

Sistemas de información, zonificación y georreferenciación (agricultura de precisión)

Artículos de investigación científica y tecnológica

Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela

Ecoterritorial sectorization for the sustainable agricultural production of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Carabobo, Venezuela

Barlin Orlando Olivares,^{1*} Rafael Ángel Hernández²

¹ Investigador, Programa de Doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible, Universidad de Córdoba. Córdoba, España. Correo: barlinolivares@gmail.com.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2651-570X>

² Coordinador de Meteorología Agrícola, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Baruta, Venezuela. Correo: r.hernandez@inameh.gob.ve.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4408-7411>

Editor temático: Juan Manuel Rodríguez Rondón (Cartografía Temática de Colombia S.A.S. [BioGeomática])

Fecha de recepción: 03/04/ 2018

Fecha de aprobación: 14/02/2019

Para citar este artículo: Olivares, B. O., & Hernández, R. A. (2019). Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 323-338

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1462



Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

* Avenida Medina Azahara, 5, 14071 Córdoba, España.

Resumen

En Venezuela, un total del 5,4% del territorio de uso agropecuario se dedica a la producción de raíces y tubérculos, lo que corresponde a 93.677 ha, de las cuales una importante producción de papa se concentra en el estado Carabobo; sin embargo, actualmente existen conflictos sobre el uso de la tierra. El objetivo de esta investigación fue definir áreas aptas para el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en las zonas agrícolas del estado Carabobo como tarea indispensable para el desarrollo sostenible. Se aplicó la metodología de zonificación agroecológica de la *Food and Agriculture Organization* (FAO),

basándose, en primer lugar, en el análisis de los factores climáticos y, luego, en el análisis de las características del suelo, a fin de obtener la caracterización física de las diferentes áreas. Posteriormente, se confrontaron las exigencias ambientales del cultivo, obteniendo la sectorización de las zonas de mayor o menos adaptabilidad. La mayor superficie corresponde a las zonas con aptitud agrícola que ocupan 337 km², siendo los municipios Libertador y Valencia los de mayor proporción. Este estudio constituye un instrumento para lograr un mayor aprovechamiento de las tierras.

Palabras clave: agricultura, clima, papa, sostenibilidad, utilización de la tierra, zonificación

Abstract

In Venezuela, a total of 5.4% of the territory under agricultural use is dedicated to the production of roots and tubers corresponding to 93,677 ha, of which an important potato production center is concentrated in the state of Carabobo; however, there are currently land use conflicts. This research aimed to define suitable areas for potato cropping (*Solanum tuberosum* L.) in the agricultural regions of the Carabobo state as an essential task for its sustainable development. The agroecological zoning methodology of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) was applied,

based initially on the analysis of climatic factors, and then, on the analysis of soil characteristics to obtain the physical characterization of different areas. Subsequently, the environmental demands of the crop were confronted attaining the sectorization of greater or lesser adaptability areas. The largest area corresponds to agricultural suitability zones that occupy 337.0 km², showing the Libertador and Valencia municipalities the highest proportion of these. This study is a tool to achieve a greater land use in economic, ecological and social sustainability terms.

Keywords: agriculture, climate, land use, potatoes, sustainability, zoning

Introducción

En Venezuela, los estados andinos (Mérida, Táchira y Trujillo) lideran la producción de papa (*Solanum tuberosum* L., 1753) durante todo el año (Salazar, Zambrano, & Valecillos, 2008); sin embargo, en algunas zonas de los estados Lara, Aragua y Carabobo se cultiva este rubro, debido a que se aplican técnicas de manejo que, aunadas a las condiciones edafoclimáticas, permiten obtener cosechas al menos dos veces al año.

En general, los perfiles tecnológicos para la producción de raíces y tubérculos en la región productiva son inadecuados. Estos sistemas se caracterizan por la poca cultura en el uso de cultivos asociados, poco aprovechamiento de los recursos genéticos y un inadecuado manejo agronómico, donde en ocasiones no existe un manejo de la producción bajo riego, lo que genera que los costos de producción sean altos (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales [MARN], 2005; Ovalles, Cortez, Rodríguez, Rey, & Cabrera-Bisbal, 2008; Rodríguez, 2010).

Básicamente, el término *sostenibilidad* se utiliza en los sistemas agroambientales para describir el mantenimiento de estos a través del tiempo. En consecuencia, entre los principales factores que perjudican la sostenibilidad de los sistemas agrícolas se encuentran la degradación del suelo y escasez de agua (Paredes-Trejo & Olivares, 2018), generando la pérdida de la fertilidad del suelo y disminución en la productividad, así como importantes limitaciones en el rendimiento de los cultivos y la producción de alimentos que demanda la población en general (Pla-Sentís, 2010).

El sector agrícola es particularmente sensible a los procesos de degradación de la tierra y a los efectos del cambio climático; por esta razón, sobre la base de lo planteado y los compromisos adquiridos por el país, el componente agrícola es estratégico, destacándose en él tres temas: 1) la seguridad alimentaria, 2) la calidad de vida de la población rural y 3) el ordenamiento territorial, en particular, lo relacionado con los cambios de uso de la tierra (Red Interamericana de Academias de Ciencias [IANAS, por sus siglas en inglés], 2017; Romero & Monasterio, 2005).

Es notable que la escasez de información consolidada acerca de la identificación, caracterización, zonificación y evaluación de los sistemas de producción a nivel de condiciones del productor ha afectado la posibilidad de disponer de una visión actual y firme sobre las mejores opciones productivas, competitivas y sustentables, como elemento clave para la orientación, formulación de políticas y acciones de planificación e investigación en materia de gestión local de los recursos naturales.

La determinación de territorios con características adecuadas para el establecimiento de cultivos representa un punto indispensable en la planificación de cualquier programa de desarrollo agrícola local o regional. En general, este estudio permitirá realizar una explotación racional, considerando la capacidad productiva de los recursos naturales, así como la conservación de los ecosistemas en la zona de interés (Cortez, Núñez, & Rodríguez, 2007; Sediya-Chohaku et al., 2001).

La zonificación de un cultivo representa la sectorización del territorio con diferentes criterios, para determinar unidades geográficas homogéneas, desde el punto de vista de sus características físicas, biológicas, sociales y económicas, con potencial ecológico para el establecimiento de sistemas agrícolas de uso sostenible (Espinosa & Orquera, 2007; Olivares, Hernández, Coelho, Molina, & Pereira, 2018a, 2018b; Suárez, 2014). En general, un aspecto relevante en este estudio está asociado con el uso más racional de los recursos naturales (Garea, Soto, & Vantour, 2008), por medio de la planificación y el ordenamiento del espacio (Soto et al., 2007), además del aumento de la compatibilidad entre las exigencias de los cultivos y las condiciones agroecológicas del medio (Food and Agriculture Organization [FAO], 1997).

