

Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para el cultivo de cebolla ocañera



Gobernación
de Norte de
Santander



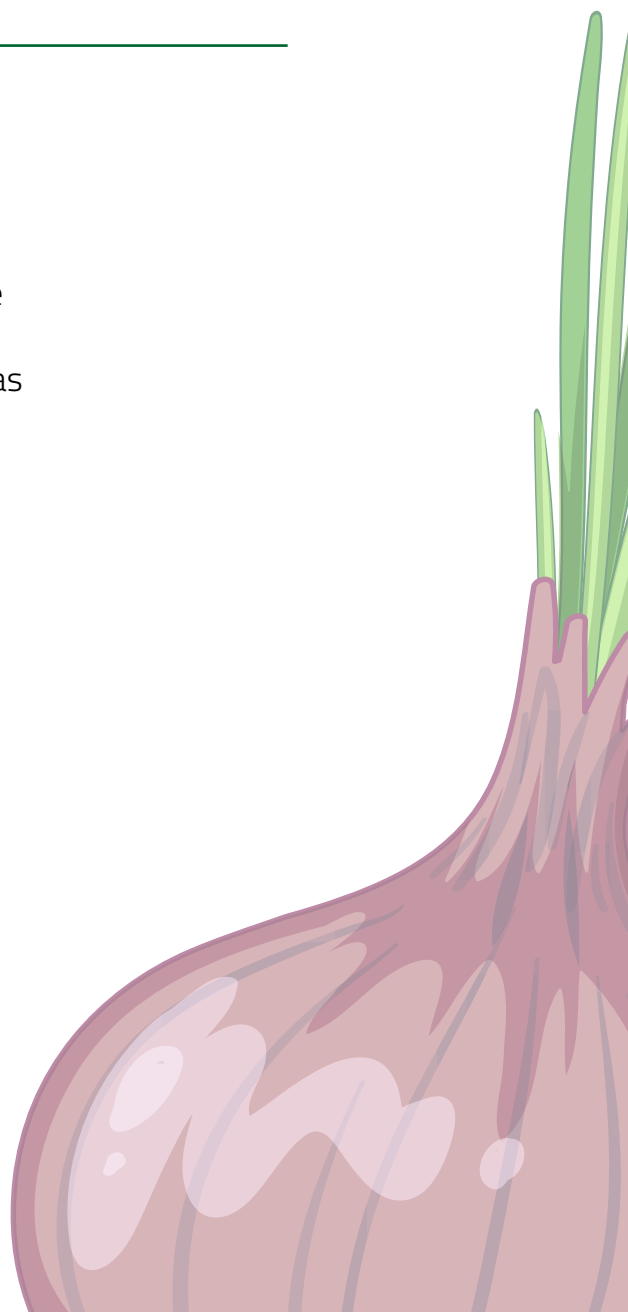
AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria



Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para el cultivo de cebolla ocañera

Autores:

Douglas Andrés Gómez-Latorre
Gustavo Alfonso Araujo Carrillo
Jhon Mauricio Estupiñán Casallas
Andrea Onelia Rodríguez Roa
Elizabeth Rochel Ortega
Yanine Rozo Leguizamón
Adriana Patricia Tofiño Rivera





Gobernación
de Norte de
Santander



AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para el cultivo de cebolla ocañera. / Douglas Andrés Gómez Latorre [y otros seis] – Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2024.

112 páginas (Colección Nuevo Conocimiento Agropecuario)
Incluye referencias bibliográficas, ilustraciones y mapas.
ISBN e-Book: 978-958-740-736-5

1. Cebolla 2. Taxonomía 3. Morfología vegetal 4. Variedades 5. Cultivo 6. Análisis del suelo
7. Balance hídrico del suelo 8. Calidad del suelo 9. Ocaña (Colombia)

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

**Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
(AGROSAVIA)**

Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14, vía
Mosquera-Bogotá, Mosquera. Código postal 250047, Colombia.

Centro de Investigación La Suiza, sede Cúcuta.
Calle 6N n.º 1AE-196 Ceiba II Cúcuta, Norte de Santander.
Código postal: 540003, Colombia.

