

Análisis computacional del comportamiento agroclimático en la producción de fríjol (*Phaseolus vulgaris*) cultivado en el municipio de Sibundoy, Putumayo

Computational analysis of agroclimatic behavior in the production of beans (*Phaseolus vulgaris*) generated in the Sibundoy city-Putumayo.

Brayan Alexis Parra-Orobio^{1,2}
María Camila Carrera-Venegas¹
Luisa Fernanda Villacres-Valencia¹

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.33.9728>

RESUMEN

La productividad de los cultivos está regida por complejas interacciones agroclimáticas. En ese sentido, el éxito productivo no sólo depende de la intensidad de los estímulos climáticos sino también de su secuencia temporal durante el ciclo de vida de los cultivos. Entre estos parámetros se encuentran la temperatura, la radiación solar y el agua en el suelo, que son los principales factores meteorológicos que regulan los procesos en las plantas. El objetivo de esta investigación consistió en determinar, a partir de un estudio agroclimático, los efectos de las variables climáticas (temperatura, precipitación y brillo solar) en el cultivo de fríjol (*Phaseolus vulgaris*) en el municipio de Sibundoy. La evaluación de las variables que inciden en este cultivo se hizo a partir del modelo de simulación Cropwat®. Se encontró que entre los años 2008 y 2011 no hubo cambios significativos en las variables evaluadas, en comparación con el 2014 en el que las condiciones climáticas empezaron a alterar de manera relativa estos cultivos, afectando su rendimiento y producción. Se puede concluir que existe una notable relación entre el clima y la productividad agrícola, debido al incremento de altas temperaturas, fuertes precipitaciones y la intermitencia de fenómenos climáticos; por tanto, los estudios agroclimáticos mediante las estimaciones de análisis computacional permiten inducir a la búsqueda de nuevas alternativas de adaptabilidad frente al cambio climático.

Palabras claves: agroclimático, brillo solar, Cropwat®, precipitación, temperatura.

ABSTRACT

Crop productivity is directed by complex agroclimatic interactions, in this aspect, productive success not only depends on the intensity of climatic stimuli but also on the temporal sequence of these during the crop life cycle, among them very important parameters interfere such as; the temperature, solar radiation and water in the soil, these are the three main meteorological factors that regulate the processes in plants. The objective of the research was to determine the effects of the climatic variables (temperature, precipitation and solar brightness) in the bean crop (*Phaseolus vulgaris*) of the city of Sibundoy, from an agroclimatic study. The evaluation of the variables that affects the bean crop was made from the Cropwat® simulation model. It was found that in 2008 and 2011 there were no significant changes in the evaluated variables, compared to 2014, where from then on the climatic conditions are affected in a relative way the bean crops, which means that their yield and production is being reduced. It can be concluded that there is a remarkable relationship between the climate and agricultural productivity, due to the increase in high temperatures, heavy rainfall and the intermittence of climatic phenomena; therefore, agroclimatic studies through computational analysis estimates allow inducing the search for the implementation of new adaptability alternatives in the face of climate change.

Keywords: Agroclimatic, Cropwat® simulation, Sunshine, Precipitation, Temperature.



Cómo citar este artículo: B. Parra-Orobio, M. Carrera-Venegas and L. Villacres-Valencia. "Análisis computacional del comportamiento agroclimático en la producción de fríjol (*Phaseolus vulgaris*) cultivado en el municipio de Sibundoy, Putumayo". *Ingeniare*, vol. 19, no. 33, pp. 13-27, Diciembre 2022.

¹ Docente catedrático del Instituto Tecnológico del Putumayo.

¹ Tecnóloga en Saneamiento Ambiental del Instituto Tecnológico del Putumayo. mariacarrera2020@itp.edu.co. ORCID: 0000-0002-5819-3250

¹ Tecnóloga en Saneamiento Ambiental del Instituto Tecnológico del Putumayo. luisavillacres2020@itp.edu.co. ORCID: 0000-0003-2730-2562

² Docente catedrático de la Universidad Popular del Cesar, seccional Aguachica. baparra@unicesar.edu.co. ORCID: 0000-0001-9256-6797

1. INTRODUCCIÓN

La prioridad en cuanto a la gestión del agua se ha enfocado en el abastecimiento humano, centrado en las grandes urbes. El crecimiento poblacional y los avances industriales, aunado a los efectos del cambio climático, acentúan el problema el acceso al agua en las ciudades [1]. En contraste, la agricultura se ha referenciado como causante de estrés hídrico para el abastecimiento en las grandes ciudades, ya que es uno de los sectores que más agua requiere (consume aproximadamente entre el 80 al 90% de este recurso) [2]. Frente a ello, la solución no es reducir el requerimiento de agua para uso agrícola, ya que suministra alimentos y materias primas, es necesario aumentar la eficiencia en el uso del agua para riego y, a su vez, su relación con el cambio climático.

El establecimiento de indicadores relacionados con el consumo de agua en las actividades agrícolas y su eficiencia es relevante para la planeación y el manejo de estas actividades en el mundo, especialmente en el marco del cambio climático [3]. Un parámetro habitual asociado con el requerimiento del recurso hídrico en cualquier actividad es su uso consuntivo, ya que después de su consumo no se encuentra disponible para otras actividades, ya sea por el proceso de evaporación o las pérdidas durante la producción, incluyendo también la evapotranspiración de cultivos y el recurso hídrico necesario para la constitución del tejido vegetal [2].

