciones climáticas del Altiplano Cundiboyasense como base para orientar la generación y transferencia de tecnología agropecuaria y reducir la vulnerabilidad climática. Bogotá: Informe técnico final.
- CPC. 2017. ENSO: Recent Evolution, Current status and predictions. Noviembre 13, 2017, de NOAA, USA. URL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/enso_years.shtml.
- Criollo, P.; Obando, M.; Sánchez, L.; y Bonilla, R. 2012. Efecto de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) asociadas a *Pennisetum clandestinum* en el altiplano Cundiboyacense. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 13-2, pp. 189-195. URL: <http://revista.corpoica.org.co/index.php/revista/article/view/254>
- DANE. 2017. Boletín Técnico comunicación informativa. Agosto 22, 2017. de Bogotá. URL: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol_ISE_jun2017.pdf
- García, M.; Piñeros, A.; Bernal, F.; Ardila, E. 2012. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. pp. 60-64. Sitio web: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a12.pdf>
- Guijarro, J.A. 2014. User's guide to climatol. State Meteorological Agency AEMET), Balearic Islands Office. Spain.
- IDEAM. 2006. Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: Republica de Colombia, Ministerios de minas y energía. URL: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=1399>
- IDEAM. 2013. Catálogo Nacional de estaciones. Bogotá. URL: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data>
- IGAC. 2005. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá. Bogotá: Subdirección de Agrología. URL: ftp://Ftp.Ciat.Cgiar.Org/DAPA/Users/Apantoja/London/Colombia/Suelos/00_Shape/Suelos/Proyecto_DNP/Memorias_Suelos_Oficiales/Boyaca/94864-Suelos%20Tomo%20I.pdf
- IGAC. 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca. Bogotá: Subdirección de Agrología.
- IPCC. 2012. Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Cambridge. URL: https://wg1.ipcc.ch/srex/downloads/SREX_SPM_Spanish.pdf
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer eds.]. Geneva, Switzerland. pp. 151. URL: <http://ar5-syr.ipcc.ch/>
- McCuen, R. 1998. Hydrologic Analysis and Design. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall.
- Martínez, F.E.; Castillo, L.; Rojas, E.; Gómez D.; Aguilera, E. 2017. Identificación de áreas de riesgo agroclimático para el sistema de ganadería de leche en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Alto Chicamocha. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. Vol. 11, Núm 1pp. 170-183. URL:

- http://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/6159/pdf
- Narváez, G.; León, G. 2001. Caracterización y zonificación climática de la región andina. Meteorol. Colomb. 4: 121-126. Bogotá, D.C. Colombia. URL: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero04/04_13.pdf
- OMM. 2017. Guía de prácticas climatológicas. Septiembre 22, 2017. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_es.pdf
- Palmer, W. 1965. Meteorological Drought paper No. 45. Whashington, D.C: U.S. Department of commerce. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>
- Ramírez, L.; y García I. 2006. Renovación de pasturas degradadas de kikuyo Pennisetum Clandestinum, Hoehst, con labranza mínima en una región alto andina de Colombia. Acta Agronómica, 53-3, pp. 69-75. URL: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/101
- Shepard, D. 1968. A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. Proc. 23rd National Conference ACM. p. 517-524. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.154.6880&rep=rep1&type=pdf>
- Snyder R. y Melo, A. 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, pp. 73-98. URL: <http://www.fao.org/docrep/012/y7231s/y7231s.pdf>
- Tapasco, J.; Martínez, J.; Calderon, S.; Romero, G.; Ordóñez, D.; Alvarez, A.; Sánchez, L.; y Ludeña, C. 2015. Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Ganadero. Washington D.C: Banco Interamericano de Desarrollo. URL: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7186/Impactos_economicos_cambio_climatico_Colombia_Sector_Ganadero.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Torres, M. 2011. Dinámicas socio-espaciales por causa del fenómeno de la Niña en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá en el primer semestre de 2011. Perspectiva Geográfica, 16, pp. 83-102. URL: <http://revistas.uptc.edu.co/index.php/perspectiva/article/view/1751/1746>