Centro de Investigación Motilonia. Kilómetro 5, vía a Becerril,
Agustín Codazzi, Cesar. Código postal: 202050, Colombia.
Centro de Investigación Palmira. Diagonal a la intersección
de la carrera 36A con calle 23, Palmira, Valle del Cauca.
Código postal: 763533, Colombia.

Esta publicación es resultado de investigación del proyecto
"Construcción de un modelo para la producción sostenible
de cebolla de bulbo en la provincia de Ocaña en Norte de
Santander con énfasis en la segmentación de mercado para
genotipos priorizados de cebolla ocañera".

Colección: Nuevo Conocimiento Agropecuario
Tipología: Libro Resultado de Investigación

Fecha de recepción: 5 de septiembre 2023
Fecha de evaluación: 24 de octubre de 2023
Fecha de aceptación: 20 de noviembre de 2023

Publicado: Julio de 2024

Preparación editorial
Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co
Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz
Edición: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Nathalie De la Cuadra N.
Diseño: Mónica Cabiativa Daza
Diagramación: María Paula Berón Ramírez

Citación sugerida: Gómez-Latorre, D. A., Araujo Carrillo, G. A., Estupiñán Casallas, J. M., Rodríguez Roa, A. O., Rochel Ortega, E., Roza Leguizamón, Y., & Tofiño Rivera, A. P. (2024). *Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para el cultivo de cebolla ocañera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigacion.7407365>

Cláusula de responsabilidad: agrosavia no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

Los autores	11
Introducción	15

17

Capítulo I. Introducción al sistema productivo de cebolla de bulbo ocañera

Introducción	17
La cebolla ocañera	18
Taxonomía.....	20
Descripción morfológica	20
Fenología	21
Sistema productivo de cebolla de bulbo ocañera	23
Variedades	24
La cebolla en cifras	27
Área de estudio	29
Zonas de vida	31
Hidrografía	32
Altitud	32
Áreas de protección legal	32
Aptitud para cebolla de bulbo	33

Capítulo II. Tiempo térmico para la cebolla ocañera

Generalidades	35
Cálculo de los grados día acumulados (GDA)	36
Los grados día acumulados y la cebolla ocañera	37
Información utilizada y modelación espacial para el cálculo de los GDA	37
Cálculo de los GDA	40
Distribución espacial de los GDA	41

Capítulo III. Determinación de la huella hídrica para la cebolla ocañera

Alcance del estudio para la determinación de la huella hídrica	47
Datos de entrada para el cálculo de la huella hídrica	48
Información utilizada	48
Propiedades hidrofísicas del suelo	49
Datos del cultivo	52
Selección de las fechas de siembra para la simulación de la huella hídrica	52
Cálculo de los componentes azul y verde para el cultivo de cebolla de bulbo	55
Balance hídrico agrícola	56
Evapotranspiración azul y verde	57
Resultados del cálculo de la huella hídrica	58
Semestre 1	58
Semestre 2	62

Contexto de la degradación de suelos	68
Desertificación	68
Salinización	70
Carbono orgánico	71
Erosión	73
Indicador de calidad de suelos seleccionado	76
La erosividad de la lluvia	78
La erodabilidad del suelo	80
Factores de longitud (L) e inclinación (S) de la pendiente	85
Factor de cobertura	87
Factor de manejo	89
La pérdida de suelo en el área de estudio	90
Conclusiones	95
Referencias	99