La economía del municipio de Sibundoy (Putumayo) se basa en la explotación agrícola, la cual está sustentada por la actividad tradicional o chagras que realizan los indígenas, centrada en la parte plana y baja del municipio. La actividad comercial la realizan los mestizos o colonos, especialmente en cultivos de frijol, tomate de árbol, manzana y pecuarios como el ganado para la obtención de leche [4]. En este municipio el frijol tiene bastante relevancia, muestra de ello son las cerca de 1.200 hectáreas destinadas para su cultivo, gracias a las condiciones climáticas del territorio como altura, temperatura y humedad, las cuales facilitan su producción. Un estudio de Corpoamazonia (2007) señala que aproximadamente 2.400 habitantes de la zona se dedicaban al cultivo del frijol, teniendo un impacto directo en 600 familias [5]. Esto muestra su aporte económico en la zona, considerando que Sibundoy tiene una población de 14.018 habitantes [6].

Los modelos de simulación ayudan a complementar la información experimental; además, a evaluar y estructurar prácticas de irrigación, productividad y fertilización. La implementación de los resultados obtenidos por modelos matemáticos requiere que durante su uso se consideren variables asociadas a las características del suelo, clima, cultivo y prácticas agrícolas existentes en la zona de estudio [7]. Con este objetivo, la capacidad del modelo Cropwat® para simular el crecimiento del cultivo y la dinámica del agua y nutrientes en el sistema suelo-planta-atmósfera se ha aplicado en diversos cultivos y escenarios climáticos. Autores como Arteaga et al. [8] afirman que la simulación es una herramienta muy útil en la planificación de áreas agrícolas, ya que ha permitido un importante avance sobre todo en la velocidad de los cálculos, el procesamiento de datos y en la obtención de resultados fidedignos. Así

las cosas, el modelo Cropwat® es un instrumento práctico para el manejo del agua relacionado con las necesidades del cultivo, de acuerdo con sus condiciones climáticas.

Las anomalías climáticas generan un impacto socioeconómico de grandes proporciones en los ámbitos local, regional y nacional, en el que la agricultura no es ajena, ya que depende del régimen de lluvias y las dinámicas de temperatura. Esto conduce a inundaciones y deslizamientos en terrenos cultivados, proliferación de plagas e incremento de enfermedades, además de la alteración en los ciclos vegetativos de los cultivos. También genera mayor estacionalidad de la producción, pérdidas en la cosecha y rendimiento de los cultivos, importación de insumos agrícolas y riesgo en la seguridad alimentaria, entre otros [4]. Por lo tanto, frente al cambio climático es perentorio estructurar estrategias de riego para diversas condiciones operativas y la simulación de abastecimiento de agua para un terreno con diferentes condiciones de clima, periodos de siembra y con varios planes de cultivo.

Por estas razones, este estudio tuvo como objetivo identificar el efecto del clima sobre el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en el municipio de Sibundoy, mediante un estudio agroclimático relacionado con el tiempo de producción agrícola y la magnitud, frecuencia y variabilidad de los parámetros climáticos relacionados con este cultivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización

La investigación se realizó en el municipio de Sibundoy, localizado al noroccidente del departamento del Putumayo, con coordenadas geográficas 1°12'12" latitud norte y 76° 51'15" longitud oeste. Limita al norte con el departamento de Nariño y el cerro de Juanoy (área limítrofe del cerro de Cascabel), al sur con el municipio de San Francisco (área limítrofe antiguo cauce del río Putumayo), al occidente con el municipio de Colón (área limítrofe por el río San Pedro) y al oriente con el municipio de San Francisco (área limítrofe con el río San Francisco). El municipio tiene una extensión de 90.828 km², que corresponden al 0,36% del departamento del Putumayo [9]. En el área de estudio se presentan temperaturas que oscilan entre 14 y 17 °C, con un promedio mensual anual de 15,98 °C.

2.2 Metodología

La metodología aplicada se basó en el modelo de simulación Cropwat®, referida por Surendran et al. [10], para lo cual se utilizaron intervalos diarios que permitieron simular el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) durante el periodo comprendido entre 2008 y 2014, teniendo en cuenta diferentes parámetros climáticos recolectados mediante información primaria suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y que se asocia a la estación meteorológica La Primavera

(76°55'57.7"W, 1°10'5.9"N) Los datos empleados corresponden a las variables de temperatura, precipitación, velocidad del viento y brillo solar.

Los datos climatológicos utilizados durante la implementación del modelo fueron los siguientes: a) información básica de la estación meteorológica (nombre de la zona, nombre de la estación, altitud, latitud y longitud) y b) datos climáticos mensuales (precipitación, temperatura máxima, mínima y media, humedad relativa, insolación –horas brillo sol– y velocidad del viento).

Respecto a los requerimientos de agua del cultivo y sus necesidades de riego, para el cálculo se necesitaron los siguientes aspectos: duración de la etapa de crecimiento, para lo cual se consideraron la inicial (INIT), desarrollo (DEVE), media (MID) y final (LATE), cuyos valores se obtuvieron de la Asociación de Agricultores y Cultivadores de Fríjol de Sibundoy (Asofris); el coeficiente de cultivo K_c a partir de los reportados por Escalante et al. [11]; la profundidad de raíces (D) y el factor de reducción de rendimiento K_y , de acuerdo con Doorenbos, Kassam [12], y las fechas de siembra del plan de cultivos brindado por Asofris. En cuanto a la programación del riego se requieren las características del suelo, para lo cual se consideraron aspectos como textura, humedad total empleada por el suelo, nivel de agotamiento de la humedad, agotamiento inicial de la humedad del suelo, humedad inicial del suelo y tasa máxima de infiltración de la precipitación en el suelo [8].

Las propiedades hidráulicas del suelo utilizadas por Cropwat® se estimaron considerando la información de campo sobre las fracciones de arcilla, arena y limo, así como el contenido de elementos gruesos y la densidad aparente. Por otra parte, se aplicaron las ecuaciones de pseudo-transferencia implementadas en Cropwat®, sustentadas en el estudio efectuado por Saxton et al. [13].

