

Distribución espacial de los períodos de disponibilidad de agua en los llanos venezolanos y su proyección para los escenarios de cambio climático SSP y modelo GISS-E2-1-G

Miguel I. Silva Borges^{1*}

¹ Departamento e Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Av. Universidad, Maracay-Aragua, Venezuela.

* Autor para correspondencia: Miguel I. Silva Borges, miguel.i.silva@ucv.ve

(Recibido: 30-07-2023. Publicado: 14-11-2023.)

DOI: 10.59427/rcli/2023/v23.125-138

Resumen

Manejar información climática que permita una adecuada planificación agrícola estratégica favorece el éxito de los cultivos, especialmente en la agricultura de secano. Los agricultores generalmente no cuentan, ni con datos brutos ni con herramientas que faciliten llevar a cabo dicha planificación. En esta investigación se elaboraron mapas de las fechas de inicios y duraciones probables al 75 por ciento de los períodos de disponibilidad de agua mediante kriging ordinario, en la región de los llanos de Venezuela con datos de precipitación y evapotranspiración de referencia a escala mensual, que se proyectaron bajo cambio climático a través de los escenarios SSP2-4.5, SSP5-8.5 y modelo GISS-E2-1-G para algunas estaciones. Se visualizó el comportamiento espacial de las fechas y duraciones de los mencionados períodos, y a su vez, se constató la influencia de los factores generadores de las lluvias en la zona de estudio. Se evidenció un inicio temprano y mayores duraciones de los períodos en gran parte de los llanos occidentales, en contraposición a los llanos orientales, atribuido a las condiciones ambientales distintivas de la región. Para las proyecciones futuras se apreció un comportamiento particular de los períodos entre las estaciones, donde el húmedo sufriría los mayores cambios en comparación a la línea base, vaticinando un futuro con menor tiempo de agua disponible para los cultivos en algunas localidades.

Palabras claves: Climática, agricultura, precipitación, evapotranspiración.

Abstract

Managing climate information that allows adequate strategic agricultural planning favors the success of crops, especially in rainfed agriculture. Farmers generally do not have raw data or tools that facilitate carrying out such planning. In this research, maps of the dates of beginnings and probable durations of 75 percent of the periods of water availability were elaborated using ordinary kriging, in the region of the plains of Venezuela with reference precipitation and evapotranspiration data on a monthly scale, which they were projected under climate change through the SSP2-4.5, SSP5-8.5 scenarios and the GISS-E2-1-G model for some stations. The spatial behavior of the dates and durations of the mentioned periods was visualized, and in turn, the influence of the factors that generate rainfall in the study area was verified. Early onset and longer period durations were evidenced in much of the western plains, as opposed to the eastern plains, owing to the distinctive environmental conditions of the region. For future projections, a particular behavior of the periods between the seasons was appreciated, where the wet period would suffer the greatest changes compared to the baseline, predicting a future with less time water available for crops in some locations.

Keywords: Climatic, agriculture, precipitation, evapotranspiration.

1. Introducción

El agua es sin duda uno de los componentes más importantes en el ámbito agrícola. Maximizar su aprovechamiento es una de las prioridades de los agricultores, sobre todo para la agricultura de secano. De acuerdo a la FAO (2020), este tipo de agricultura abarca el 80 % de la producción mundial y proporciona más de la mitad de los alimentos de todo el mundo (Molden et al., 2011). Sin embargo, obedece al comportamiento de las variables meteorológicas que presentan una elevada variabilidad espacio-temporal, principalmente la precipitación (Rowhani et al., 2011), lo que ha obligado a desarrollar herramientas que intentan inferir dicho comportamiento; mediante el análisis de frecuencia o probabilidad de ocurrencia de la lluvia, es posible, con cierto margen de éxito o fracaso, utilizar la información registrada de esta variable dentro de la planificación de los ciclos de los cultivos (Méndez et al., 2014). No obstante, por razones políticas, desde el año 2000 Venezuela ha perdido gran parte de su red de estaciones meteorológicas y más de 20 años de registros continuos, por lo que, no cuenta con este tipo información para poder llevar a cabo planificaciones agrícolas eficientes. Del mismo modo, no hay constancia de los efectos del cambio climático sobre las variables meteorológicas durante este trayecto de tiempo. Por ende, la agricultura en el país se encuentra en un estado aún más vulnerable, sobre todo cuando se ha constatado un aumento de la variabilidad de las lluvias en climas tropicales debido al cambio climático (Zhang et al., 2021; Pendergrass et al., 2017).

Para superar estas limitaciones, las modelaciones climáticas pueden considerarse una alternativa, sobre todo, cuando son el producto de reanálisis validados (Ziqiang et al., 2023) o salidas de simulaciones futuras bajo premisas de cambio climático (IPCC, 2014; IPCC, 2022). En este sentido los escenarios de cambio climático más actuales, las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas o SSP por sus siglas en inglés (Meinshausen et al., 2020), permiten comprender el proceder de las variables meteorológicas bajo climas futuros plausibles, resultantes de probables caminos de desarrollo humano, los cuales fueron utilizados para las proyecciones de cambio climático de todo el planeta para diferentes períodos futuros, desde 2021-2040 hasta 2081-2100 (IPCC, 2022). Hasta el momento, las evaluaciones futuras del país con estos nuevos escenarios en relación a las lluvias han reportado un aumento de norte a sur, con disminuciones al centro y este (Viloria et al., 2023). Ahora bien, al comparar los datos de precipitación, sean registros efectivos o modelados, con información de la demanda hídrica, se crea una herramienta efectiva a la hora de planificar los cultivos, puesto que se consiguen los períodos de disponibilidad de agua, o, dicho de otro modo, el momento en el cual, el agua estará disponible para los cultivos. Esta metodología se conoce como períodos de crecimiento (FAO, 1997) y se ha utilizado como instrumento para la delimitación de áreas que cumplan los requerimientos climáticos de los cultivos o zonificaciones agroecológicas (Fischer et al., 2012), zonificación de yuca (*Manihot esculenta*) en el estado de Tabasco, México (Rivera-Hernández et al., 2012), caracterización agroclimática del estado Guárico, Venezuela (Ferrer et al., 2014) y elaboración de los calendarios de siembras para las zonas agrícolas del estado Carabobo, Venezuela (Hernández et al., 2017).