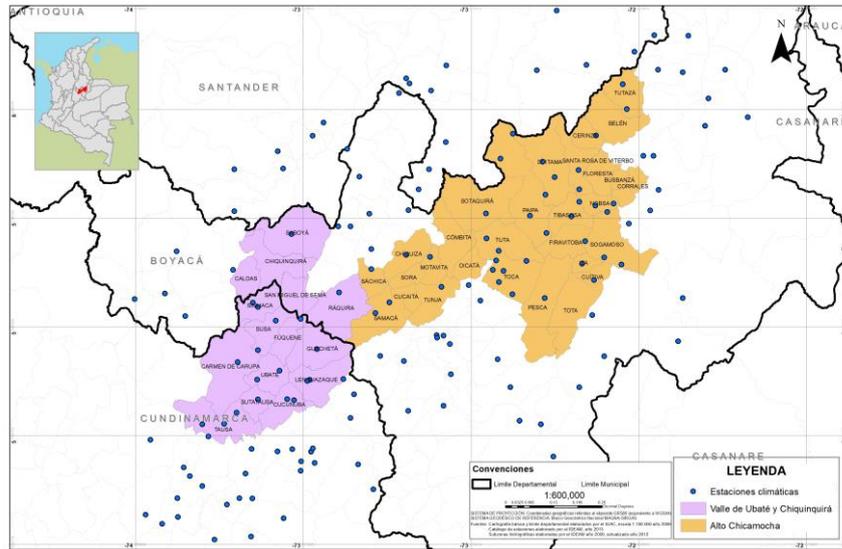


Figura 1. Localización de estaciones meteorológicas en el área de estudio. Colombia.

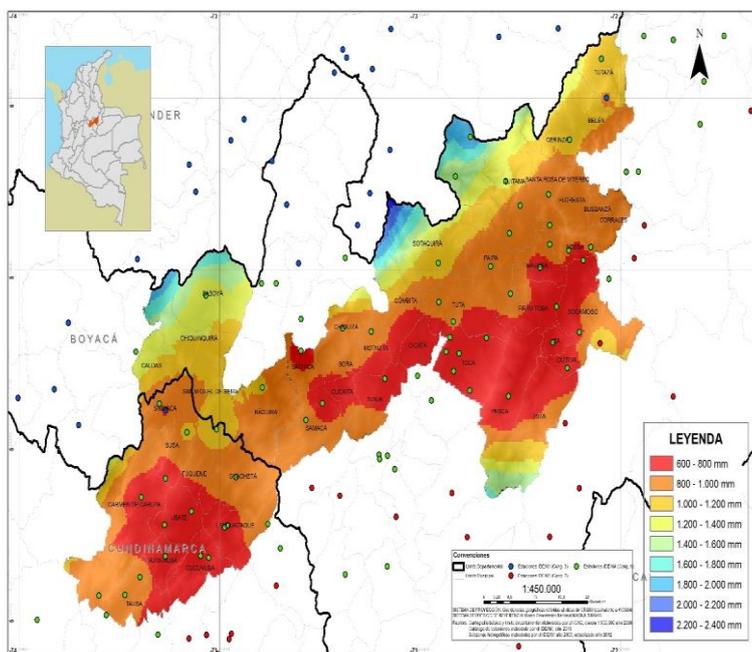


Figura 2A. Precipitación promedio período 1980-2011, según recomendaciones de la OMM (2017) en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y en el Alto Chicamocha, Colombia.