Finalmente, la evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó a partir del método de Penman-Monteith, que utiliza el modelo Cropwat®. Para determinar la precipitación efectiva (pe), el *software* muestra cuatro alternativas: 1) un porcentaje fijo de precipitación, 2) precipitación probable a una probabilidad 80% de excedencia, 3) métodos empíricos desarrollados localmente y 4) el método del servicio de conservación de suelo de la USDA (United States Department of Agriculture). En este estudio se empleó un porcentaje fijo de la precipitación total (0,8), considerando las recomendaciones de Arteaga et al. [8].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidos los datos del Ideam en la estación meteorológica La Primavera (Tablas 1, 2 y 3), se procedió a simular las variables evaluadas mediante el *software* Cropwat®: precipitación, brillo solar, humedad, evapotranspiración, requerimiento de riego, ADT (Agua disponible total) y AFA (agua fácilmente aprovechable).

Tabla 1. Datos obtenidos de valores mensuales de precipitación, 2008 - 2014

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)												
Valores totales mensuales de precipitación (mm)												
DEPARTAMENTO: PUTUMAYO			MUNICIPIO: SIBUNDOY			ESTACIÓN: LA PRIMAVERA						
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2008	92,9	157,2	99,9	140,6	182,3	246,7	226,8	104,8	126,7	166,4	73,7	106,6
2009	160,6	109,8	165,5	176,1	177,1	221,8	262,1	178,5	95,5	128	57	91,1
2010	33,4	132,6	195	240,4	101,9	179,5	135,7	119,6	120,3	119,7	86,1	46,8
2011	86,5	95	162,3	160,7	222,4	149,5	195	96,6	159,5	86,7	87,9	149,6
2012	142,2	144,3	275	149,9	159	175,4	242,9	122,4	70,9	85,9	85	85,4
2013	42,8	156,8	134,7	114,3	224,6	121,9	286,3	199	130	139,7	73	116,5
2014	96,8	70,8	119,8	95,3	107,5	202,8	30,2	41,1	22,1	25,7	42,1	40

Fuente: adaptado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Tabla 2. Datos obtenidos de valores mensuales de brillo solar (horas) 2008 - 2014

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)												
Valores totales mensuales de brillo solar (horas)												
DEPARTAMENTO: PUTUMAYO			MUNICIPIO: SIBUNDOY			ESTACIÓN: LA PRIMAVERA						
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2008	22	15,6	15	18,3	9,9	10,2	8,4	19,5	16,7	23,2	22	22,6
2009	24	20	19	15	11	17	13	22	21	20	15	19
2010	16,3	19,5	22,6	19,7	16,4	9,9	18,2	11,7	23,4	23,5	23,9	21,8
2011	24	9	15	8	10	8	14	10	17	17	12	12
2012	20	20	21,3	18	15	17	22	24	23	24	23	23
2013	19	12	12	11	14	15	17	20	19	22	23	23
2014	24	22	20	18	19	24	20	23	23	24	24	24

Fuente: adaptado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Tabla 3. Datos obtenidos de los valores medios mensuales de humedad relativa (%) 2008 - 2014

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)												
Valores medios mensuales de humedad relativa (%)												
DEPARTAMENTO: PUTUMAYO			MUNICIPIO: SIBUNDOY			ESTACIÓN: LA PRIMAVERA						
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2008	82	87	83	83	84	87	87	86	87	86	85	84
2009	87	87	87	86	86	87	88	87	84	85	82	85
2010	83	85	86	85	86	88	85	85	81	83	83	83
2011	81	84	80	85	85	88	88	85	87	80	81	84
2012	85	85	87	85	88	87	88	84	85	83	82	-
2013	85	88	86	85	87	88	87	87	84	84	81	-
2014	90	88	84	88	86	86	88	84	87	89	86	88

Fuente: adaptado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

3.1 Simulación computacional de los parámetros precipitación, brillo solar y humedad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante el estudio de simulación con el *software* Cropwat®, para un periodo de tiempo de siete años, en el cual se analizó el comportamiento agroclimático del cultivo de frijol. La Figura 1 representa la dinámica de los parámetros precipitación, humedad relativa y brillo solar para el año 2008, en el que se destaca que la precipitación osciló entre 84 y 180 mm para la mayoría de meses. Sin embargo, en junio y julio la precipitación aumentó hasta 200 mm, asociado a tiempos de fuertes lluvias. Este factor se debe considerar para establecer las mejores prácticas agrícolas durante la producción de frijol, ya que este producto es extremadamente sensible al estrés hídrico, que se refleja en las etapas fenológicas más sensibles de la planta [14].

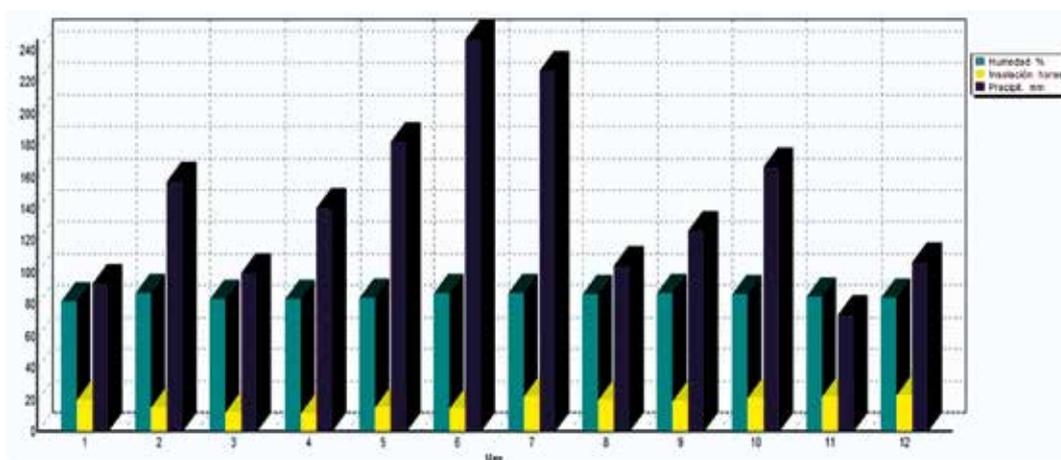


Figura 1. Simulación agroclimática de los parámetros precipitación, brillo solar y humedad en el año 2008.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