En la presente investigación se planteó comparar las proyecciones futuras de los escenarios SSPs del período 2021-2040 de algunas estaciones meteorológicas, con la cartografía de los períodos de disponibilidad de agua de los llanos de Venezuela, una de las regiones agroproductivas más importantes del país, donde más del 90 % del maíz (*Zea mays*) se cultiva bajo secano y el arroz (*Oryza sativa*) por regadío (Martelo & Pérez, 2010; Paredes & Guevara, 2010) y donde hay menos información climática disponible para poder planificar adecuadamente. De este modo se contrastan los cambios de las distintas duraciones de los períodos de disponibilidad de un futuro próximo contra una línea base de referencia, lo que permitió visualizar espacialmente el comportamiento de la información extraída de estos períodos a través de todo el territorio bajo estudio y servirán como herramientas en las planificaciones agrícolas estratégicas tanto para los momentos que corren como los futuros.

2. Metodología

Área de estudio: el área está conformada por la región de los llanos de Venezuela (Figura 1). Esta región abarca cerca de 241.476 km² de superficie, un 16 % de todo el país, con una oscilación topográfica que va desde los 200 msnm, en las adyacencias del piedemonte andino hasta los 20 msnm en el delta del río Orinoco (Ruiz, 2004). Los ecosistemas de sabanas y bosques son característicos de esta región, al igual que un clima predominantemente estacional, con épocas seca y lluviosa bastante diferenciadas. La temperatura media anual se encuentra entre los 26 °C a los 28 °C. Políticamente, los llanos de Venezuela integran los estados Apure, Barinas y Portuguesa hacia el este, Cojedes y Guárico hacia la parte más central y Anzoátegui y Monagas en el oeste.

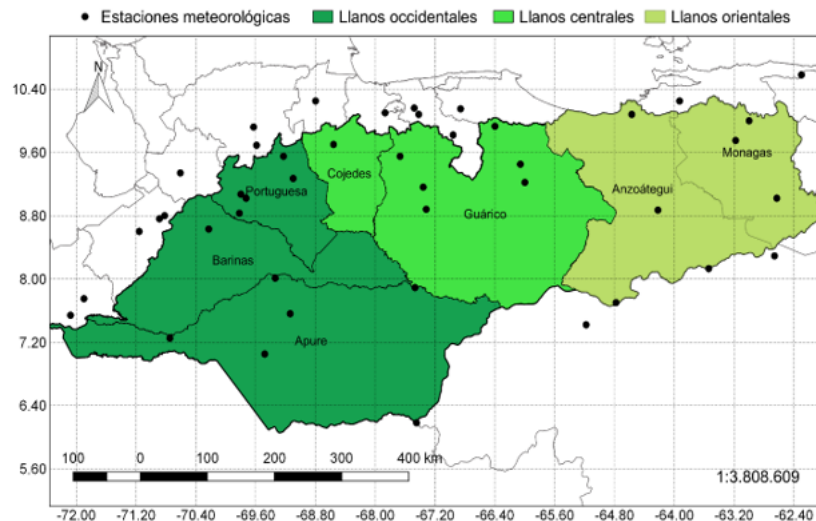


Figura 1: Estaciones empleadas para la investigación con detalles de la zona de estudio.

Datos climáticos: los datos climáticos empleados para la investigación corresponden a los acumulados mensuales de precipitación y el promedio mensual de evapotranspiración de referencia (ETo) estimada mediante el método de Hargreaves (Trezza, 2008) de 49 estaciones meteorológicas (Figura 1), ubicadas espacialmente tanto dentro como en los alrededores de la zona de estudio. A pesar de que se han desarrollado ecuaciones más precisas para la estimación de la ETo , se decidió utilizar la mencionada debido a la baja disponibilidad de variables y al ser una de las recomendadas para la región de estudio ante estas situaciones (Trezza, 2008). El rango temporal de estos datos abarca el período 1970-2000, denominado para esta investigación como línea base. Estos datos fueron sometidos a los procesos de validación contendientes en datos ausentes y homogeneidad para el proyecto de Mapas de Zonas Áridas y Semiáridas para América Latina y el Caribe (UNESCO, 2010) y fueron proporcionados por la cátedra de la Climatología Agrícola, perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

Estimación de las fechas de inicio, término y duraciones de los períodos de disponibilidad de agua: se empleó el método de la FAO (1997) para la estimación de los períodos de crecimiento, del cual se extrajeron los períodos de disponibilidad de agua (Figura 2). Este método toma en cuenta la precipitación y la ETo para definir el período donde los cultivos tendrán las condiciones climáticas ideales para desarrollarse. Para ello se construyeron los períodos de crecimiento de cada año, con los cuales se determinaron las fechas y las duraciones de los períodos. Entre los puntos donde se interceptan las líneas de los gráficos se establecen los períodos de disponibilidad de agua. La fecha asociada a esta intersección corresponde al inicio de cada período, que posteriormente se utilizó para estimar su duración, como puede apreciarse en la figura 2. La descripción de estos períodos y sus implicaciones agrícolas pueden consultarse en la tabla 1.

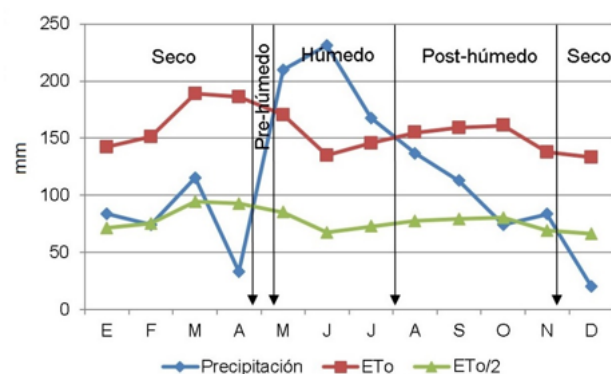


Figura 2: Período de crecimiento del año 1972 de la estación Caroní Macagua, con diferenciación e interpolación de los períodos de disponibilidad de agua.

Tabla 1: Descripción e implicaciones agrícolas de los períodos de disponibilidad de agua.

Período	Criterio	Interpretación	Implicación agrícola
Seco	$P < 0.5 \text{ ETo}$	La precipitación registrada no satisface la mitad de los requerimientos hídricos.	Este período sólo es preferible para labores de cosecha de cultivos de parte aérea.
Pre-húmedo / Post- húmedo	$0.5 \text{ ETo} \leq P < \text{ETo}$	La precipitación registrada satisface la mitad de los requerimientos hídricos, pero menos del total. Si este ocurre antes del húmedo se denomina pre-húmedo y pos-húmedo si ocurre después.	Este período permite la preparación de la tierra, siembra, primeros días y cosecha del cultivo. Es desfavorable para la época de mayor demanda hídrica del cultivo, como la floración y fructificación.
Húmedo	$P \geq \text{ETo}$	La precipitación registrada es superior a los requerimientos hídricos.	Es inadecuada para labores agrícolas. Este período es ideal para el desarrollo pleno de los cultivos; fase de floración y fructificación.