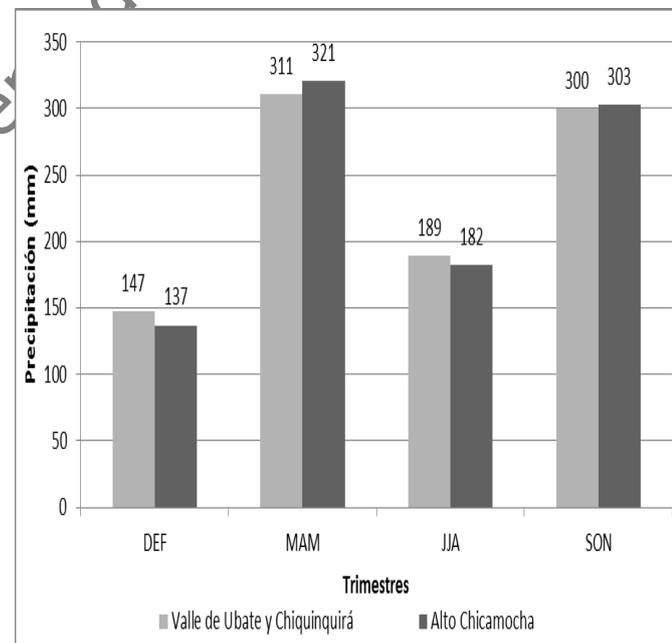


Figura 2B. Precipitación promedio por trimestre agrícola en las estaciones conglomerado 3. Colombia.

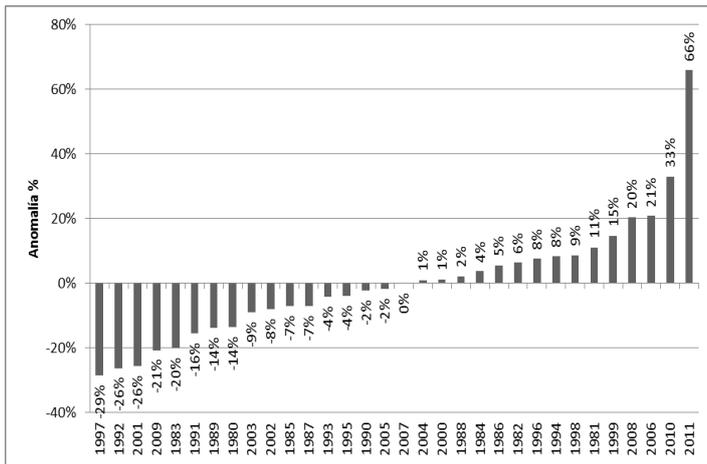


Figura 3. Anomalia porcentual anual en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá. Colombia.

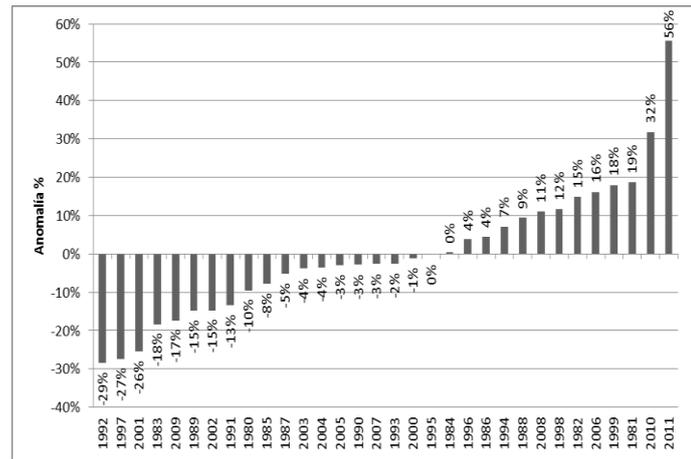


Figura 4. Anomalia porcentual en el Alto Chicamocha. Colombia.

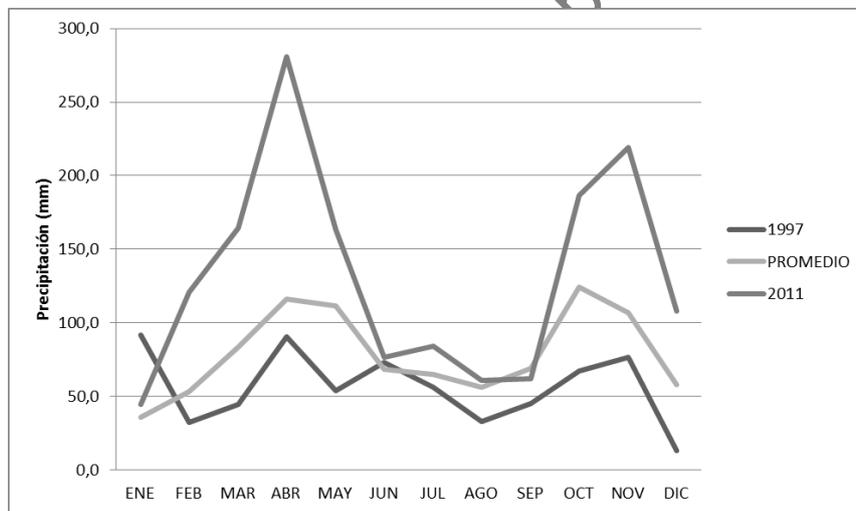


Figura 5. Precipitación mensual en los años extremos 1997 y 2011 y promedio para el período 1980-2011 en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá. Colombia.