Respecto al brillo solar, este parámetro se mantiene constante con una insolación por hora de 20 °C, el cual es aceptable para las condiciones climáticas de esta zona. Por otra parte, se identifica que la humedad para ese mismo año, generalmente se encuentra en un 80%. Ahora bien, para el año 2011 ya se evidencian perturbaciones en las variables analizadas (Figura 2). Se observa incremento en la precipitación para marzo, abril, mayo y julio, teniendo un promedio de 170 mm e incrementando relativamente a 200 mm para mayo. En contraste, el brillo solar disminuye en estos meses y, por ende, se reduce el brillo solar, lo que a su vez se percibe en la humedad, que se mantiene en un promedio que oscila entre 80 y 90%, un factor muy efectivo para los rendimientos en el cultivo.

En el año 2014 (Figura 3) se resalta que la precipitación tiene un incremento de 200 mm en junio. A partir de este mes empieza a disminuir notablemente, conservando una precipitación que oscila entre

30 y 50 mm. No obstante, el brillo solar aumenta con una insolación por hora de 30 °C. Por su parte, la humedad aumenta favorablemente en un porcentaje de 100%, se mantiene estable y contribuye a que en el tiempo de intensidad solar y la saturación de agua en el aire sea potencialmente aprovechada por el cultivo y, por consiguiente, no se evidencien fenómenos de marchitez prolongados. Sin embargo, de acuerdo con González-Cueto et al. [15], un aumento en la humedad es poco favorable para el cultivo, porque para los primeros estados de desarrollo de la planta es conveniente mantener el suelo con baja humedad, debido a que su exceso puede ocasionar clorosis, además de impactar negativamente sobre la calidad de los frutos.

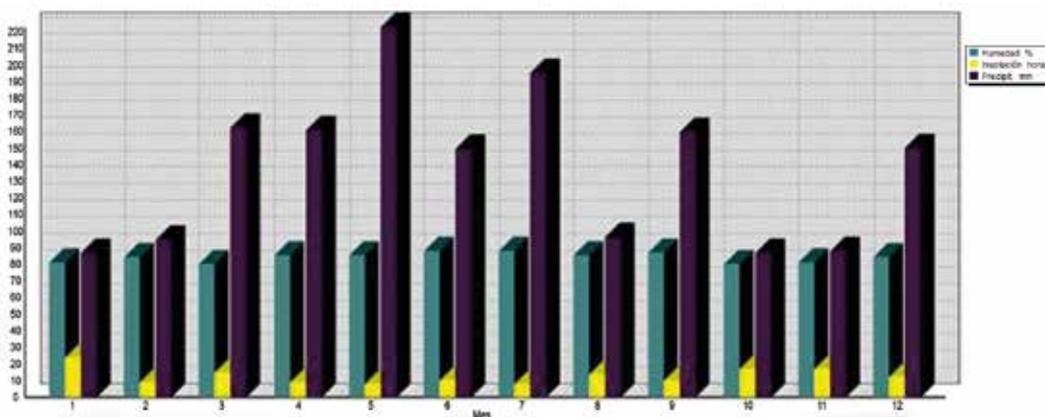


Figura 2. Simulación agroclimática de los parámetros precipitación, brillo solar y humedad en el año 2011.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

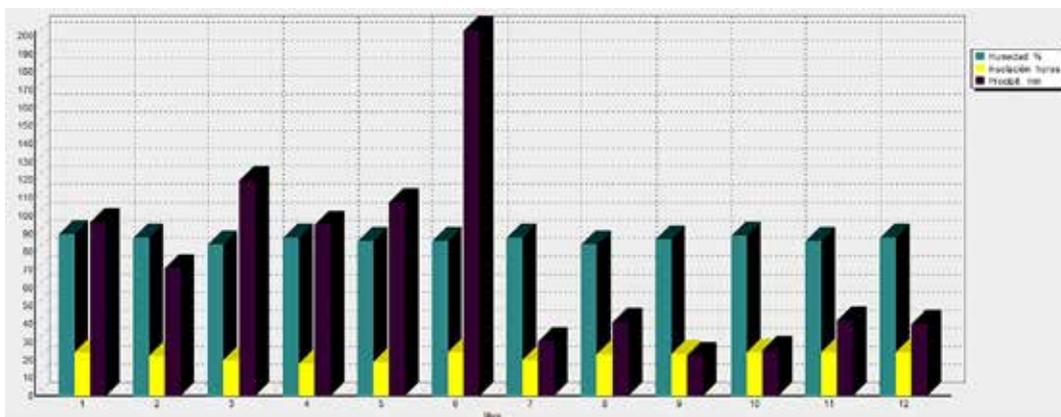


Figura 3. Simulación agroclimática de los parámetros precipitación, brillo solar y humedad en el año 2014.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

Considerando lo expuesto, la simulación permite identificar una notable variación de los parámetros agroclimáticos a partir del año 2014 en la zona de estudio. Teniendo en cuenta que el valle de Sibundoy se caracteriza por tener un clima inestable y tropical, estas alteraciones climáticas pueden afectar significativamente el desarrollo y la producción de frijol y otros cultivos estratégicos de la región. De acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [16], cultivos como el frijol pueden verse potencialmente afectados debido a la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, particularmente durante los periodos del fenómeno de El Niño y La Niña. Este tipo de anomalías, involucradas en el cambio climático a través de la variabilidad, ocasionan un impacto socioeconómico de grandes proporciones en el ámbito regional, en donde la agricultura depende del régimen de lluvias y el comportamiento de la temperatura, lo que genera inundaciones, proliferación de plagas, importación de productos agrícolas, entre otros.