Este trabajo tuvo como objetivo definir áreas aptas para el cultivo de papa (*S. tuberosum*) en las zonas agrícolas del estado Carabobo, en la zona central de Venezuela, como herramienta de trabajo, consulta y orientación de cara a las iniciativas que tengan relación con la actividad agrícola en la zona.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estado Carabobo está localizado en la zona centro-norte del país, entre las coordenadas geográficas 09°48' y 10°35' de latitud Norte, con 67°31' y 68°26' de longitud Oeste (figura 1); posee una superficie de 4.651 km², donde solo el 42,53% (1.973 km²) es adecuado para el desarrollo de la actividad agrícola.

La precipitación promedio anual para el estado Carabobo es de 1.100 mm. Se presentan montos de lluvia entre 1.100 y 1.300 mm en la región natural de la depresión del lago de Valencia, conformada

por montañas bajas, colinas y valles que drenan por el relieve de planicie aluvial y la llanura lacustre (Olivares, 2018). La mayor parte del territorio se categoriza dentro del tipo climático denominado Subhúmedo Seco (C1), que abarca una superficie aproximada de 2.791,15 km² para un 60% de la totalidad de la entidad (Olivares, Hernández, Cohelo, et al., 2018a).

Desde el punto de vista agrológico, en Carabobo la mayor proporción de suelos se ubica en la Clase I, seguida de las demás clases hasta los suelos Clase VIII. Estas clases representan los suelos con características idóneas o menos limitantes para la producción agrícola en la entidad, abarcando una superficie de 103.700 ha (Comerma, 2009).

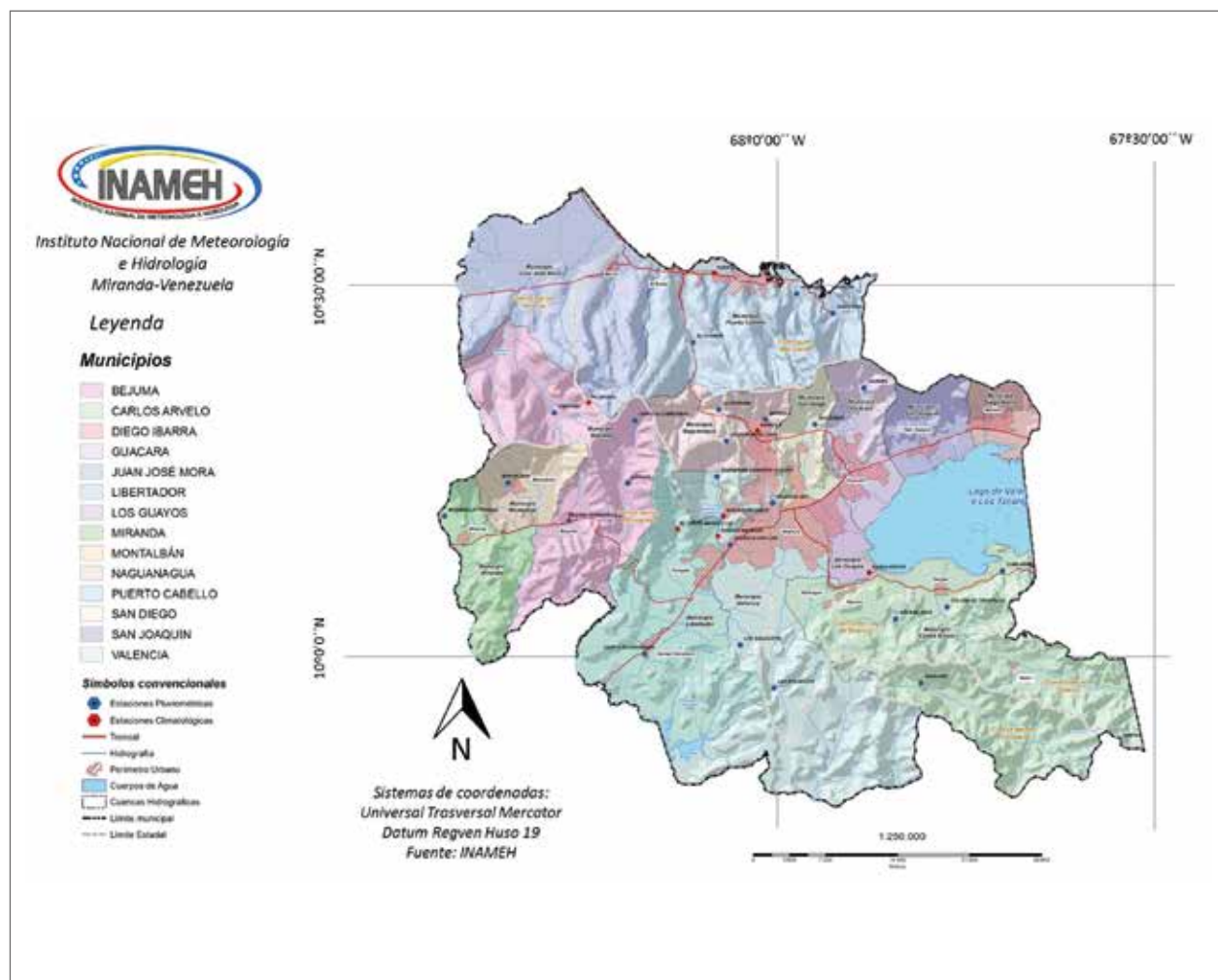


Figura 1. Ubicación geográfica del estado Carabobo, zona central de Venezuela.
Fuente: Elaboración propia

Componentes metodológicos de la sectorización ecoterritorial

La sectorización ecoterritorial es un recurso de especial interés para el desarrollo agrícola de la zona bajo estudio, debido a que se establecen condiciones ambientales óptimas para las especies vegetales donde sea posible el máximo potencial de la producción; es decir, se logra interrelacionar los factores que repercuten en el desarrollo del cultivo:

clima, suelo, relieve, requerimientos agroclimáticos, para establecer un mapa que muestre el grado de aptitud de las tierras.

La figura 2 describe la forma de aplicar los procedimientos incluidos en la metodología de sectorización ecoterritorial, que trata de estimar la aptitud de tierras y productividad potencial con particular referencia al sistema de producción del cultivo de papa (*S. tuberosum*).