Figuras

Figura 1	Invitaciones a eventos locales	18
Figura 2	Ciclo fenológico del cultivo de cebolla de bulbo ocañera	22
Figura 3	Sistema de riego para el cultivo de cebolla. Vereda Los Osos, municipio de Abrego	23
Figura 4	Producción de cebolla común	24
Figura 5	Producción de cebolla Hacaritama	25
Figura 6	Rendimiento de cebolla de bulbo en municipios de la provincia de Ocaña	28
Figura 7	Área sembrada de cebolla de bulbo en el departamento de Norte de Santander	28
Figura 8	Área establecida de cebolla ocañera en el departamento de Norte de Santander	29
Figura 9	Zona de estudio del proyecto para generación de indicadores de calidad	30
Figura 10	Localización de las series climáticas de temperatura en el área de estudio	39
Figura 11	GDA por fecha de siembra en las estaciones ubicadas dentro de los municipios analizados en la provincia de Ocaña.	40
Figura 12.	Distribución espacial de los GDA en los municipios considerados de la provincia de Ocaña en las fechas de siembra del semestre 1.	42
Figura 13.	Distribución espacial de los GDA en los municipios considerados en la provincia de Ocaña en las fechas de siembra del semestre 2.	43
Figura 14	Propiedades físicas de la capa superficial del suelo en la provincia de Ocaña	51
Figura 15	Ubicación geográfica de las estaciones de precipitación usadas para el análisis de la huella hídrica	53
Figura 16	ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 1, condición climática normal	59
Figura 17	ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 1	61
Figura 18	Volumen de agua azul requerida en el semestre 1, para una eficiencia de riego del 75 %	62

Figura 19	ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 2, condición climática normal	63
Figura 20	ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 2	64
Figura 21	Volumen de agua azul requerida en el semestre 2, para una eficiencia de riego del 75 %	65
Figura 22	Comparación de volumen de agua para riego entre el semestre 1 y el semestre 2.	66
Figura 23	Grado de salinización en el área de estudio	71
Figura 24	Stock de carbono en suelos entre 0 y 30 cm en el área de estudio	72
Figura 25	Clases de erosión hídrica en el área de estudio	73
Figura 26	Grado de erosión hídrica en el área de estudio	75
Figura 27	Factor calculado en el área de estudio	79
Figura 28	Factor K calculado en el área de estudio	84
Figura 29	Factor LS calculado en el área de estudio	86
Figura 30	Factor C calculado en el área de estudio	89
Figura 31	Pérdida de suelos actual en el área de estudio	91

Tablas

Tabla 1.	Producción de cebolla por municipios de la provincia de Ocaña	27
Tabla 2	Zonas de vida de Holdridge en la zona de estudio	31
Tabla 3	Aptitud del cultivo de cebolla de bulbo para área de estudio	33
Tabla 4	Localización de estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de los <i>GDA</i> en el área de estudio	38
Tabla 5	Valores de las variables del cultivo usadas para el balance hídrico	52
Tabla 6	Estaciones de precipitación seleccionadas para el análisis de la huella hídrica	54
Tabla 7	Fechas de siembra por condición de humedad seleccionadas para la simulación de la huella hídrica	55
Tabla 8	Área y grado de desertificación en municipios de la zona del proyecto	69
Tabla 9	Parámetros de bondad de ajuste de capas texturales utilizadas	82
Tabla 10	Parámetros de bondad de ajuste de capas de carbono orgánico comparadas	82
Tabla 11	Valores del factor obtenidos para la provincia de Ocaña	83
Tabla 12	Clasificación de erosión hídrica actual o pérdida de suelo	90
Tabla 13	Pérdida de suelos por municipio	92



Los autores

Douglas Andrés Gómez Latorre

Correo electrónico: dagomez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6067-7596>

Ingeniero catastral y geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y magíster en Ciencias-Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia. Es investigador máster senior del Centro de Investigación Tibaitatá y de la Red de Innovación de Cultivos Permanentes de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), donde se desempeña en el área de agroclimatología. Ha enfocado su trabajo en el análisis del riesgo agroclimático y en la climatología aplicada a la agricultura (procesamiento y análisis de información climática). En la actualidad, cuenta con publicaciones relacionadas con análisis del entorno biofísico y climático enfocado a la agricultura.