Autores como Katungi et al. [17] argumentan que el clima es uno de los principales determinantes de la productividad agrícola, debido al aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que implica cambios en el clima y, en consecuencia, la adaptación de las actividades agrícolas. Este fenómeno no sólo requiere diferencias en el tipo y combinación o mezcla de cultivos, sino también un incremento en la inversión económica, más allá de las posibilidades de adaptación. De ahí que la agricultura sea el sector que posiblemente sufra los mayores efectos económicos ante el cambio climático. Ante esta situación, autores como Cleves et al. [18] resaltan que los efectos que se producen en los cambios en temperatura y precipitación tienen incidencia en el rendimiento de los cultivos. No obstante, también se identifica la necesidad de aplicar modelos agroclimáticos que provean información sobre las consecuencias del cambio climático sobre la agricultura, específicamente de cada cultivo (plagas o disminución en la productividad).

3.2 Simulación de los parámetros evapotranspiración y requerimiento de riego

En la Figura 4 se puede observar que para enero del 2008 las variables evapotranspiración y requerimiento de riego se encuentran en un rango de 0,0 a 1,0 mm, mientras que para febrero, marzo, abril, mayo, junio y la mitad de julio el cultivo se mantiene estable, puesto que las variables climáticas favorecen su desarrollo. Por otra parte, se observa que para agosto, septiembre y octubre la evapotranspiración aumenta considerablemente desde 6 hasta 20 mm. En cuanto al requerimiento de riego a comienzos de agosto, se presenta desde 2 hasta 5 mm. En los meses siguientes se mantienen estas dos variables, con valores inferiores a 1 mm. Se concluye, entonces, que para este año el cultivo presentó precipitaciones que garantizan su estabilidad.

Para el año 2011 (Figura 5) estas variables conservan una constancia en relación con el año 2008; sin embargo, se destaca que la evapotranspiración disminuye desde 15 a 4 mm en agosto, septiembre y octubre.

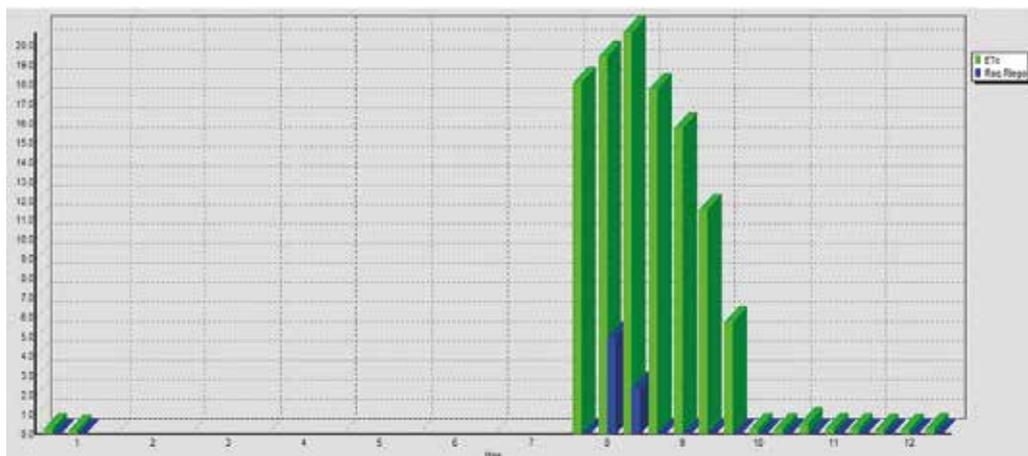


Figura 4. Simulación agroclimática de los parámetros evapotranspiración y requerimiento de riego año 2008.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

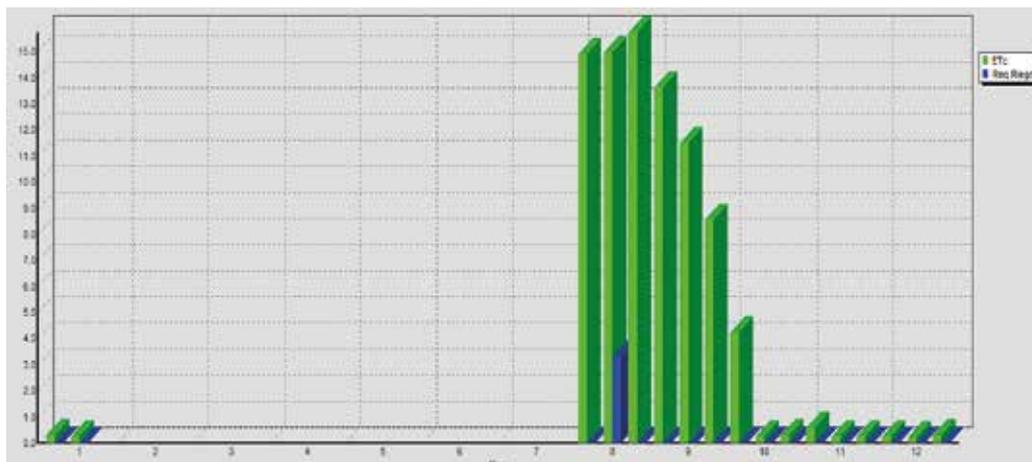


Figura 5. Simulación agroclimática de los parámetros evapotranspiración y requerimiento de riego año 2011.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

Por último, en el año 2014 se evidencia un cambio bastante significativo en las dos variables, ya que para finales de julio y septiembre la evapotranspiración no supera los 6 mm y alcanza un punto máximo de 22 mm. En los meses posteriores (octubre, noviembre y diciembre) esta variable se mantiene por debajo de 1 mm; no obstante, el requerimiento de riego aumenta entre julio y los primeros días de octubre, manteniéndose en un rango entre 5 y 18 mm (Figura 6).