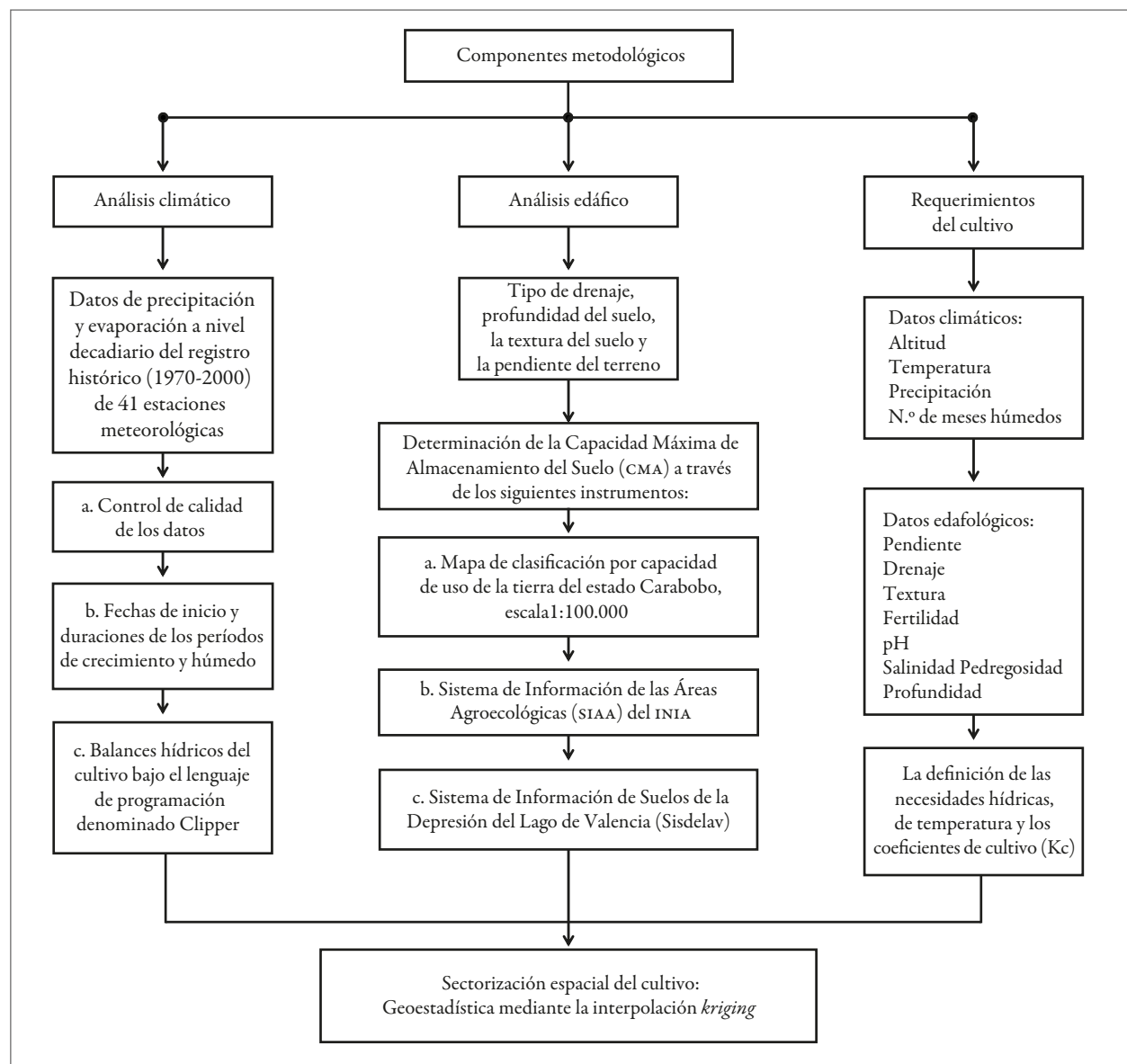


Figura 2. Descripción de las actividades y sus componentes metodológicos para la sectorización ecoterritorial del cultivo de papa (*S. tuberosum*) en Carabobo, Venezuela. Fuente: Elaboración propia

Fase de análisis climático

Para la elaboración de los balances hídricos del cultivo, se realizó el análisis de la precipitación decadiaria de Carabobo (acumulados de 10 días de la precipitación) del período (1970-1999), correspondiente a 41 estaciones meteorológicas. La depuración y complementación de las series de datos a nivel diario, para convertirlos posteriormente en decadiarios, se realizó a través de un control de calidad de la información meteorológica, así como análisis estadísticos y procedimientos ya establecidos para la estimación de datos diarios faltantes y englobados (Hernández et al., 2017; Olivares, Cortez, Parra, Rodríguez, & Guevara, 2013; Parra & Cortez, 2005).

Para la verificación de la homogeneidad de los datos de precipitación y evaporación se aplicaron test no paramétricos. La obtención del registro histórico de precipitación a nivel diario se realizó a través del cálculo de los datos faltantes, por medio de métodos de correlación, las distancias y valores normales; igualmente, para su desenglobe se determinaron métodos del vecino más cercano (Olivares et al., 2013). En lo referente a datos diarios faltantes de evaporación de superficie del aire libre de tina tipo A, se aplicaron métodos de homogeneidad regional y vecino más cercano.

La estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia o potencial (ETp) se realizó por el método de Penman-Monteith FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006); posteriormente, para conocer la oferta y la demanda hídrica de las tierras con aptitud agrícola para el cultivo del estado Carabobo, se calcularon los Balances Hídricos del cultivo para cada estación climatológica bajo un lenguaje de programación llamado Clipper (Hernández et al., 2017), que arrojó información para realizar el análisis de los riesgos edafoclimáticos.

El programa de computación Clipper calculó en promedio 42 balances del cultivo, asumiendo cada una de las décadas del año como fecha de siembra;

asimismo, estimó la precipitación efectiva a partir de la pendiente del terreno, calculó el almacenamiento de agua en el suelo durante las tres décadas anteriores a la fecha de siembra —a fin de garantizar un contenido de humedad adecuado para ese momento— y estimó la disminución del rendimiento por déficit a través del índice Ky y disminución por excesos a través del método de la Food and Agriculture Organization (FAO, 1997), debido a que es una metodología práctica y útil, adaptada a las condiciones tropicales de los sistemas productivos e interacción ecológica.

Se desarrolló la metodología de Franquín (1983), para el análisis de las fechas de inicio, duración y láminas de agua acumulada por precipitación para los períodos de crecimiento y húmedo, de acuerdo con los niveles de probabilidad de ocurrencia de 50 % y 75 %. Dicha información puede resultar de utilidad para reducir la incertidumbre de las actividades agrícolas, así como en las etapas de crecimiento del cultivo que están relacionadas con sus requerimientos hídricos.

Fase de análisis edáfico

Se utilizó como base el mapa de clasificación por capacidad de uso de la tierra del estado Carabobo, realizado por la Dirección General de Recursos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas (1971), escala 1:100.000, por ser el único estudio de suelos disponible (Hernández et al., 2017). Las cualidades edáficas analizadas fueron el tipo de drenaje, la profundidad, la textura de los suelos y la pendiente del terreno, variables indispensables para obtener la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (CMA).