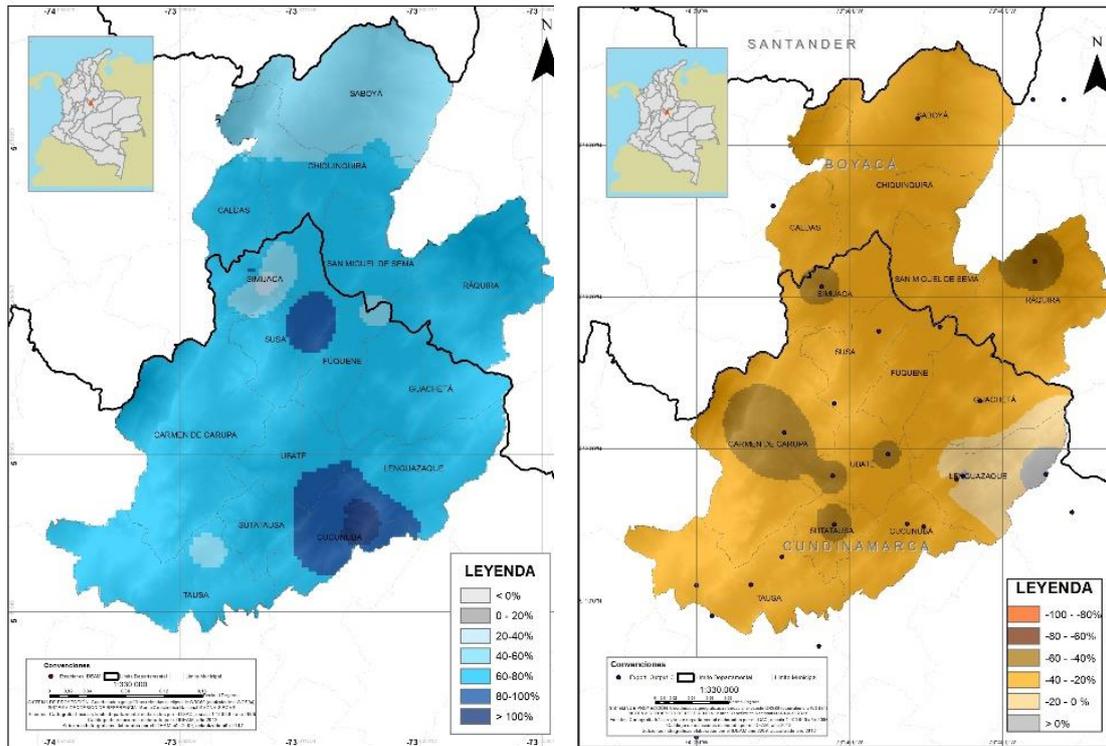


Figura 6. Anomalías porcentuales de precipitación en 2011 (izq.) y 1997 (der.) en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá. Colombia.

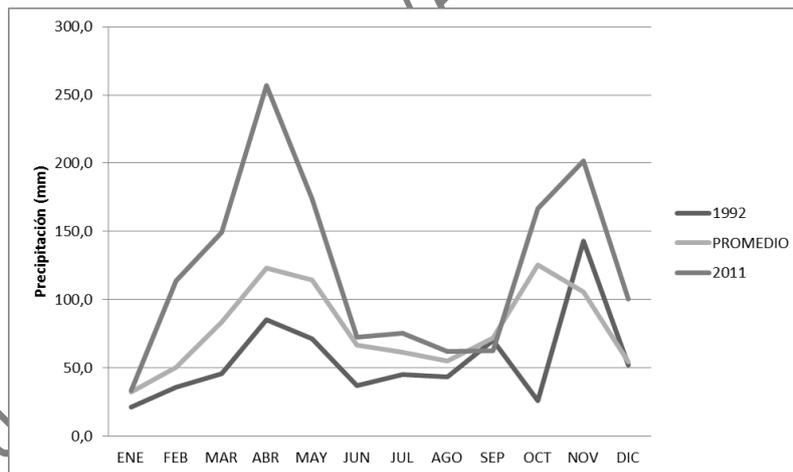


Figura 7. Precipitación mensual durante los años extremos 1992-2011 y promedio para el período 1980-2011 en la región del Alto Chicamocha. Colombia.