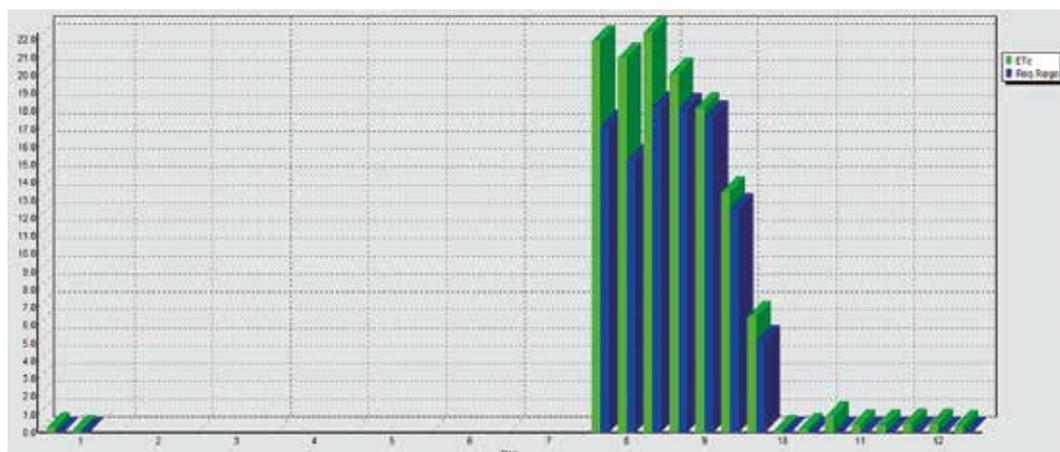


Figura 6. Simulación agroclimática de los parámetros evapotranspiración y requerimiento de riego año 2014.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

De acuerdo con lo descrito, se puede deducir una afectación puntual a la agricultura del municipio de Sibundoy, ya que las temporadas de intenso calor que se dan de manera aleatoria hacen que los diversos cultivos, en especial el de frijol, que es susceptible a la sequía durante el periodo de floración, sufran una significativa disminución de flores y vainas. Así mismo, cuando se prolonga la sequía puede causar retrasos en la floración y la madurez [19]. También se evidencia que el municipio es propenso a estrés en su balance hídrico, lo que puede ocasionar la erosión del suelo, bajo porcentaje de humedad y, por ende, afectación directa en la fase de desarrollo y producción de este cultivo. Lo anterior es acorde con lo que señalan estudios previos realizados en la zona por Cabrera & Díaz [20], Sarkar et al. [21] y Guerra et al. [4].

El clima incide directamente en los procesos fisiológicos del cultivo de frijol, cada fase está orientada por diferentes condiciones ambientales e influye de manera indirecta como detonador de estreses bióticos. Si bien en Colombia, igual que en otras partes del mundo, el riego se implementa para reducir el estrés hídrico, esto puede generar una presión sobre estos recursos y, por tanto, se suma al continuo deterioro del agua por contaminación, debido a su uso insostenible. Esta situación incrementa las condiciones de vulnerabilidad de la zona frente a cambios ambientales, como la variabilidad y el cambio climático [22].

Aunque la mitigación (reducción de emisiones de gases de invernadero) por sí sola no es suficiente para salvaguardar a las sociedades de los efectos de cambio del clima, la adaptación desempeña un papel fundamental, especialmente en el sector agrícola, ya que éste consume el 61% (7.640 millones de metros cúbicos) del volumen total de agua en el país [23]. Por lo tanto, se considera necesario mantener continua la actividad de riego, permitiendo de esta manera que la planta y su producción no lleguen a un punto de estrés hídrico, así como para que no sufra desgastes, tenga una mayor resistencia a enfermedades, permitiéndole mantener un alto porcentaje en su productividad.

3.3 Simulación de los parámetros ADT (agua disponible total) y AFA (agua fácilmente aprovechable)

En las Figuras 7 y 8 se presentan los resultados de la simulación de ADT y AFA, en las que se destaca un comportamiento similar en 2008 y 2011. Se encontró que la ADT osciló entre 30 y 45 mm agua en el suelo y AFA entre 65 y 90 mm, por lo cual esta humedad retenida en el suelo se ve fácilmente aprovechada para el riego del cultivo y su crecimiento.

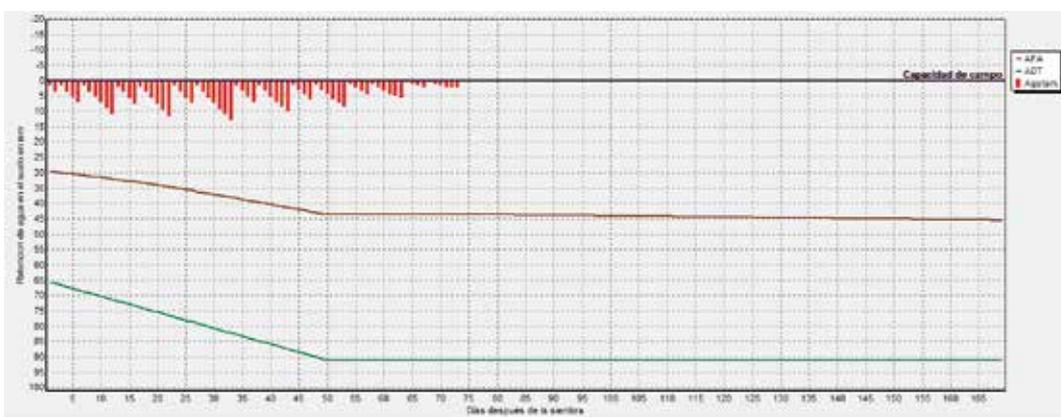


Figura 7. Simulación agroclimática de los parámetros AFA y ADT para el 2008.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