Adicionalmente, se utilizó el Sistema de Información de las Áreas Agroecológicas (SIAA), del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA, 2016), y el Sistema de Información de Suelos de la Depresión del Lago de Valencia (Sisdelay) (Viloria, Estrada, & Rey, 1998).

Fase de evaluación de los requerimientos del cultivo

La definición de los requerimientos del cultivo se realizó por medio de los aportes de Benacchio (1982), quien compiló las necesidades hídricas, de

temperatura y otros factores climáticos que afectan el desarrollo de diferentes cultivos en ambientes tropicales (tabla 1). Los valores de coeficiente de cultivo (Kc) fueron tomados de Doorenbos y Kassam (1979) y Doorenbos y Pruitt (1975).

Tabla 1. Resumen de los requerimientos del cultivo de papa (*S. tuberosum*)

Requerimientos edafoclimáticos		Papa
Clima	Altitud (m s. n. m.)	40-3.000
	Temperatura (°C)	13-30
	Precipitación (mm)	Ciclo: 500-700
		Annual: 1.000-1.200
	Nº de meses húmedos	3
Suelos	Pendiente (%)	≤ 10
	Drenaje	Moderado a excesivo
	Textura	Medias a ligeras
	Fertilidad	Media a alta
	pH	4,8-7,0
	Salinidad (ds/m)	Sensible (1,7)
	Pedregosidad	Hasta clase 3
		> 0,50
Necesidades nutricionales (kg/ha)	Nitrógeno	175
	Fosforo	80
	Potasio	310
	Calcio	120
	Magnesio	40
	Azufre	11

Fuente: Adaptada de Benacchio (1982) e INIA (2016).

De acuerdo con los aportes de Hack et al. (1992), las fases fenológicas de la papa se describen a continuación:

- Emergencia: Aparecen las primeras hojas sobre la superficie del suelo.
- Brotes laterales: Los brotes que surgen desde el tallo principal son aéreos y subterráneos. Los primeros dan lugar a la formación del follaje de la planta y los segundos, a rizomas, que posteriormente engrosarán en la porción distal para la formación de tubérculos.
- Botón floral: Aparecen los primeros botones florales.

- Floración: Se abren las primeras flores.
- Maduración: Debe observarse el cambio de color de la hoja porque hay una relación directa con la maduración del tubérculo. Descubriendo la base de las plantas, se debe ver si la piel de la papa está bien adherida y si no se desprende; por otro lado, la papa está madura cuando al ser presionada con los dedos no pierde su cáscara.

La planta de la papa cuenta con resistencia a la sequía durante el transcurso de sus fases fenológicas, lo que se refleja por el Kc; en este sentido, en la tabla 2 se observan los valores del índice Kc para la planta.

Tabla 2. Coeficientes de cultivo (Kc) de papa para un cultivo con ciclos de crecimiento de 140 días

Década	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
(140 días)	0,50	0,50	0,50	0,60	0,75	0,85	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	0,65	0,70	0,75

Fuente: Adaptada de Doorenbos y Kassam (1979) y Doorenbos y Pruitt (1975)

Los requerimientos hídricos varían entre 1.000-1.200 mm, bien distribuida durante el ciclo del cultivo. Las mayores demandas existen en las etapas de germinación y crecimiento de los tubérculos, por lo que es necesario efectuar riego del cultivo en los períodos más críticos del cultivo, cuando no se presenta precipitación. Las etapas finales del desarrollo del cultivo son las más susceptibles al déficit hídrico, en las cuales se puede reducir el rendimiento considerablemente en relación con si esta deficiencia ocurre en etapas iniciales; además, no tolera la sequía por períodos largos.

Sectorización ecoterritorial

El principal objetivo de esta metodología es comparar los requerimientos del cultivo en cuanto al suelo y clima, y la “oferta” edafoclimática del área, para cuantificar qué tan satisfactoriamente son cubiertos

los requerimientos y, en consecuencia, qué grado de aptitud tiene el área para el cultivo de papa. En primera instancia, se analizan separadamente las relaciones suelo, clima y cultivo, y luego se integran para obtener un resultado único (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables [MARNR], 1989; Olivares, Hernández, Arias, Molina, & Pereira, 2018a).

El resultado del balance permitió analizar la evapotranspiración máxima del cultivo (ETm), el rendimiento del cultivo y factor del efecto del déficit sobre el rendimiento (Ky), el coeficiente de cultivo (Kc), la relación entre la demanda de agua del cultivo (evapotranspiración real del cultivo [ETa]) y la demanda del cultivo de referencia (ETp), además del rendimiento porcentual, para una fecha estimada con garantías de humedad inicial en los suelos.

La FAO (2012) abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua, y propuso una ecuación sencilla que relacionaba la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa correspondiente en la evapotranspiración (ET). Concretamente, la respuesta del rendimiento a la ET se expresa como en la ecuación 1.

$$(1 - \frac{Y_a}{Y_m}) = K_y (1 - \frac{ET_a}{ET_m}) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde Y_a es el rendimiento real cosechado, Y_m es el rendimiento máximo cosechado, K_y es el factor del efecto del déficit sobre el rendimiento, ET_a es la evapotranspiración real del cultivo y ET_m es la evapotranspiración máxima del cultivo.

El factor K_y capta la esencia de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en un cultivo, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos. La relación ha demostrado una notable validez y ha brindado un procedimiento utilizable para cuantificar los efectos de los déficits de agua sobre el rendimiento (FAO, 2012; Olivares, Hernández, Arias, Molina, & Pereira, 2018b).

De acuerdo con la FAO (2012), el procedimiento de cálculo de la ecuación 1 para determinar el rendimiento real Y_a consta de cuatro pasos: i) estimar el máximo rendimiento (Y_m) de una variedad adaptada de cultivo, según su comportamiento genético y el clima, suponiendo que los factores agronómicos (p. ej., agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes; ii) calcular la evapotranspiración máxima (ET_m) según metodologías establecidas y teniendo en cuenta que se han suministrado todos los requerimientos de agua del cultivo; iii) determinar la evapotranspiración real (ET_a) del cultivo en el caso específico, de acuerdo con el suministro de agua disponible para el cultivo, y iv) evaluar el rendimiento real (Y_a) mediante la selección apropiada del factor de respuesta (K_y) para todo el período de crecimiento o en cada una de las distintas etapas de crecimiento.

El estudio *Riego y Drenaje* N.º 33 de la FAO (Doorenbos & Kassam, 1979) recomendó procedimientos para estimar el máximo rendimiento a partir de datos locales disponibles de rendimientos máximos de cultivos, o basados en el cálculo de la biomasa máxima y el índice de cosecha correspondiente, mediante el enfoque de zona ecológica (Kassam, 1977). Posteriormente, se estableció un criterio general de adaptabilidad, de acuerdo con la relación Y_a/Y_m (tabla 3).