Gustavo Alfonso Araujo Carrillo

Correo electrónico: garaujo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4314-615X>

Ingeniero forestal de la Universidad Francisco José de Caldas, especialista en Sistemas de Información Geográfica de la misma universidad y magíster en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, con énfasis en Información de Tierras para la Planificación del Territorio, de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba, Bolivia) y el International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) de la University of Twente (Enschede, Países Bajos). Tiene experiencia en la zonificación de riesgos agroclimáticos, el ordenamiento territorial en función de cuencas hidrográficas, la gestión de información de recursos naturales, la identificación de zonas biofísicas homogéneas, el análisis de productos de sensoramiento remoto para la planificación territorial y estadísticas espaciales, principalmente el uso y la aplicación de técnicas de mapeo digital. En la actualidad, se desempeña como investigador máster asociado del Centro de Investigación Tibaitatá y hace parte de la Red de Innovación de Cacao de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Jhon Mauricio Estupiñán Casallas

Correo electrónico: jmestupinan@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8782-7291>

Ingeniero agrícola y magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador máster del Centro de Investigación Tibaitatá y de la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), donde se desempeña en el área de agroclimatología. Tiene experiencia en modelación espacial y temporal de balances hídricos agrícolas, modelación hidrológica, mapeo de variables climáticas aplicadas en investigación con énfasis en el manejo del agua, los requerimientos hídricos, la adaptación a la variabilidad climática y la zonificación agrícola; asimismo, en docencia universitaria y diseño de sistemas de riego y drenaje en el sector privado.

.....

Andrea Onelia Rodríguez Roa

Correo electrónico: arodriguezr@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9279-3607>

Licenciada en Física, magíster en Ciencias-Meteorología y especialista en Geomática. Sus intereses de investigación están en las áreas de agroclimatología, variabilidad y cambio climático, lo que implica el entendimiento de las causas y los impactos de la variabilidad en diferentes escalas de tiempo y espacio. Ha trabajado en evaluación de modelos climáticos globales, generación de escenarios de cambio climático y construcción de sistemas expertos y alertas tempranas en el campo de la agroclimatología. Ha participado en proyectos de investigación en análisis de los factores climáticos relacionados con el crecimiento y el desarrollo de cultivos, el comportamiento de plagas, la zonificación agroclimática y el análisis de riesgos agroclimáticos. En la actualidad, se desempeña como investigadora del Centro de Investigación Tibaitatá de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

.....



Elizabeth Rochel Ortega

Correo electrónico: erochel@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7888-6073>

Ingeniera de producción agrícola y agrónoma, y magíster en Práctica Pedagógica de la Universidad Francisco de Paula Santander. Es profesional de Transferencia y Tecnología del Centro de Investigación La Suiza de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), donde realiza actividades en el componente de extensión y trabajo con comunidades rurales e indígenas a través de metodologías participativas y análisis de redes sociales. Cuenta con publicaciones relacionadas con los sistemas productivos de fríjol, cacao, cebolla, entre otros.

.....

Yanine Rozo Leguizamón

Correo electrónico: yrozo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4723-478X>

Ingeniera agrónoma y magíster en Planeación Socioeconómica. Se ha desempeñado en áreas de la socioeconomía, el desarrollo y la sociología rurales en temas de caracterización de sistemas productivos en hortalizas. Es investigadora máster asociada del Centro de Investigación Palmira y de la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Actualmente es líder del proyecto del Sistema General de Regalías 2059 “Construcción de un modelo para la producción sostenible de cebolla de bulbo en la provincia de Ocaña en Norte de Santander con énfasis en la segmentación de mercado para genotipos priorizados de cebolla ocañera”.

.....

Adriana Patricia Tofiño Rivera

Correo electrónico: atofino@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7115-7169>

Ingeniera agrónoma, magíster en Ciencias Agrarias y PhD en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia. Ha trabajado en investigación y docencia universitaria en recursos fitogenéticos neotropicales, fitopatología y fisiología vegetal, biotecnología y procesos sostenibles de producción de cultivos biofortificados, hortalizas, raíces y tubérculos. Actualmente, es investigadora PhD senior, adscrita a la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

.....