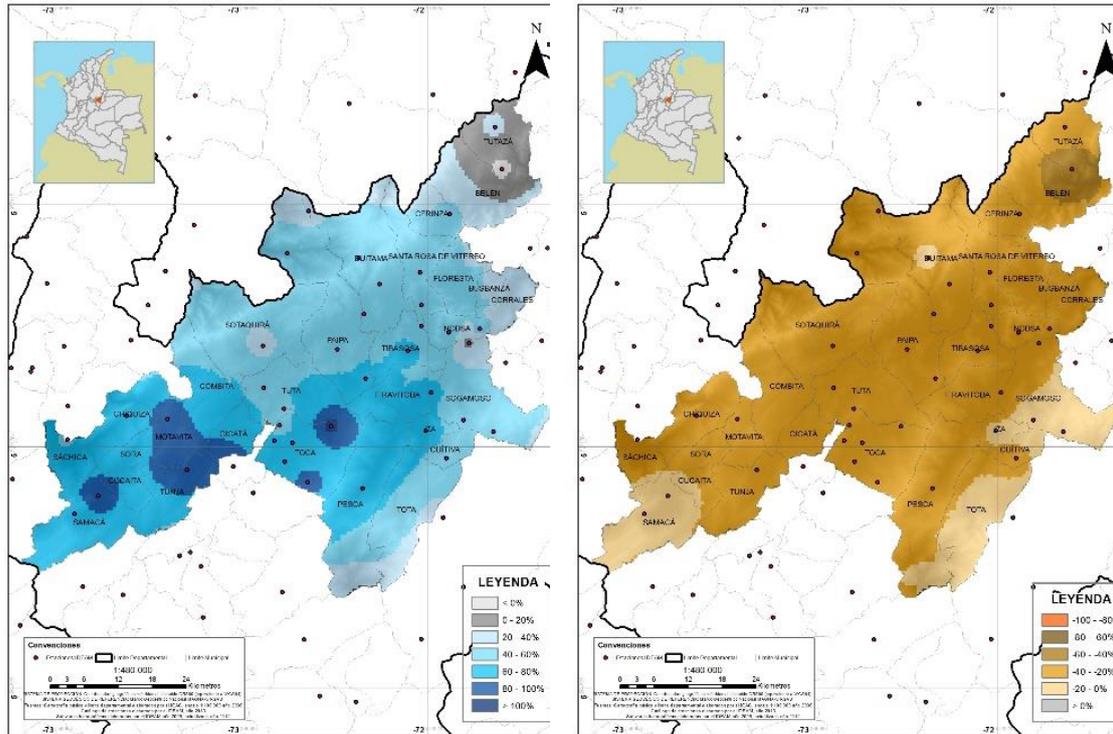


Figura 8. Anomalías porcentuales de precipitación en 2011 (izq.) y 1992 (der.) en el Alto Chicamocha, Colombia.

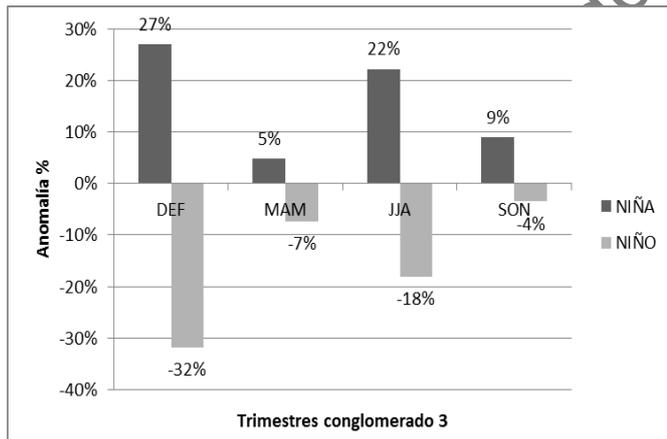


Figura 9. Anomalías de precipitación trimestral en el conglomerado 3 durante eventos El Niño y La Niña en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá, Colombia.