Análisis de frecuencias: con el fin de extraer un valor puntual de las fechas y las duraciones de cada estación, para posteriormente cartografiarlas en la zona de estudio, se aplicó un análisis de frecuencias a las fechas de los inicios y las duraciones de los períodos de disponibilidad de agua (Dirk, 2013). Este análisis se utilizó con el objetivo abordar la variabilidad interanual de las fechas y las duraciones de cada período y extraer un valor probable de ocurrencia para cada uno de ellos y para cada estación meteorológica. Esta probabilidad de ocurrencia se entiende como la probabilidad de que un período inicie en determinada fecha o antes, mientras que para las duraciones se entiende como la probabilidad de que un período dure un determinado tiempo o más. Para calcular esta frecuencia se ordenaron las fechas desde la más tempranas a las más tardías, mientras que las duraciones de ordenaron de mayor a menor. Luego se aplicó la ecuación 1.

$$\text{Frecuencia}(\%) = \frac{n}{m} * 100 \quad (1)$$

Donde n corresponde al número de orden de cada fecha o duración y m al número total de años de registro. Una vez que las frecuencias fueron calculadas, se extrajeron las fechas y las duraciones de cada período asociado a una probabilidad del 75 por ciento por cada una de las estaciones. Esta probabilidad considera un riesgo del 25 por ciento, lo cual se considera aceptable en agricultura (Méndez et al., 2014).

Cartografía de los períodos de disponibilidad de agua: se empleó el kriging ordinario como método de interpolación de los valores de los inicios y duraciones de los períodos de disponibilidad de agua. El kriging se vale de un modelo de continuidad espacial o semivariograma que se emplea para calcular la semivarianza de los valores a estimar a través de pares ordenados. El inverso de la semivarianza en este modelado se usa posteriormente en el estimador Kriging, ilustrado en la ecuación 2:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

Donde N es número de valores puntuales registrados, λ_i es el peso desconocido para cada uno de los valores, $Z(S_i)$ es el valor registrado en la i-ésima ubicación y S_0 es la ubicación a estimar. La aplicación de la interpolación kriging se realizó en el software R Studio Desktop versión 2021.09.2+382. El resultado de la interpolación generó raster con una resolución de grilla de 1 km^2 . Luego, estos raster fueron proyectados en el sistema de referencia SIRGAS Regven, el cual es el sistema oficial para Venezuela. Una vez que los raster se generaron, se procedió a reclasificarlos con el software Sistema para Análisis Automatizado Geocientífico o SAGA, versión 7.9.0. Los criterios de reclasificación fueron establecidos para cada raster de forma particular, de modo que pudiera observarse con mayor precisión la distribución espacial de cada uno de los resultados. Posteriormente, fueron cartografiados mediante el diseñador de impresión del gestor de sistema de información geográfica Qgis, en su versión 2.14 Essen.

Proyección futura para los escenarios SSP: se tomaron cinco estaciones meteorológicas para realizar las proyecciones futuras (Tabla 2). Debido a la magnitud de la información que pudiera generarse para dos escenarios y un modelo de todas las estaciones utilizadas para la línea base, se decidió seleccionar una muestra de las estaciones donde los cambios de las temperaturas pudieran tener mayores impactos. Para llevar a cabo las proyecciones se utilizaron las salidas del modelo GISS-E2-1-G, el cual es la versión más reciente de uno de los cuatro modelos validados para Venezuela y que representan consistentemente la precipitación y la temperatura del país (ACFIMAN-SACC, 2018). Como escenarios, fueron escogidos los SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Para el primer escenario el forzamiento radiativo generado es de 4.5 Wm^2 resultante de un desarrollo mundial que no se desalinea del comportamiento histórico, con un crecimiento desigual entre los países y logros en desarrollo sostenibles lentos, afectaciones ambientales, pero con menor intensidad en el uso energético y recursos, moderado crecimiento poblacional y desigualdades sociales. Para el segundo escenario el forzamiento radiativo es de 8.5 Wm^2 producto de un acelerado crecimiento tecnológico y de capital humano e integración de los mercados globales, combinado con la explotación intensiva de combustibles fósiles, recursos y energía. La población del planeta alcanza su máximo y disminuye durante el siglo XXI. Se gestionan adecuadamente los problemas sociales y ambientales, incluso con geoingeniería (IPCC, 2022).

Tabla 2: Estaciones seleccionadas para las proyecciones futuras de cambio climático.

Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)
Samán mocho	-67,87	10,1	425
Mucuchíes	-70,89	8,76	3130
Turén	-69,1	9,27	149
San Nicolás	-69,82	8,83	133
Bramón	-72,4	7,65	1150

Para la generación de las proyecciones se descargaron las salidas de precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas del modelo GISS-E2-1-G de la plataforma Worldclim (Fick & Hijmans, 2017), <https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html> a una resolución de 30 segundos o 1 km². De esta misma web <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html> se descargaron los datos climáticos históricos (1970-2000) que se utilizaron como base para dichas proyecciones. Las bases de datos mencionadas se utilizaron para extraer el porcentaje de cambio o delta (Δ) entre el modelo y el histórico del Worldclim.

Para calcular el delta (Δ) de las temperaturas se aplica la ecuación 3:

$$\Delta_{Temp} = Temp_{Futura} - Temp_{Presente} \quad (3)$$

Para precipitación se estima el delta relativo al valor de Worldclim mediante la ecuación 4:

$$\Delta_{Precipitación} = [Precipitación_{futura} - Precipitación_{presente}] / [Precipitación_{presente}] \quad (4)$$

Posteriormente, se aplican estos valores delta de cada mes, a cada uno de los meses por igual. Para temperatura se aplica la ecuación 5:

$$Temp_{Futura} = Temp_{Lineabase} + \Delta_{Temp} \quad (5)$$

Mientras que para la precipitación se aplica el delta relativo a través de la ecuación 6:

$$Precipitación_{Futura} = Precipitación_{Lineabase} + \Delta_{Precipitación} * Precipitación_{Lineabase} \quad (6)$$

Una vez generadas las series proyectadas para los escenarios y modelos, se estimó la ETo mediante la ecuación de Hargreaves (Trezza, 2008) y se procedió a calcular los períodos de crecimiento y extraer los valores de los inicios y duraciones de los períodos de disponibilidad para las estaciones seleccionadas, tal como se explicó anteriormente.