Introducción

La cebolla de bulbo ocañera, o simplemente cebolla ocañera, es un producto de considerable tradición, identidad y arraigo, que durante el último siglo ha permanecido en la memoria histórica de la provincia de Ocaña (Norte de Santander); además, es un eje de la economía campesina y representante de la cultura de la región (Higuera Carrillo, 2022; Verjel Sánchez, 2016). Según Duque M. et al. (1989), la variedad se estableció en el municipio de Ábrego a lo largo del siglo xvii, y posteriormente ocupó zonas productivas en los municipios de La Playa, El Carmen, Ocaña y González (departamento de Cesar). Esta variedad fue comercialmente llamativa gracias a su color y a su corto ciclo, y a que permitía obtener hasta tres cosechas al año.

Sin embargo, en la década de los cuarenta del siglo pasado se reportaban diversos problemas en la región derivados de procesos de intensificación de la agricultura bajo esquemas poco sostenibles, los cuales se basaban en prácticas agrícolas asociadas a sistemas de monocultivo, con consecuencias derivadas de los problemas fitosanitarios, más la degradación progresiva de los suelos a raíz de la erosión (Obregón Botero & Otoyá, 1941). No obstante, la producción de cebolla ocañera se mantuvo intacta, al menos hasta principios del siglo xxi (Duque M. et al., 1989; Quintero, 2004; Verjel Sánchez et al., 2003), cuando se evidenció una reducción de los rendimientos de la cebolla ocañera (también conocida como la variedad común); esto generó un aumento en el uso de semilla procedente del Perú, lo cual hizo desaparecer de forma progresiva la cebolla ocañera tradicional (Lobo, 2022), y pretendió establecerla de forma permanente en la provincia de Ocaña. Ahora bien, la pregunta es: ¿podría convivir esta variedad, roja peruana, con una cebolla ocañera? La respuesta aún está en camino de ser resuelta, sobre todo en el momento que se cuente con una variedad de cebolla ocañera viable y cómo respondería al mercado, principalmente el de la región Caribe.

Sin embargo, el impacto del cambio climático ha venido ejerciendo una presión sobre las áreas cultivables, ya que debido al excesivo uso de fertilizantes nitrogenados y la deforestación por cambio de uso del suelo, pasando de superficies naturales a áreas cultivables mal manejadas, se ha incrementado la degradación de suelos y esto ha hecho que la actividad agrícola difícilmente pueda ser sostenible en el largo plazo. De la misma forma, el aumento desmedido de la temperatura generará problemas de inseguridad alimentaria y reducción de ingresos promedio a los agricultores (Yohannes, 2016).

A nivel regional, las dinámicas del sistema productivo de cebolla y otras actividades socioeconómicas de la región han contribuido a que exista una mayor vulnerabilidad frente a los impactos que pueda ocasionar el cambio climático, entendido esto como una mayor frecuencia, intensidad y duración de eventos climáticos extremos; por ejemplo, sequías y lluvias excesivas (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2012). Es así como, conscientes del reto, el proyecto SGR 2059 “Construcción de un modelo para la producción sostenible de cebolla de bulbo en la provincia de Ocaña en Norte de Santander con énfasis en la segmentación de mercado para genotipos priorizados de cebolla ocañera” muestra los resultados de un análisis territorial que tiene al tiempo térmico, la huella hídrica y la degradación de suelos como elementos que sintetizan una problemática regional, con insumos para el planteamiento de soluciones a una mayor escala.

Los indicadores están disponibles en el Módulo E - Cebolla Ocañera, del Sistema Experto MAPA (véase: <https://semapa.agrosavia.co/>). Este módulo garantiza que cualquier usuario pueda manipular la información y revisar de forma detallada los indicadores de calidad de suelo y agua, y los indicadores térmicos obtenidos en el estudio.



Capítulo I

Introducción al sistema productivo de cebolla de bulbo ocañera

17

Este capítulo brinda una introducción general con temáticas que enriquecen la comprensión de los capítulos que siguen. Dentro de estas temáticas se expone una breve reseña histórica del cultivo, destacando el arraigo, la tradición y la cultura asociada; asimismo, se hace un resumen sobre aspectos biológicos y económicos de la cebolla ocañera, que actualizan y ponen en contexto el panorama actual y futuro del sistema productivo. Finalmente, se describe el área de estudio, con referencias a los aspectos biofísicos relevantes que dan un punto de partida a los posteriores análisis desarrollados en los demás capítulos.