Tabla 3. Rangos de adaptabilidad de la relación Y_a/Y_m

Grado de aptitud	Rangos (Y_a/Y_m)
Apta	$Y_a > 75\% Y_m$
Moderadamente apta	$50\% Y_m < Y_a < 75\% Y_m$
Marginalmente apta	$25\% Y_m < Y_a < 50\% Y_m$
No apta	$Y_a < 25\% Y_m$

Fuente: Elaboración propia

Luego, se calcularon los requerimientos hídricos de los cultivos (ET_a) para cada rango de aptitud, tanto para el ciclo vegetativo como para las etapas críticas, y se compararon con la oferta climática del área, definida como la precipitación efectiva del 75% de probabilidad de ocurrencia. Posteriormente, se calculó un índice de adaptabilidad climática total (ecuación 2) para determinar el grado de aptitud (tabla 4).

$$IT = (0,4 \times ICV) + (0,6 \times IFC) \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde IT es el índice total, ICV es el índice del ciclo vegetativo e IFC es el índice de la fase crítica.

Tabla 4. Rangos de adaptabilidad según el clima

Grado de aptitud	Rangos (IT)
Apta	> 2,26
Moderadamente apta	1,51-2,25
Marginalmente apta	0,76-1,50
No apta	< 0,76

Fuente: Elaboración propia

Se estableció el modelo de variación por medio de geoestadística (Webster & Oliver, 1990), lo que permitió definir la estructura espacial de propiedades y su estimación en sitios no muestreados mediante la interpolación *kriging*. Para el mapeo de las variables edafoclimáticas se realizó una interpolación mediante la técnica del *kriging* puntual. Los estimados fueron calculados usando los parámetros de los semivariogramas ajustados mediante la ecuación 3.

$$\check{Z}_{(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde n es el número de muestras vecinas a $Z(x_0)$; λ es el peso de ponderación aplicado a cada $Z(x_i)$; $\check{Z}(x_0)$ es el estimado de Z en x_0 y $Z(x_i)$ es la muestra vecina a x_0 .

Una vez generado el archivo con las variables interpoladas, fue editado en el SIG Arcview v.3.2. (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 1996), para ser visualizado, analizado y clasificado, permitiendo examinar la variación espacial de las áreas aptas o no del cultivo bajo estudio.

Resultados y discusión

Aptitud de las tierras

La extensión superficial de los suelos aptos para el cultivo de papa en el municipio Libertador del estado Carabobo es de 90 km², por lo que se considera el municipio con mayor extensión de tierras cultivables para este rubro en la entidad. Las precipitaciones medias anuales van desde 1.500 mm en el sur, hasta 1.000 mm en la zona norte, correspondiente a la depresión del lago de Valencia y la serranía del Litoral. La tabla 5 presenta los resultados de la sectorización ecoterritorial de la papa en el estado Carabobo.

Las fechas de siembra estimadas para los suelos aptos se encuentran entre la tercera década de mayo y la primera década de agosto en el área centro-norte; hacia el norte de la localidad de Tocuyito, las fechas de siembra óptimas se encuentran entre la primera década de junio y la primera década de agosto; por otra parte, al noroeste las fechas de siembra idóneas corresponden con la segunda década de junio y la segunda década de julio.

Hacia el sur del municipio Libertador, la fecha de siembra se estimó en algunos sectores entre la segunda década de junio y la tercera de agosto; por último, en lo referente a los suelos aptos, la fecha de siembra en algunas zonas del centro y sureste se estimó entre la primera y tercera década de julio.

Es conveniente indicar que, desde la siembra del cultivo, el contenido de humedad del suelo ejerce una influencia considerable en todo el ciclo de desarrollo. En el caso de los excesos de agua, estos tienden a reducir el porcentaje de almidones y favorece la aparición de ciertas plagas, enfermedades y malezas. Por otra parte, las variaciones en el contenido de humedad generan modificaciones en el engrosamiento de los tubérculos, grietas, surcos, estrechamientos, entre otras malformaciones. Estudios reportan que la aparición de un déficit hídrico antes de la tuberización estimula el alargamiento de las raíces, donde ocurre un aumento

Tabla 5. Superficie (km²) de la aptitud de cultivo de papa (*S. tuberosum*) por municipio del estado Carabobo

Municipio / Superficie (km ²)	Apto (A1)	Moderadamente apto (A2)	No apto (NA)	Total
Diego Ibarra	6	0	107	113
San Joaquín	9	0	100	109
Guacara	59	3	103	165
San Diego	23	19	68	110
Naguanagua	7	34	143	184
Los Guayos	17	0	39	56
Puerto Cabello	0	0	85	85
Juan José Mora	0	0	295	295
Miranda	2	0	170	172
Montalbán	8	0	107	115
Bejuma	23	19	118	160
Libertador	90	92	211	393
Valencia	65	15	211	291
Carlos Arvelo	28	122	342	492
Total	337	304	2.099	2.740

Fuente: Elaboración propia

significativo del número de tubérculos, considerando que su tamaño se reduce notablemente (Morales, Morales, & Rodríguez, 2015b).

Particularmente, la sequía en los territorios agrícolas venezolanos afecta el crecimiento vegetativo, así como inhibe la tuberización, tamaño y calidad del tubérculo de papa (Cortez et al., 2018; Parra et al., 2018). Los períodos críticos de necesidades hídricas en el cultivo de la papa son inmediatamente después de la emergencia y durante la tuberización (Morales et al., 2015b; Pino, Inostroza, Kalazich, Gutiérrez, & Castro, 2012).

Con respecto a los suelos moderadamente aptos para el cultivo de papa, estos abarcan 92 km² de las tierras agrícolas del municipio. La fecha de siembra predominante es entre la segunda y tercera década de mayo, tal como se aprecia en la figura 3. En algunas áreas del sur y centro de Libertador, la fecha se estimó entre la tercera década de mayo y la tercera de junio; en áreas puntuales del norte, entre la primera década de junio y la tercera década de julio; hacia el noroeste, en algunos sectores se estimó únicamente para la primera década de julio, mientras que en otros, únicamente en la segunda década de julio.