3. Resultados y discusión

Períodos de disponibilidad de agua para la línea base Los resultados para la línea base pueden encontrarse a partir de la figura 3; para el inicio del pre-húmedo se constata un comienzo temprano en los llanos orientales, al noreste del estado Monagas y al oeste de los estados Barinas y Apure, muy cerca del piedemonte Andino, con un inicio entre 16 al 19 de abril. El pre-húmedo va comenzando después de estas fechas hacia el resto de los llanos occidentales, y entre 29 de abril y 9 mayo en gran parte de los llanos centrales y orientales, con comienzos más tardíos en varias zonas de Anzoátegui y noreste de Guárico. Respecto al período húmedo, se puede observar en la figura 4 un inicio más temprano entre el 27 al 29 de abril, al noreste de Monagas y Guárico, para las zonas cercanas a Altigracia de Orituco y Tucupido del este último estado. Gran parte de los llanos occidentales presentan un inicio entre el 9 al 19 de mayo, mientras que los inicios más tardíos, entre el 19 de mayo y 10 de junio, abarcarían gran parte Anzoátegui y noreste de Guárico y Cojedes.

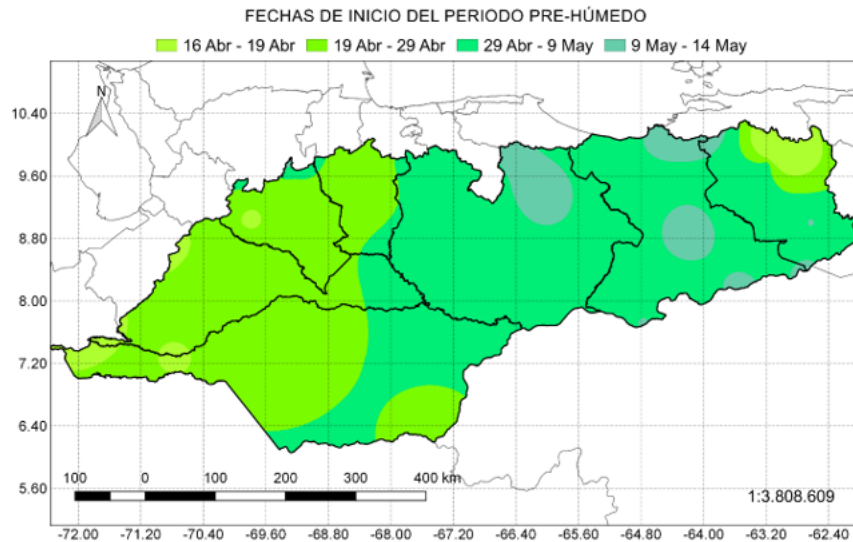


Figura 3: Distribución espacial de las fechas de inicio del período pre-húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

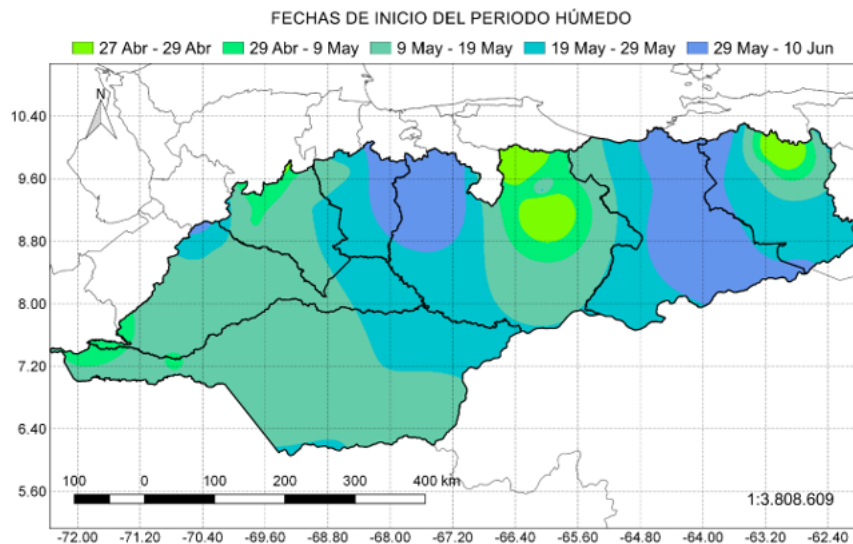


Figura 4: Distribución espacial de las fechas de inicio del período húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

En la figura 5 se encuentra el inicio del período post-húmedo, donde se aprecia un patrón del inicio de este período más temprano hacia los llanos orientales y más tardíos hacia los llanos occidentales. Las fechas más adelantadas se ubicaron entre el 6 y 16 de septiembre, mientras que las fechas más tardías estarían comprendidas del 15 al 23 de noviembre.

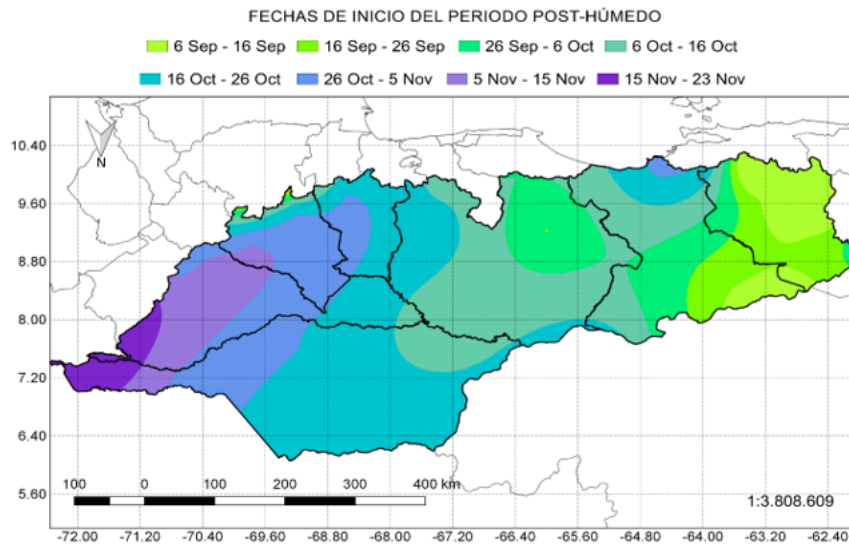


Figura 5: Distribución espacial de las fechas de inicio del período post-húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

En relación a las duraciones de los períodos de disponibilidad de agua, para el pre-húmedo, la figura 6 muestra un marcado dominio de la duración entre 12 a 16 días para la mayor parte de los llanos, con unas disminuciones espacialmente más importantes en el centro y noroeste de portuguesa. Respecto a la duración del húmedo (figura 7) estuvo marcado por una tendencia espacial a un húmedo más prolongado en los llanos occidentales y más corto en los llanos orientales, con una duración intermedia en los llanos centrales. La mayor duración del húmedo se ubicaría entre 155 a 173 días, mientras que la duración más corta estaría comprendida entre 52 a 65 días.