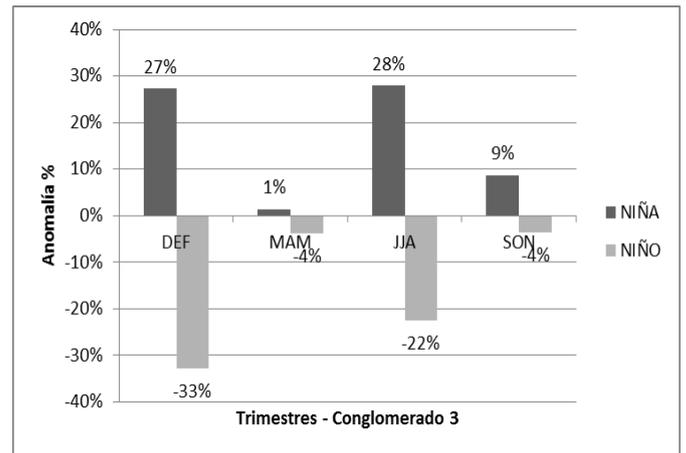


Figura 10. Anomalías de precipitación trimestral en el conglomerado 3 durante eventos El Niño y La Niña en el Alto Chicamocha, Colombia.

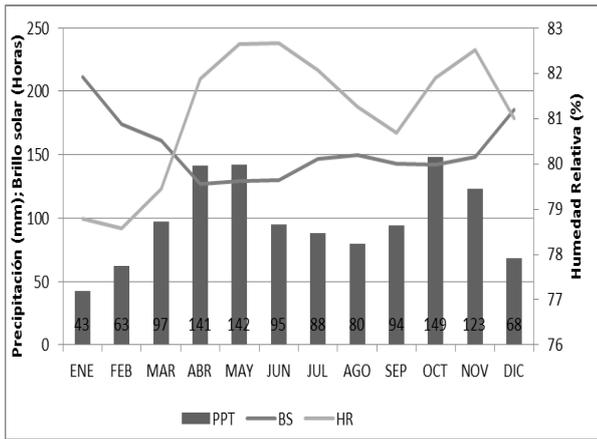


Figura 11. Comportamiento promedio intra-anual de las variables humedad relativa y brillo solar respecto a la precipitación en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá. Colombia.

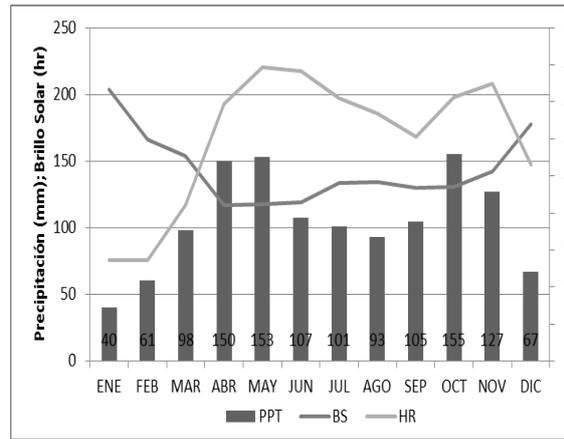


Figura 12. Comportamiento promedio intra-anual de las variables humedad relativa y brillo solar respecto a la precipitación en el Alto Chicamocha.