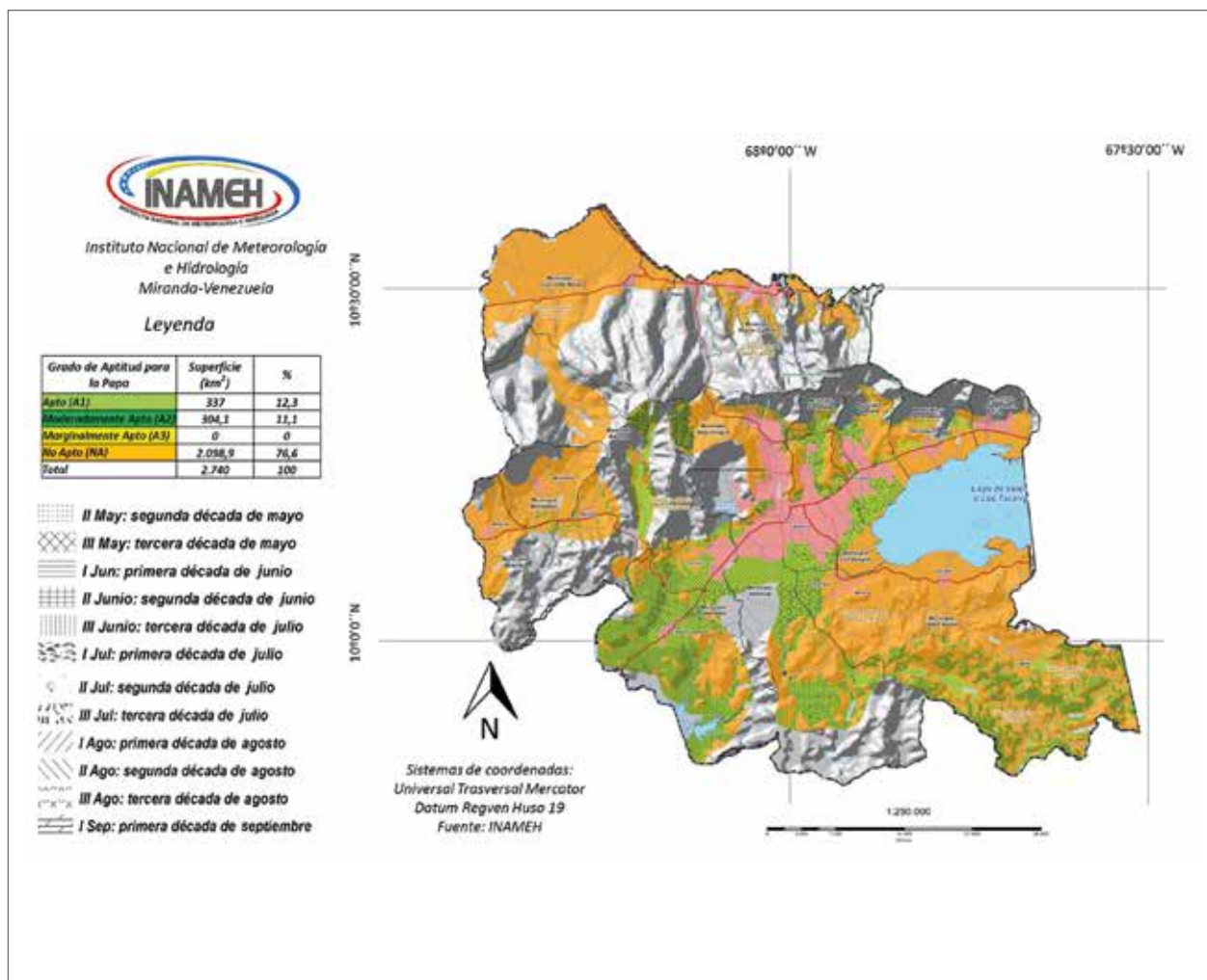


Figura 3. Sectorización ecoterritorial del cultivo de papa (*S. tuberosum*) en el estado Carabobo, Venezuela. Fuente: Elaboración propia

Las tierras agrícolas del municipio Valencia, en donde se asienta la capital del estado Carabobo (la ciudad de Valencia), cuentan con 65 km² de suelos aptos para el cultivo de papa, con fecha de siembra estimada para la segunda década de mayo en el sureste y norte; hacia el sur de la ciudad de Valencia, las fechas de siembra van desde la tercera década de mayo hasta la primera de agosto; hacia el sur del municipio, las fechas se encuentran entre la segunda década de junio y la segunda década de agosto, mientras que el resto de los suelos aptos pueden sembrarse entre la primera y tercera década de julio.

En este municipio se identificaron 15 km² de suelos moderadamente aptos. Las áreas clasificadas como moderadamente aptas para el cultivo de papa se

ubican al norte de la ciudad de Valencia, en zonas de colinas y montañas, en donde puede obtenerse entre 90% y 95% de rendimiento durante la cosecha del cultivo. Las fechas de siembra estimadas para los suelos moderadamente aptos en el municipio van desde la segunda década de mayo en el sur y norte; entre la primera década de junio y la segunda década de julio, en áreas localizadas del norte de Valencia, y entre la tercera década de julio y la primera década de septiembre, hacia el centro norte del municipio, para obtener rendimientos máximos de 95%.

En la figura 3, se observa que en el municipio Guacara predominan los suelos aptos para el cultivo de papa, en áreas bajas de las colinas, montañas y la zona correspondiente a la llanura lacustre del norte del

Lago de Valencia, lo que representa aproximadamente 59 km² de suelos de textura franca y moderadamente drenados, con fecha de siembra estimada entre la segunda y tercera década de julio hacia el este y noreste, mientras que el resto de los suelos aptos presentan fecha de siembra tentativa para la tercera década de julio, únicamente para obtener rendimientos entre 95 % y 100 %.

Con relación a los suelos moderadamente aptos para el cultivo de papa en el municipio Guacara, se identificaron 3 km² con fecha de siembra estimada para la tercera década de julio únicamente, considerando que el máximo rendimiento que se puede obtener es inferior al 95 %, debido a que los suelos son de textura ligera y excesivamente drenados, por lo que la humedad necesaria durante la fase crítica del cultivo es mucho menor que en suelos de texturas medianas.

Por otra parte, en aproximadamente 122 km² del municipio Carlos Arvelo se estimaron fechas de siembra entre la segunda década de mayo y la primera década de junio, con posibilidades de obtener rendimientos durante la cosecha de 90 % a 95 %, ya que corresponden a zonas moderadamente aptas para el cultivo de papa, por sus condiciones edafoclimáticas y porque la disponibilidad hídrica para la fase crítica del rubro se encuentra entre 315 y 275 mm.

El municipio Bejuma cuenta con 23 km² de suelos aptos para el cultivo de papa, principalmente en el área del valle de Chirgua, en el centro del municipio. La fecha de siembra estimada para estas zonas es desde la segunda década de mayo hasta la segunda década de junio, mientras que, hacia la localidad de Bejuma, las fechas se estimaron entre la tercera década de mayo y la tercera de junio. En las zonas altas del valle, la fecha coincide entre la primera década de junio y la tercera del mes de julio; adicionalmente, se reconoce al sector de Chirgua como un área de cultivo de papa de los más importantes en el país, por el acondicionamiento técnico de los agricultores.

De igual forma, se contabilizaron 19 km² de suelos moderadamente aptos para la papa en el municipio, que se encuentran en zonas de colinas y montañas, con pendientes entre 6 % y 10 %, así como suelos de texturas arenosas y excesivamente drenados que permiten alcanzar un máximo de 95 % de rendimiento, sembrando entre la primera década de julio y la tercera de agosto. La disponibilidad hídrica en estas tierras de moderada aptitud se encuentra entre 315 y 275 mm durante la fase crítica del cultivo.