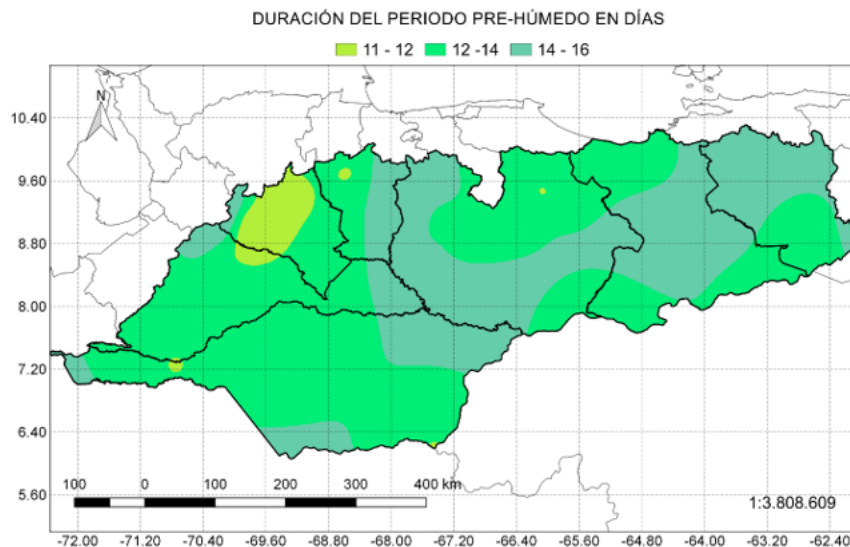


Figura 6: Distribución espacial de la duración del período pre-húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

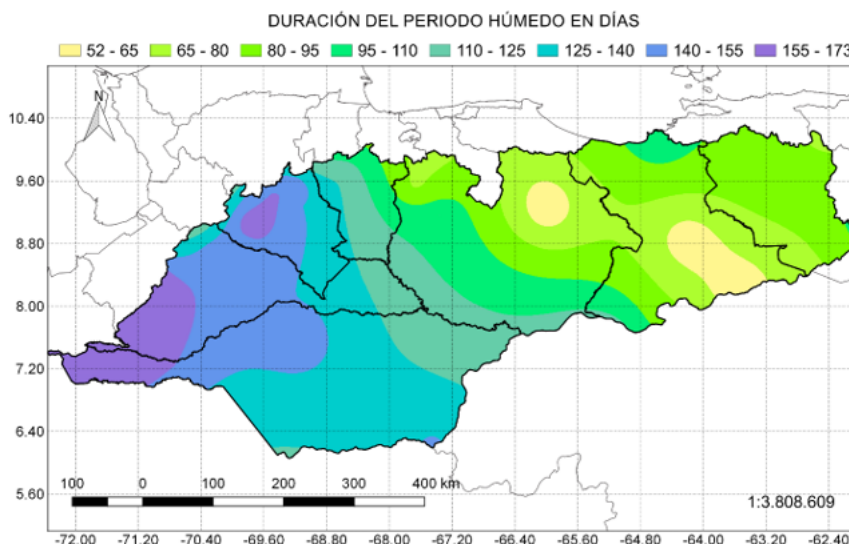


Figura 7: Distribución espacial de la duración del período húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

En la duración del post-húmedo, la figura 8, se disponen entre 14 a 22 días, con disminuciones evidentes al este de Barinas y Apure y al noroeste de Portuguesa. Para el caso de la duración del seco, en la figura 9, se observó una tendencia aumentar hacia los llanos orientales, nororientales y gran parte de Guárico y una disminución hacia los occidentales, con montos más bajos entre 156 a 160 días y montos más altos entre 190 a 200 días.

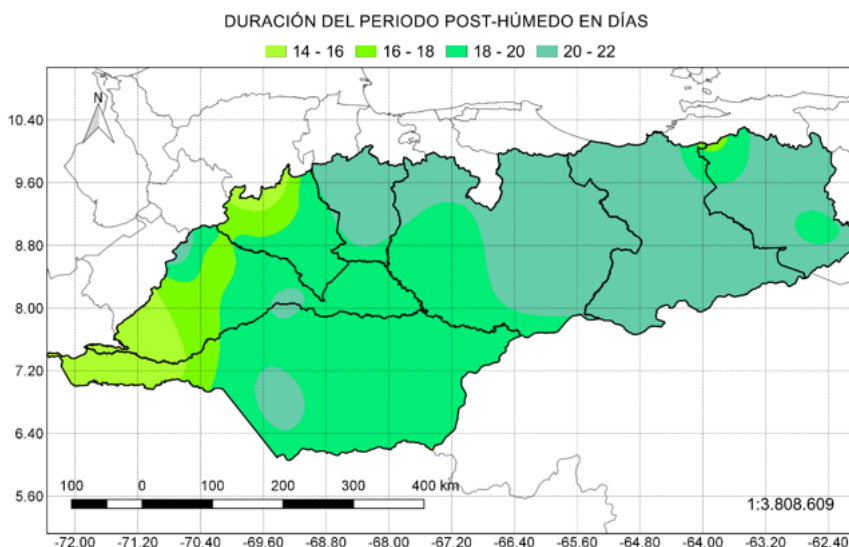


Figura 8: Distribución espacial de las fechas de inicio del período post-húmedo probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

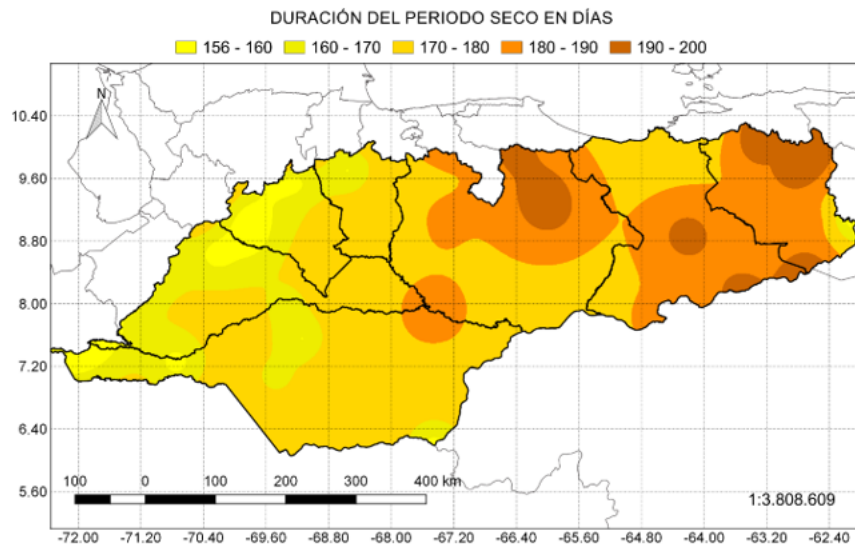


Figura 9: Distribución espacial del período seco probable al 75 por ciento para la línea base en los llanos venezolanos.