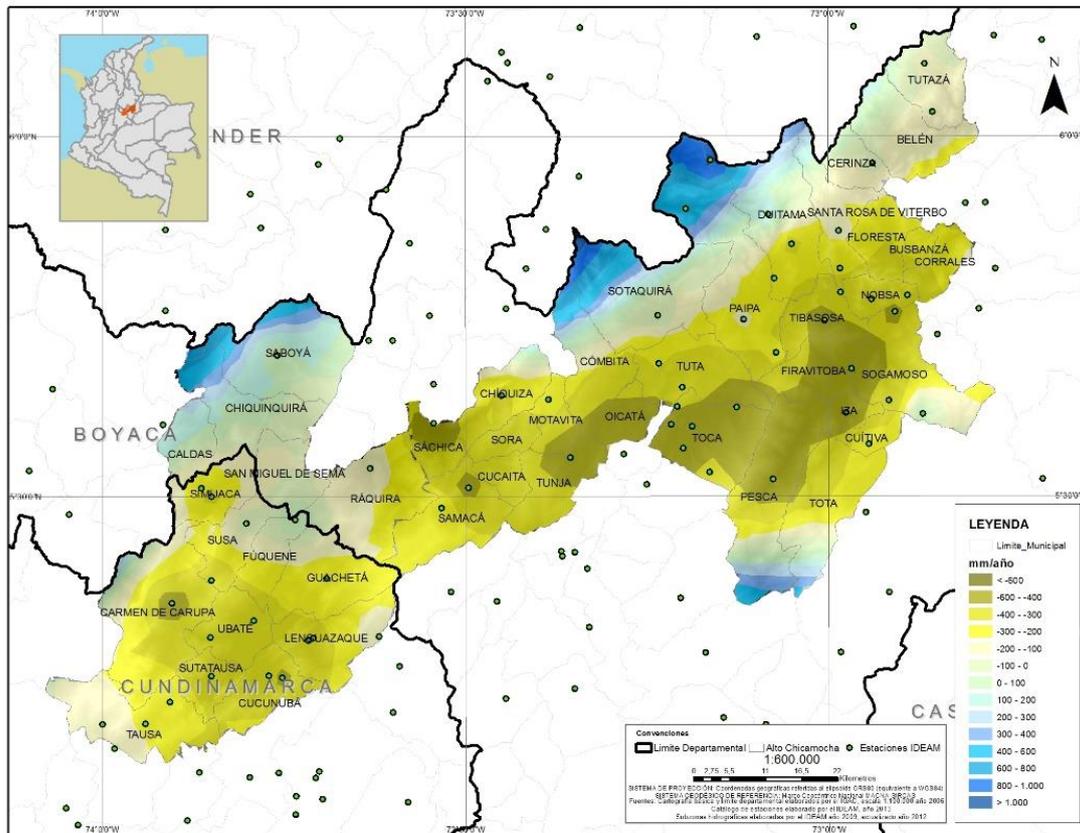


Figura 13. Balance hidroclimático regional en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y en el Alto Chicamocha. Colombia.