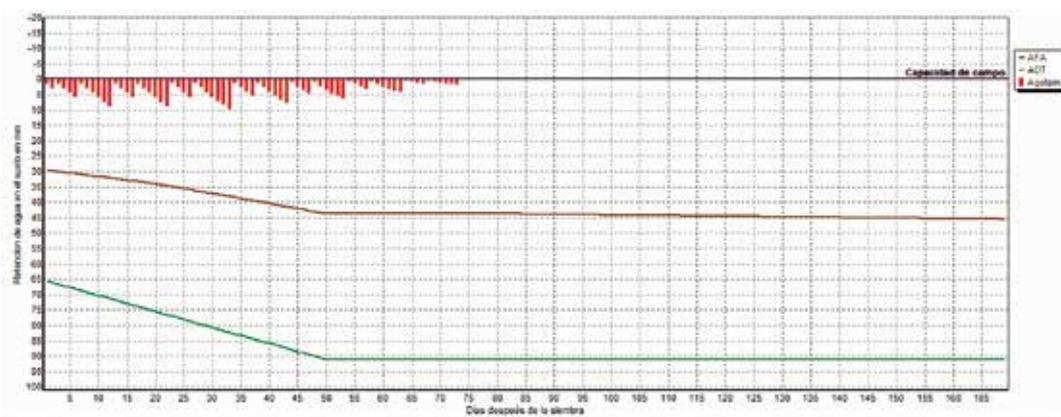


Figura 8. Simulación agroclimática de los parámetros AFA y ADT para 2011.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

A partir del 2014 se identifica una alta capacidad de campo, la cual oscila entre 5 y 30 mm, factor que se ve alterado por la variabilidad climática e incide sobre el cultivo, ya que el agua acumulada hace que

el suelo no tenga un buen drenaje, afectando principalmente la capacidad de asimilación de nutrientes por parte de la raíces y acusando inestabilidad en suelo (Figura 9). Lo anterior evidencia que, en efecto, se está presentando variabilidad climática en el valle de Sibundoy por la presencia de las altas precipitaciones y humedad que se mantienen en este tipo de climas y, por tanto, alteran la productividad del cultivo.

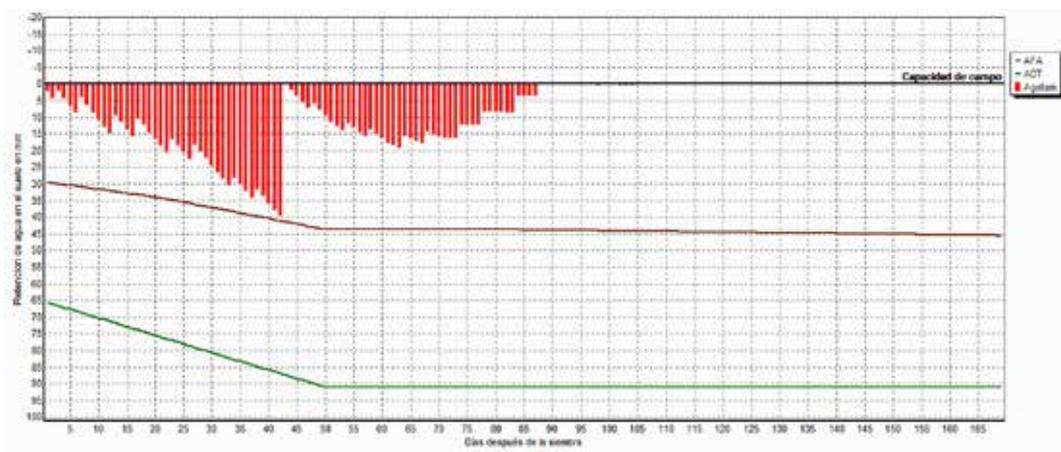


Figura 9. Simulación agroclimática de los parámetros AFA y ADT para 2014.

Fuente: adaptado por medio del programa de simulación Cropwat®.

Algunos autores como Morales-Santos et al. [24] señalan que las condiciones para el cultivo de fríjol identificadas en la simulación son potencialmente ideales, ya que se encontró pluviosidad entre 350 y 500 mm anuales, lo que representa una baja humedad relativa que permite minimizar el riesgo de enfermedades bacterianas y fúngicas. Por otro lado, otros autores como Guerra et al. [4] resaltan que el cultivo de fríjol requiere suelos profundos y fértiles, con buenas propiedades físicas, de textura franco limosa, aunque también tolera texturas franco arcillosas, con buen drenaje. Por tanto, las características físicas y químicas de los suelos en los que se cultiva el fríjol en Colombia son muy variables, lo que evidencia que este producto tiene la habilidad de adaptarse a diversas condiciones de suelo y topografía, considerando buenas prácticas agrícolas.

Aunado a lo anterior, se puede deducir que este cultivo presenta características satisfactorias en cuanto a rendimiento y desarrollo; sin embargo, mediante la simulación se pueden identificar problemas en el suelo a partir del 2014, ya que la capacidad de campo en el suelo está aumentando, lo que podría generar sobresaturación, excediendo el límite de agua, además del significativo nivel freático en la zona [4], lo que puede ocasionar efectos adversos en el crecimiento y desarrollo óptimo del cultivo de fríjol.

4. CONCLUSIONES

Se evidenció que a partir de la implementación del *software* Cropwat® el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) asentado en el municipio de Sibundoy es susceptible a la variación climática, especialmente lo relacionado con su crecimiento y productividad. En consecuencia, el uso de esta herramienta puede aportar a la estructuración de un manual de buenas prácticas agrícolas bajo el principio de adaptabilidad al cambio climático, considerando la importancia que tiene este cultivo para la economía local.