El rendimiento del cultivo de la papa en la zona de estudio se debe a la conformación genética del cultivar y de los factores ambientales; en este sentido, se conoce que la temperatura y el número de horas de luz representan los factores ambientales de mayor peso en el ciclo de desarrollo del cultivo, sin dejar de señalar la importante contribución de las variaciones de humedad del suelo producto de las lluvias (Kooman, Fahem, Tegera, & Haverkort, 1996; Pereira, Villanova, Ramos, & Pereira, 2008; Quintero et al., 2009; Streck, Matiolo de Paula, Bisognin, Heldwein, & Dellai, 2006).

Al respecto, Spitters y Schapendonk (1990) establecen que existen variedades de papa tolerantes a la sequía, que mantienen sus estomas abiertos en condiciones severas de déficit hídrico, por lo que mantienen la fotosíntesis y el daño en los tejidos de las hojas es menor, lo que provoca unos rendimientos altos.

Según Morales et al. (2015a), la alta tolerancia a la sequía que poseen algunas variedades de papa se debe principalmente a características anatómicas y fisiológicas favorables para adaptarse a las condiciones de estrés, como una menor densidad estomática, estomas más pequeños, una mínima disminución en el contenido hídrico relativo y una mayor estabilidad de la membrana celular.

Para cubrir las necesidades hídricas del cultivo, se puede recurrir al riego en épocas secas o durante eventos de sequía, con el fin de mantener una producción constante (Olivares & Zingaretti, 2018). Sin embargo, existen zonas en Carabobo donde

este sistema es escaso o nulo, debido a un sin número de factores que condicionan su uso, como la inaccesibilidad a fuentes de agua cercana, la ausencia del servicio y la falta de infraestructura, entre otros.

La mayoría de los sistemas de producción de papa en el estado Carabobo se caracterizan por una dependencia de semilla importada, la insuficiencia de semilla certificada, el uso de variedades tradicionales con bajo rendimiento y la alta susceptibilidad de enfermedades (MARN, 2005; Olivares et al., 2017). Adicionalmente, existe un uso inadecuado de los recursos hídricos para riego en algunas zonas, un uso excesivo de plaguicidas y un inadecuado manejo de la fertilización química y orgánica.

Conclusiones

Se concluyó que la mayor superficie corresponde a las zonas con aptitud agrícola que ocupan 337 km² y representan el 12,3% de la superficie del estado Carabobo, cuyas características de clima y suelo permiten el establecimiento sostenido del cultivo y sus limitaciones de agua y suelos son leves. Estas limitaciones pueden ser corregidas o manejadas con prácticas de manejo de riego o conservación de suelos y aguas.

Con el mapa de sectorización ecoterritorial elaborado fue posible diferenciar áreas con tres categorías de aptitud agroclimática para el cultivo de papa. Esta jerarquización permitió seleccionar áreas idóneas para garantizar una producción sostenible del rubro y constituye una alternativa importante para mejorar

los programas de producción agrícola en Carabobo, complementados con la experiencia de los productores y con investigación de campo desarrollada en las comunidades.

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de la metodología planteada permite modelar y caracterizar las variables del medio ambiente a plenitud, además de representar una alternativa idónea que distingue zonas potenciales y zonas en donde es poco probable el desarrollo óptimo del cultivo *S. tuberosum*.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Seguridad Alimentaria y Desarrollo Agrario de la Gobernación del estado Carabobo, Venezuela. Asimismo, agradecen el valioso apoyo técnico de los geógrafos Alexander Arias, Juan Carlos Molina y Yessica Pereira del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), así como a los investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Adriana Cortez, Juan Carlos Rey y María Fernanda Rodríguez.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. (Serie Estudio de Riego y Drenaje N.º 56). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Benacchio, S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el trópico americano*. Maracay, Venezuela: Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Comerma, J. (2009). Suelos mal drenados en Venezuela. *Agronomía Tropical*, 59(1), 25-32.
- Cortez, A., Núñez, M. C., & Rodríguez, M. F. (2007). Adaptabilidad agroecológica del cultivo del aguacate en el estado Aragua, Venezuela. *Bioagro*, 19(2), 7-13.
- Cortez, A., Olivares, B., Parra, R., Lobo, D., Rodríguez, M. F., & Rey, J. C. (2018). Descripción de los eventos de sequía meteorológica en localidades de la cordillera central, Venezuela. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 1(1), 22-44. doi:10.22206/CYAP.2018.VIII.PP23-45.
- Dirección General de Recursos Hidráulicos. (1971). *Capacidad de Uso de las Tierras del Estado Carabobo. Mapa escala 1:100.000*. Caracas, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water. Estudio de Riego y Drenaje N.º 33*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirements*, Estudio de Riego y Drenaje N.º 24. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (1996). Arc View GIS. *The geographic information system for everyone*. (Versión 3.2) [software] by ESRI. Product ID: 825921104087.
- Espinosa, J., & Orquera, A. (2007). Zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en las provincias de: Bolívar, Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua. *Revista Rumipamba*, 21(1), 54-56.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1997). *Zonificación agroecológica. Guía general*. Roma, Italia: autor.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Boletín de suelo y drenaje de la FAO, N.º 66. Roma, Italia: autor.
- Franquín, P. (1983). *Modelos estadísticos sobre potenciales del periodo de crecimiento de cultivos. Información Climática para el Desarrollo - Reviviendo la Revolución Verde*. Maracay, Venezuela: Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Banco Interamericano de Desarrollo.
- Garea, E., Soto, F., & Vantour, A. (2008). Zonificación agroecológica en condiciones de montaña mediante métodos de análisis espacial. Mapping interactivo. *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, 127, 12-18.
- Hack, H., Bleiholder, H., Buhr, L., Meier, U., Schnock-Fricke, U., Weber, E., & Witzemberger, A. (1992). Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien monoud dikotyler Pflanzen-Erweiterte BBCHSkala, Allgemein. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 44(12), 265-270.
- 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.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). (2016). *Aproximación agroecológica para el nuevo modelo de producción agrícola en Venezuela*. Maracay, Venezuela: autor.
- Kassam, A. H. (1977). *Net biomass production and yield of crops. Present and potential land use by agro-ecological zones project*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization (FAO).
- Kooman, P., Fahem, M., Tegera, P., & A. Haverkort. (1996). Effects of climate on different potato genotypes. 1. Radiation interception total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*, 5(3-4), 193-205. doi:10.1016/S1161-0301(96)02031-X.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN). (2005). *Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela*. Caracas, Venezuela: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (MARNR). (1989). *Metodología para zonificación de cultivos*. Caracas, Venezuela: DGISAV, MARNR.
- Morales, R. A., Morales, T. A., & Rodríguez, S. D. (2015a). Identificación de variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) tolerantes a sequía y altas temperaturas, mediante métodos anatómicos y fisiológicos. *Revista Agrotecnia de Cuba*, 39(1), 8-20.
- Morales, R. A., Morales, T. A., & Rodríguez, S. D. (2015b). Índices agronómicos para determinar tolerancia a sequía en variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agrisost*, 22(1), 1-8. doi:10.1000/agr.v22i1.122.
- Olivares, B. (2018). Condiciones tropicales de la lluvia estacional en la agricultura de secano de Carabobo, Venezuela. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 86-102. doi:10.17163/lgr.n27.2018.07.
- Olivares, B., & Zingaretti, M. L. (2018). Analysis of the meteorological drought in four agricultural localities of Venezuela through the combination of multivariate methods. *UNED Research Journal*, 10(1), 181-192. doi:10.22458/urj.v10i1.2026.
- Olivares, B., Cortez, A., Parra, R., Lobo, D., Rodríguez, M. F., & Rey, J. C. (2017). Evaluation of agricultural vulnerability to drought weather in different locations of Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía de LUZ*, 34(1), 103-129.