Proyección futura de los períodos de disponibilidad Los resultados de la proyección bajo escenarios de cambio climático pueden encontrarse en la figura 10. Como puede apreciarse, los inicios de los distintos períodos para cada una de las estaciones respecto a la línea base confirma que la evaluación de los cambios debe hacerse de forma particular; los inicios del pre-húmedo se mantendrían para mediados de abril para todas las estaciones mientras que los inicios del húmedo se desplazarían a después de mayo para 4 de las 5 estaciones, solo San Nicolás presentaría inicios similares de húmedo a la línea base. Respecto al post-húmedo, el cambio más notorio se encuentra en la estación Mucuchíes, cuyo inicio se adelantaría a septiembre mientras que para las otras estaciones no habría cambios importantes.

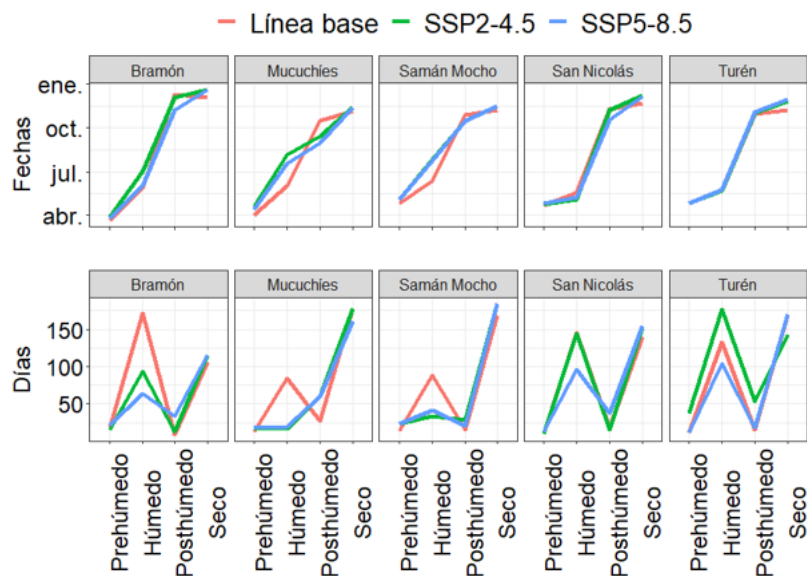


Figura 10: Inicios y duraciones de los períodos de disponibilidad de agua para las cinco estaciones seleccionadas tanto para la línea base como para los escenarios SSP.

Los cambios de los inicios de los períodos entre los escenarios SSP no serían tan contrastantes a diferencia de las duraciones, específicamente el período húmedo, el cual experimentaría mayores cambios (Figura 10). Bramón, Mucuchíes y Samán Mocho registrarían la mayor reducción en comparación a la línea base; para Bramón el húmedo disminuiría de 171 a 94 días, mientras que para Mucuchíes de 84 a 17 días y Samán Mocho de 88 a 33 días. En contraposición, en Turén aumentarían de 132 a 177 días y en San Nicolás la diferencia solo serían dos días de reducción. Entre escenarios, Bramón, Turén y San Nicolás registrarían un aumento del período húmedo

para el SSP2-4.5 respecto al SSP5-8.5 y solamente Turén aumentaría la duración de este mismo período respecto a la línea base hasta 175 días inclusive.

Como una manera de entender la respuesta de los cambios proyectados en los períodos de disponibilidad de agua en las estaciones seleccionadas, se graficaron los promedios mensuales de las temperaturas y el percentil 75 de las lluvias (Figura 11). Se puede apreciar que las variables relacionadas a la respuesta energética simulada por los modelos (b) y (c) reflejan un incremento significativo en comparación a la línea base; todas las temperaturas aumentarían en las estaciones al igual que la demanda hídrica, mientras que las lluvias no registrarían cambios importantes. Esta respuesta se ha constatado en otras investigaciones donde relacionan el aumento de las temperaturas y la demanda hídrica para registros históricos (Wang et al., 2020; Valipour et al., 2020), atribuido directamente al cambio climático, por lo que estas respuestas pudieran esperarse para el futuro en las estaciones evaluadas.

Para esta investigación los SSP no mostraron diferencias marcadas entre las proyecciones promedios de temperaturas y demanda hídrica, por lo que este aumento generaría implicaciones sobre la disponibilidad, indistintamente del escenario utilizado para las estaciones meteorológicas seleccionadas. Por otro lado, la disponibilidad de agua en el futuro bajo cambio climático estaría espacialmente diferenciada (Liu et al., 2022), como se pudo observar en el aumento de la duración del húmedo en algunas estaciones en contraste a las otras, lo que, de otra forma se relaciona con un incremento en la variabilidad de las lluvias en los trópicos (Zhang et al., 2021). Así entonces, para el futuro simulado para el modelo utilizado, la relación entre la oferta y la demanda climática pudieran limitar en gran medida el tiempo de agua disponible para los cultivos con implicaciones importantes tanto para los cultivos como para las necesidades de alimentos (He & Rosas, 2023; Shayanmehr et al., 2022).

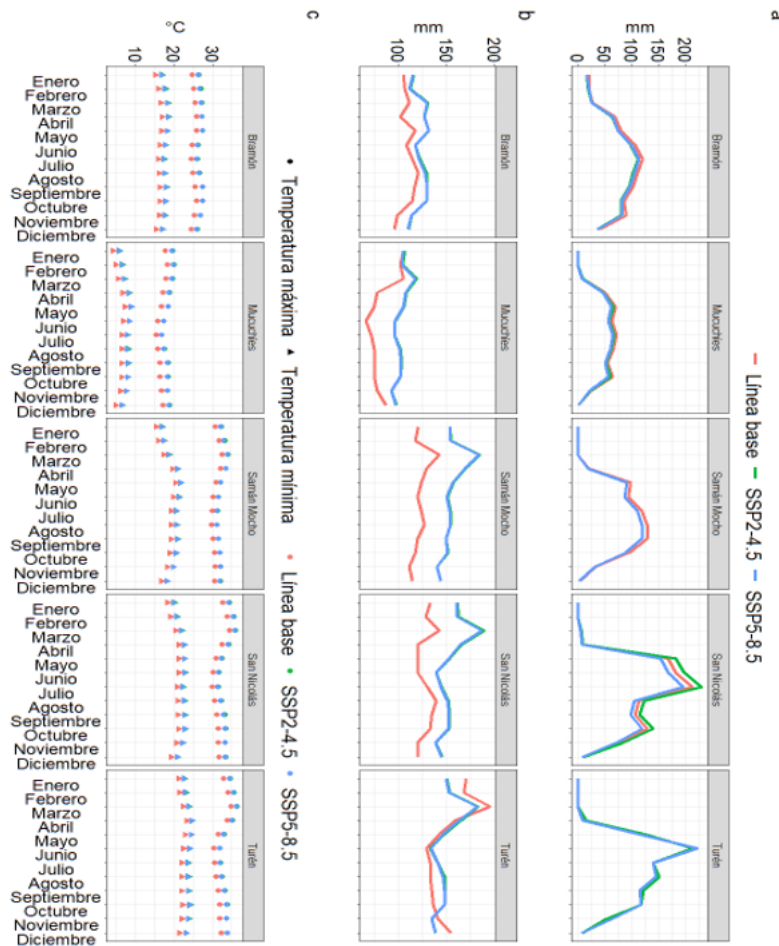


Figura 11: Valores mensuales de precipitación (a), ETo (b) y temperaturas máximas y mínimas (c) para cada una de las estaciones correspondientes a la línea base y a los escenarios SSP.