Es necesario continuar analizando factores importantes para la siembra, el crecimiento y el desarrollo del cultivo de frijol, como la capacidad de campo, ya que como se evidenció en la simulación es uno de los factores que posiblemente se está viendo más afectado por la variación climática en la zona de estudio, por lo que es pertinente evaluar su comportamiento e incidencia tanto en el cultivo abordado en este estudio como en otros de relevancia para la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. D. Chukalla , M .S. Krol, A. Y. Hoekstra, “Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching”, *Hydrol Earth Syst Sci*, vol 19, no 12, pp. 4877-4891, 2015. doi:10.5194/hess-19-4877-2015.
- [2] A. M. Peñaloza-Sánchez, A. Bustamante-González, S. Vargas-López, J. L. Jaramillo-Villanueva, A. Quevedo-Nolasco, “Water footprint of onion (*Allium cepa* L.) and husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crops in the region of Atlixco, Puebla, Mexico”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 11, no 5, pp.1-29, 2020. doi:10.24850/J-TYCA-2020-05-01.
- [3] A. Arifjanov, T. Apakhodjaeva, S. Akmalov, “Calculation of losses for transpiration in water reservoirs with using new computer technologies”. In: International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2019, 2019. doi:10.1109/ICISCT47635.2019.9011883.
- [4] A. A. S. Guerra, P. A. A. Mena, M. M. E. Burbano, M M. F. Burbano, P. L. M. Pardo, “Estudio del manejo, clasificación y recolección de fitosanitarios en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en Sibundoy, Putumayo (Colombia)”, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol 12, no (1), pp. 133-152, 2021.
- [5] Corpoamazonia. “Producción Limpia y buenas prácticas ambientales aplicadas al cultivo de frijol en el Valle de Sibundoy, Putumayo”. Mocoa, 2007.
- [6] DANE, “Censo Nacional de Población y Vivienda 2018”. Bogotá. Bogotá D.C,2020.
- [7] A. M. Toro-Trujillo, R.Arteaga-Ramírez, M.A. Vázquez-Peña, L.A. Ibáñez-Castillo LA, “Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7, no 6, pp.105-122, 2016.

- [8] R.R. Arteaga, M. V. Ángeles, P. M. A. Vázquez, "Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol 2, no 2, pp.179-195, 2011.
- [9] J. Castro, J. E. A. Martínez, "Formulación del Plan de Gestión Ambiental para el municipio de Sibundoy, Putumayo. Tomo I". Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, San Juan de Pasto, Colombia, 2008.
- [10] U. Surendran, C. M. Sushanth, E. J. Joseph, N. Al-Ansari, Z. M. Yaseen (2019) "FAO CROPWAT model-based irrigation requirements for coconut to improve crop and water productivity in Kerala, India", *Sustainability*, vol 11, no 18, pp. 5132.
- [11] E. J.A. Escalante, E. L. H. Escalante, G. M. T. Rodríguez, "Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades calor y radiación solar en clima cálido", *Terra Latinoamericana*, vol 19, no 4, pp. 309-315, 2001.
- [12] J. Doorenbos, A.H. Kassam. "Efectos del agua sobre el rendimiento en los cultivos. Estudios de riego y drenaje. FAO Boletín 33 Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia, p. 212, 1980.
- [13] K. E. Saxton, W. J. Rawls, J. S. Romberger, R. I Papendick "Estimating generalized soil-water characteristics from texture" *Soil Science Society of America Journal*, vol 50, no 4, pp. 1031-1036, 1986. doi:10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x.
- [14] J. Reyes-Matamoros, D. Martínez-Moreno, R. Rueda-Luna, T. Rodríguez-Ramírez "Efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero", *Revista Iberoamericana de Ciencias*, vol 1, no 2, pp. 191-203, 2014.
- [15] O. González-Cueto, B. Abreu-Ceballo, M. Herrera-Suárez, E. López-Bravo "Water Use for Bean Irrigation on Eutric Cambisol Soils", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol 26, pp. 71-77, 2017.
- [16] BID "Intervenciones y Tecnologías Ambientalmente Racionales (TAR) para la adaptación al cambio climático del sector agropecuario de América Latina y El Caribe", 2019.
- [17] E. Katungi, C. Larochelle, J. Mugabo, R. Buruchara, "Climbing bean as a solution to increase productivity in land-constrained environments: Evidence from Rwanda". *Outlook on Agriculture* vol 48, no 1, pp. 28-36, 2018. doi:10.1177/0030727018813698.
- [18] L. J. A. Cleves, C. J. Toro, B. L. F. Martínez BLF "Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica", *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol 10, no 1, pp.149-163, 2016.
- [19] C. Barrios-Pérez, P. Álvarez-Toro, "Caracterización agroambiental de sistemas de producción de maíz y frijol en Colombia", *CCAFS Working Paper no. 184*. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), 2016.
- [20] S. J. J. Cabrera, A. O. Díaz "Estudio de factibilidad para el montaje de una planta procesadora de residuos de cosecha de frijol para la elaboración de tableros aglomerados en el municipio de Sibundoy, Putumayo", tesis de pregrado, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, 2011.

- [21] M. Sarkar, S. Datta, S. Kundagrami, "Global climate change and mung bean production: A roadmap towards future sustainable agriculture", *Sustaining Future Food Security in Changing Environments*. Pp. 99-119, 2017.
- [22] A. Lozano-Povis, C. E. Álvarez-Montalván, N. Moggiano, "El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática", *Scientia Agropecuaria*, vol 12, pp.101-108, 2021.
- [23] C. W. Loaiza, T. A. Reyes, Y. E. Carvajal, "Aplicación del índice de sostenibilidad del recurso hídrico en la agricultura (ISRHA) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca Centella", *Ingeniería y Desarrollo*, vol 30, pp. 160-181, 2012.
- [24] M. E. Morales-Santos, C. B. Peña-Valdivia, A. García-Esteva, G. Aguilar-Benítez, J. Kohashi-Shibata, "Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie", *Agrociencia*, vol 51, pp. 43-62, 2017.