- Olivares, B., Cortez, A., Parra, R., Rodríguez, M., & Guevara, E. (2013). Aplicación de procedimientos estadísticos para el control de calidad de las series de precipitación mensual de los llanos orientales venezolanos. *Revista de la Facultad de Agronomía de LUZ*, 30(3), 367-391. Recuperado de http://revfacagronluz.org.ve/PDF/julio_septiembre2013/v30n3a2013367391.pdf.
- Olivares, B., Hernández, R., Arias, A., Molina, J. C., & Pereira, Y. (2018a). Identificación de zonas agroclimáticas potenciales para producción de cebolla (*Allium cepa* L.) en Carabobo, Venezuela. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 6(2), 70-82.
- Olivares, B., Hernández, R., Arias, A., Molina, J. C., & Pereira, Y. (2018b). Zonificación agroclimática del cultivo de maíz para la sostenibilidad de la producción agrícola en Carabobo, Venezuela. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(2), 139-159.
- Olivares, B., Hernández, R., Coelho, R., Molina, J. C., & Pereira, Y. (2018a). Analysis of climate types: Main strategies for sustainable decisions in agricultural areas of Carabobo, Venezuela. *Scientia Agropecuaria*, 9(3), 359-369. doi:10.17268/sci.agropecu.2018.03.07.
- Olivares, B., Hernández, R., Coelho, R., Molina, J. C., & Pereira, Y. (2018b). Spatial analysis of the water index: an advance in the adoption of sustainable decisions in agricultural territories of Carabobo, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 60(1), 277-299.
- Ovalles, F., Cortez, A., Rodríguez, M. F., Rey, J. C., & Cabrera-Bisbal, E. (2008). Variación geográfica del impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela. *Agronomía Tropical*, 58(1), 37-40.
- Paredes-Trejo, F., & Olivares, B. (2018). El desafío de la sequía en Venezuela. En J. Núñez Cobo & K. Verbist (Eds.), *Atlas de Sequía de América Latina y el Caribe* (pp. 127-136). París, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Unesco) y Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (Cazalac).
- Parra, R., & Cortez, A. (2005). Control de calidad de series de precipitación de las series de precipitación del INIA Venezuela en el periodo 1970-2000. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 5-6, 63-73.
- Parra, R., Olivares, B., Cortez, A., Lobo, D., Rodríguez, M. F., & Rey, J. C. (2018). Características de la sequía meteorológica (1980-2014) en dos localidades agrícolas de los andes venezolanos. *Revista de Investigación*, 42(95), 38-55.
- Pereira, A., Villanova, N., Ramos, V., & Pereira, A. (2008). Potato potential yield based on climatic elements and cultivar characteristics. *Bragantia Campinas*, 67(2), 327-334. doi:10.1590/S0006-87052008000200008.
- Pino, M., Inostroza, F., Kalazich, B., Gutiérrez, R., & Castro, M. (2012). *El desafío de lograr variedades de papa y trigo tolerantes al cambio climático. Curso teórico-práctico: Evaluación de la Tolerancia a Factores Abióticos*. Cusco, Perú. Recuperado de http://platina.inia.cl/ftg_cluype.
- Pla-Sentís, I. (2010). *Degradación de suelos y desastres naturales: enfoque hidrológico*. Trabajo presentado en el XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.
- Quintero, I., Montero, F., Zambrano, J., Meza, N., Maffei, M., Valera, A., & Álvarez, R. (2009). Evaluation of eleven promissory clones of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Trujillo state. I. Growth, developing and yield. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26(3), 362-381. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182009000300004&lng=es&tlng=en.
- Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS). (2017). *Retos y oportunidades de la seguridad alimentaria y nutricional en las Américas. El punto de vista de las Academias de Ciencias*. Ciudad de México: IANAS.
- Rodríguez, L. (2010). Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 9-17.
- Romero, L., & Monasterio, M. (2005). Papas negras, papas de paramo: Un pasivo socioambiental de la modernización agrícola en Los andes de Venezuela. ¿Es posible recuperarlas? *Boletín Antropológico*, 23(64), 107-138.
- Salazar, M., Zambrano, J., & Valecillos, H. (2008). Evaluación del rendimiento y características de calidad de trece clones avanzados de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agricultura Andina*, 14(2), 101-117.
- Sediyama-Chohaku, G., Ferraira-Melo, J. C., Rosa-Dos Santos, A., Ribeiro, A., Heil-Costa, M., Hamakawa, P., ... Costa, L. (2001). Zoneamiento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9(3), 501-509.
- Soto, F., Hernández, A., Vantour, A., Morales, M., Lopetegui, C. M., Hernández, O., ... Pérez, A. (2007). Zonificación agroecológica de la cordillera de Guaniguanico. *Cultivos tropicales*, 28(1), 41-55.
- Spiters, C., & Schapendonk, A. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil*, 123(2), 193-203. doi:10.1007/BF00011268.
- Streck, N., Matielo de Paula, F., Bisognin, D., Heldwein, A., & Dellai, J. (2006). Simulating the development of field growth potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(1), 1-11. doi:10.1016/j.agrformet.2006.09.012.
- Suárez, G. (2014). Apuntes sobre la zonificación agroecológica de los cultivos. Particularidades en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 36-44.
- Viloria, J., Estrada, C., & Rey, J. C. (1998). Sistema de Información de Suelos de la Depresión del Lago de Valencia (SisdelaV). *Venezuelas*, 6(1-2), 2-9.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (1990). *Statistical methods in soil and land resource survey*. Nueva York, EE. UU.: Oxford University.