Por otro lado, para la línea base, los resultados de la distribución espacial de los períodos de disponibilidad de agua ilustran indirectamente el comportamiento natural de los factores generadores de las lluvias en esta región de Venezuela. Las fechas que proporcionan los mapas demuestran la marcada estacionalidad de la humedad en

los llanos, relacionado al comportamiento de las precipitaciones producto de la influencia de la zona de convergencia intertropical y la alta presión del atlántico (Cortez et al., 2016; Schneider et al., 2014), principales responsables de la generación de las lluvias en los llanos de Venezuela y cuya presencia se hace constar a partir de abril aproximadamente, y se mantiene durante algunos meses, comenzando su influencia en el sudoeste para luego avanzar hacia noreste (Martelo, 2003), lo que explica los comienzos tempranos de los períodos de disponibilidad en los llanos occidentales y tardíos en los orientales.

Los comienzos tempranos de los períodos de disponibilidad de agua para las zonas más nororientales de los llanos parecen estar asociados al inicio adelantado de las lluvias producto de un aumento de la temperatura del océano atlántico que han tenido influencias espacialmente más puntuales en la generación de las lluvias hacia estas zonas (Martelo, 2003; Tim & De Guenni, 2015). Los comportamientos observados en las duraciones de los períodos de disponibilidad de agua también responden al tipo de clima predominante en los llanos y a la aparición y desarrollo de la convergencia, pudiendo atribuirse a otros fenómenos de escala más local, como el efecto sotavento o sombra de lluvia que genera el macizo de Turimiquire en la serranía del mismo nombre al noroeste del estado Monagas, que genera reducidos montos de lluvia.

A pesar de los cambios proyectados por los SSP en la duración del período húmedo principalmente, los resultados de los intervalos de las fechas de preparación de suelos y siembra (período pre-húmedo) para la línea base, coincidieron en gran parte con las fechas de siembras de diferentes cultivos en investigaciones realizadas en los llanos para el intervalo de tiempo donde la información climática es limitada. Las fechas empleadas y/o recomendadas para siembra de los trabajos de Warnock de Parra et al. (2007); González et al. (2007); García et al. (2009); Vivas et al. (2009); Briceño & Álvarez (2010) concuerdan con el intervalo de fechas del pre-húmedo, e inclusive para ciclos de producción recientes (Laurentín et al., 2020) en la misma zona, tanto para ciclos de secano como para lo de regadío (González et al., 2005; Ramírez & Duran, 2012; Laurentín et al., 2020), donde el la siembra se realizó durante el post-húmedo. Lo que refleja la utilidad de los mapas para la planificación de varios ciclos de cultivos en un mismo año y cuyos resultados pueden utilizarse como referencia para las planificaciones estratégicas en la mencionada región.

Los comportamientos vistos en los diferentes mapas de inicios de cada período, permiten inferir que, desde un punto de vista agrícola, parte de los llanos orientales no presentan condiciones de humedad ideales para cultivos de ciclo largo, a diferencia de los llanos occidentales. Lo que coincide con las características climáticas de dichas zonas, donde predomina un clima tropical lluvioso en la mayoría de los llanos occidentales y una franja semiárida al noreste del estado Monagas (Paredes & Guevara, 2010). Esto permite a su vez identificar zonas donde las necesidades de regadío son imprescindibles en la planificación de los cultivos.

4. Conclusión

Los resultados de la cartografía de los períodos de disponibilidad permitieron desarrollar herramientas de apoyo para la planificación de ciclos de cultivo. A pesar de que el enfoque sea netamente climático, sirven de referencia para elaborar calendarios agrícolas con un 75 por ciento de probabilidades de éxito. Estas herramientas deben complementarse con vigilancia meteorológica in situ y balances hídricos donde se evalúe la disponibilidad de agua en el suelo, de esta forma, la eficiencia de la planificación es mucho mayor y garantiza mejores rendimientos. Por otra parte, sirven de referencia en un contexto donde no existe información climática disponible y en el que el cambio climático ha influido y generado alteraciones en las variables meteorológicas. Las proyecciones futuras apuntan a una situación donde la disponibilidad de agua es limitada, por lo que, en combinación con las mencionadas herramientas, se deben plantear medidas de adaptación, que ayuden a enfrentar la problemática medioambiental y agrícola asociada al clima futuro y que puede generar impactos desfavorables para la región estudiada y las localidades analizadas.

5. Referencias bibliográficas

ACFIMAN-SACC. (2018). Primer Reporte Académico de Cambio Climático. Resumen para responsables de Políticas en Cambio Climático para Venezuela: Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Primer Reporte Académico de Cambio Climático (PRACC) de la Secretaría Académica de Cambio Climático (SACC) de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (ACFIMAN) de Venezuela". [Villamizar, A., E. Buroz Castillo, R. Lairer Centeno, & J. A. Gómez (Eds.)]. EDICIONES ACFIMAN – CITECI, CARACAS. 488 p.

Briceño, I. & Álvarez, L. (2010). Evaluación de un sistema de preparación de suelo y siembra en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología (28), 16-24.