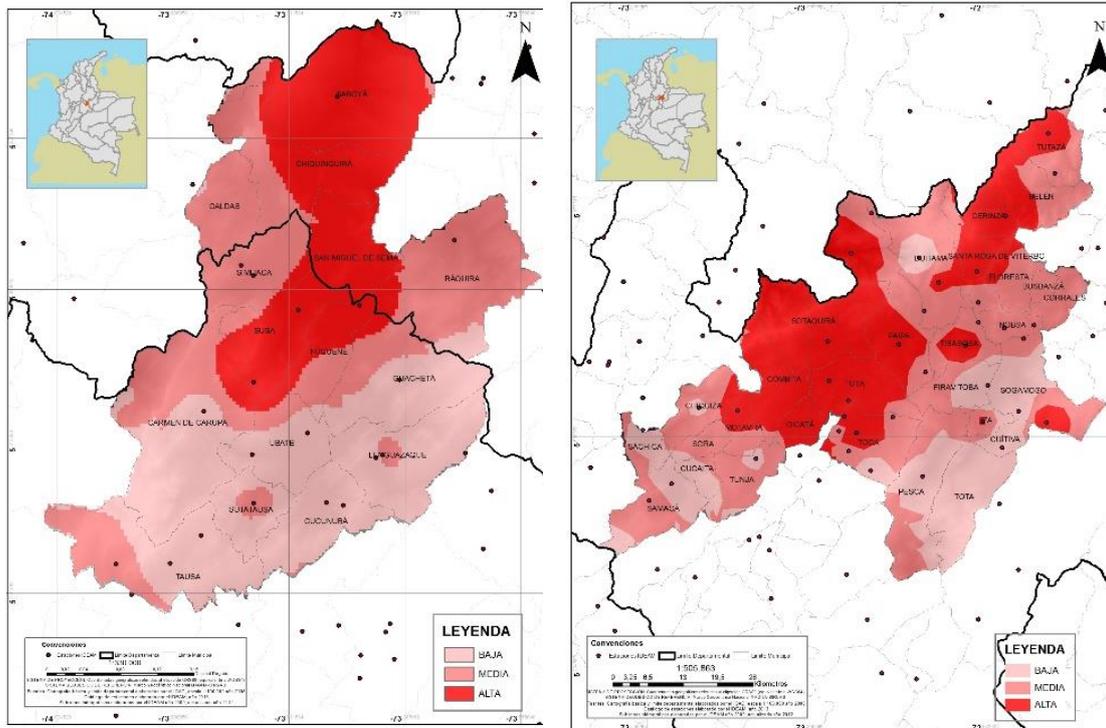


Figura 141. Frecuencia de ocurrencia de eventos de deficiencias hídricas en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá (izquierda) y el Alto Chicamocha (derecha). Colombia.

Manuscrito aceptado/Aceptado

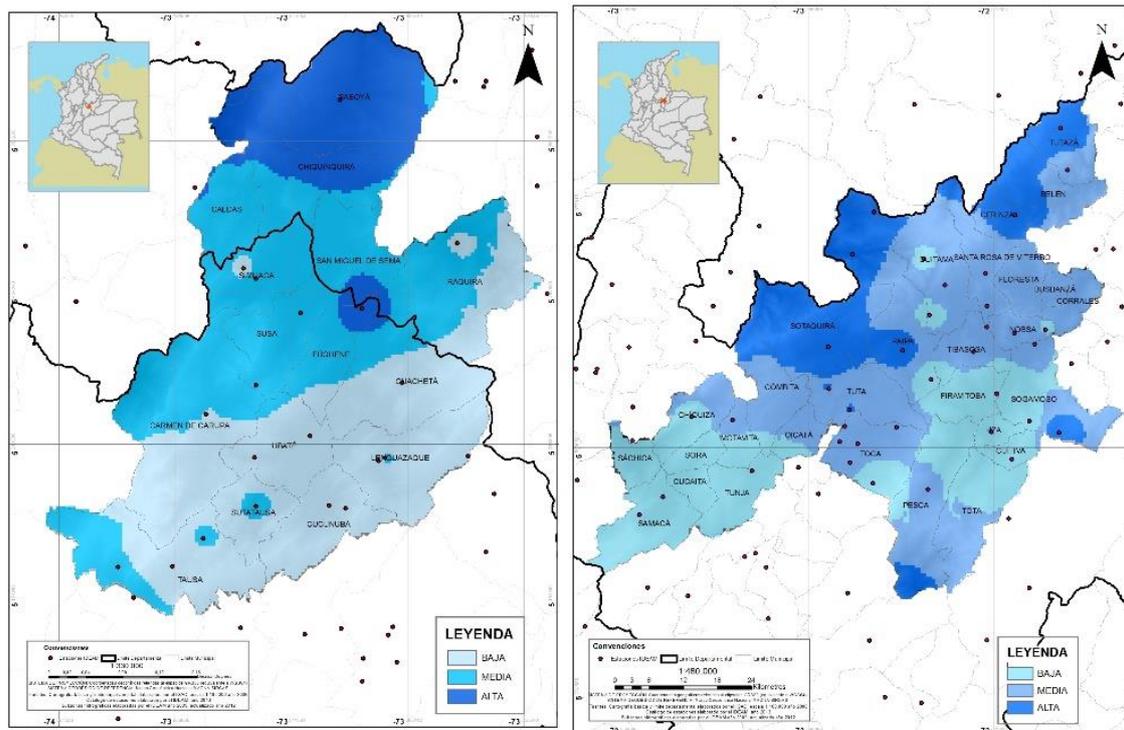


Figura 15. Frecuencia de ocurrencia de eventos de exceso hídrico para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá (izquierda) y el Alto Chicamocha (derecha). Colombia. Colombia.

Manuscrito aceptado/Aceptado