- Cortez, A., Rodríguez, M., Rey, J.C., Ovalles F., Gonzalez, W., Parra, R., Olivares, B. & Marquina, J. (2016). Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en el Estado Guárico, Venezuela. *Revista de la facultad de agronomía de la Universidad del Zulia (LUZ)*, (33), 292-310.
- Dirk, R.A.E.S. (2013). *Frequency Analysis of Rainfall Data*; College on Soil Physics—30th Anniversary (1983–2013); The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics: Trieste, Italy, 210–244.
- FAO. (1997). Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*. Rome. 210 p.
- Ferrer, J., Hernández, R., & Valera, A. (2014). Caracterización agroclimática de los llanos centrales del estado Guárico, *Observador del Conocimiento*, 2, 175-186.
- Fick, S.E., & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12), 4302-4315.
- Fischer, G., Nachtergaele, F.O., Prieler, S., Teixeira, E., Toth, G., van Velthuisen, H., Verelst, L., & Wiberg, D. (2012). *Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0)- Model Documentation*. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, Laxenburg, Austria; Rome, Italy. 196 p.
- García, P., Cabrera, S., Sánchez, J., & Pérez, L. (2009). Rendimiento del maíz y las épocas de siembra en los Llanos Occidentales de Venezuela, *Agronomía Tropical*, 59(2), 161-172.
- González, R., Sequera, W., & Graterol, Y. (2005). Comportamiento de nueve cultivares de sorgo forrajero en Portuguesa, Venezuela, *PASTOS*, 35 (2), 151-162.
- González, R., Pineda, J., & Graterol, Y. (2007). Cuantificación de inóculo en el suelo e incidencia de *Macrophomina phaseolina* sobre híbridos de sorgo en tres localidades de los Llanos Centro occidentales de Venezuela, *Revista de la facultad de agronomía de la Universidad del Zulia (LUZ)*, 24(4), 627-641.
- He, L., & Rosas, L. (2023). Solutions to agricultural green water scarcity under climate change. *PNAS Nexus*, (2)4, 1-11.
- Hernández, R., Pereira, Y., Molina, J.C., Coelho, R., Olivares, B. & Rodríguez, K. (2017). *Calendario de siembra para las zonas agrícolas del estado Carabobo en la República Bolivariana de Venezuela*. Sevilla, España: Editorial Universidad Internacional de Andalucía. 128 p.
- 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.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.
- Laurentín, H., Miranda, F., Urdaneta, L., Jayaro, Y., Acevedo, M., García, P., Pérez, A., Alezones, J., Moratínos, H., León, O., Higuera, A., Aponte, A., Salas, M., Sánchez, J., Ávila, J., Hernández, A., Tobia, C., Zocco, J., Torres, J., Muñoz, J., Meza, N., Daboín, B., Castillo, A., Bilal E.A., De Sousa, O., & Briceño, R. (2020). *Producción de Semillas en Venezuela*. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo, Venezuela. 441 p.
- Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022). Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10, 1-16.
- Martelo, M.T. (2003). *La precipitación en Venezuela y su relación con el Sistema Climático*. Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología, Dirección General de Cuencas Hidrográficas del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales. 72 p.

- Martelo, M., & Pérez, M. (2010). Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la República Bolivariana de Venezuela. Caracas: GCP/VEN/010/UK. 111 p.
- Méndez, M., Puche, M., Mendoza, N., Bracho, G., & García, V. (2014). Manual de prácticas de climatología agrícola. Maracay, Venezuela. Facultad de Agronomía, UCV. 144 p.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J.G., Daniel, J.S, John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S., Smith, S.J., van den Berg, M., Velders, G.J.M., Vollmer, M.K., & Wang, R.H.J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605.
- Molden, D., Vithanage, M., de Fraiture, C., Faures, J.M., Gordon, L., Molle, F. & Peden, D. (2011). *Water Availability and Its Use in Agriculture*. Pages. *Treatise on Water Science*, Elsevier, 4, 707-732,
- Paredes, F. & Guevara, E. (2010). Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en Los Llanos de Venezuela, *Bioagro*, (22)1, 3-10.
- Pendergrass, A.G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & M. Sanderson, B. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7, 1-9.
- Ramírez, V., & Durán, A. (2012). Un Modelo de Producción de Arroz en Venezuela. X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Buenos Aires – Argentina. 1-10.
- Rivera-Hernández, B., Aceves-Navarro, L.A., Juárez-López, J.F., Palma-López, D.J., González-Mancillas, R. & González-Jiménez, V. (2012). Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México, *Avances en Investigación Agropecuaria*, 16(1), 29-47.
- Rowhani, P., Lobell, D. B., Linderman, M. & Ramankutty, N. (2011). Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(4), 449–460.
- Ruiz., D. (2004). La biodiversidad en la ecorregión de los Llanos de Venezuela y las prioridades para su conservación, *Ecosistemas*, 13(2), 124-129.
- Schneider, T., Bischoff, T. & Haug, G. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513, 45–53.
- Shayanmehr, S., Porhajašová, J.I., Babošová, M., Sabouhi Sabouni, M., Mohammadi, H., Rastegari Henneberry, S., & Shahnoushi Foroushani, N. (2022). The Impacts of Climate Change on Water Resources and Crop Production in an Arid Region. *Agriculture*, 12(7), 1-22.
- Tim, N., & De Guenni, L.B. (2016). Oceanic influence on the precipitation in Venezuela under current and future climate, *Climate Dynamics* (online), 47, 1-24.
- Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?, *Bioagro* 20, 89-95.
- UNESCO. (2010). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América. CAZALAC. Documentos del PHI-LAC. No 25.
- Viloria, J.A., Olivares, B.O., Garcia, P., Paredes-Trejo, F., & Rosales A. (2023). Mapping Projected Variations of Temperature and Precipitation Due to Climate Change in Venezuela. *Hydrology*, 10(4), 96.
- Valipour, M., Bateni, S.M., Sefidkouhi, M.A.G., Raeini-Sarjaz, M., & Singh, V.P. (2020). Complexity of Forces Driving Trend of Reference Evapotranspiration and Signals of Climate Change. *Atmosphere*, 11, 1-26.
- Vivas, L.E., Astudillo, D. & Campos, L. (2009). Evaluación del insecticida Thiamethoxam 25 % para el manejo del insecto sogata en el cultivo de arroz en Calabozo, estado Guárico, Venezuela, *Agronomía Tropical*, 59(1), 89-98.
- Wang, K., Xu, Q., & Li, T. (2020). Does recent climate warming drive spatiotemporal shifts in functioning of high-elevation hydrological systems? *Science of the Total Environment*, 719, 1-14.

Warnock de Parra, R., Guillén, L., Puche, M., Silva, O., & Morros, M. (2007). Selección de la fecha de siembra como estrategia de adaptación a los efectos del estrés térmico sobre los rendimientos simulados de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) en un área montano baja del centro-occidente de Venezuela, *Revista de la Facultad de Agronomía*, 24(3): 442-467.

Zhang, W., Furtado, K., Wu, P., Zhou, T., Chadwick, R., Marzin, C., Rostron, J., & Sexton, D. (2021). Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 7(31), 1-11.

Ziqiang, Y., Li, W., Jianqiang, H. & Xiaoying, W. (2023). "Multivariate deep learning for reconstruction of spatial missing climate data," *Proc. SPIE 12717, 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Automation, and High-Performance Computing (AIAHPC 2023)*, 127171V (21 July 2023).