Introducción

La provincia de Ocaña se ubica en inmediaciones del departamento de Norte de Santander. Esta zona se caracteriza por ser una despensa de productos agrícolas para la región y la costa norte del país. Entre los productos sembrados que hay en la zona se destaca la producción de cebolla de bulbo ocañera o cebolla ocañera. Este cultivar es de gran importancia para las familias campesinas de la provincia, dado que de él proviene su principal sustento

económico. Además, la cebolla juega un papel importante en la cultura local, pues hace parte esencial de la cultura culinaria y la medicina tradicional de la región. Las referencias indican que llegó a la región desde la colonia española (Verjel Sánchez, 2016).

La cebolla de bulbo ocañera como tradición de cultivo centenario en la provincia de Ocaña, con el paso del tiempo, se ha convertido en un icono de la *ocañeridad*, y ha inspirado eventos regionales, reinados populares y diversas ferias; esto la ha convertido en una parte importante de la cultura local (Verjel Sánchez, 2016). Es muy común ver que los pobladores de esta región utilizan la cebolla ocañera en encurtidos, preparaciones típicas como el ajiaco macho, tamales y en diversas ensaladas, lo cual denota su importancia en la cultura gastronómica de la provincia.

La cebolla ocañera

El cultivo de cebolla ocañera ha sido muy representativo en la zona, especialmente en el municipio de Ocaña, donde hace más de 100 años se produce y comercializa este producto y se ha convertido en insignia entre los pobladores de la región. La cebolla ha sido objeto de cientos de historias, eventos culturales como reinados y festivales en la década de los setenta y ochenta, como se evidencia en diversas publicaciones de la época (figura 1); de esta manera, es uno de los principales motores de la economía local.



Figura 1. Invitaciones a eventos locales.

Fotos: Elizabeth Rochel Ortega

La agricultura es uno de los principales dinamizadores de la economía rural de la región del Catatumbo, ya que genera un gran número de empleos rurales. Esta actividad hace parte de las principales fuentes de ingresos de sus habitantes, dado que la zona provee de alimentos al centro y norte del país; allí, se destacan los cultivos transitorios y en estos la cebolla de bulbo, la cual es la principal fuente de ingreso para cientos de familias de la región (Pacheco Carrascal et al., 2009), que cuentan con pequeños predios, y la rotación entre diversos cultivos de ciclo corto les permite obtener flujo de caja durante el año (Santacoloma-Varón, 2015).

Al respecto, en el siglo xx, para 1936, el principal ingreso de la región se centró en el comercio con la costa Caribe, desde donde se enviaba, en mayor proporción, cebolla ocañera. Sin embargo, este cultivo ha sido presa de la homogeneización de productos agrícolas propiciada por la globalización y las áreas establecidas con este cultivar han disminuido paulatinamente desde inicios del siglo xxi (Verjel Sánchez, 2019).

En la región, se ha registrado un proceso de mutación del sistema productivo de la imperante cebolla ocañera hacia la foránea cebolla roja peruana. Por tanto, el sistema productivo de cebolla de bulbo ocañera se ha sustituido gradualmente por semillas provenientes de Perú y Ecuador. Los campesinos, ante la falta de apoyo gubernamental y debido a la baja disponibilidad de semilla local y los problemas fitosanitarios que se presentan en la zona, han optado por cebolla peruana, como ellos la denominan, principalmente por su mayor tolerancia a las pudriciones y duración en anaquel (Verjel Sánchez, 2016).

El rescate de la cebolla ocañera en la provincia de Ocaña responde a múltiples razones. En primer lugar, el comercio regional de la cebolla peruana producida en la provincia es altamente sensible al ingreso de grandes volúmenes provenientes de países vecinos. Además, no hay ingreso de semilla que garantice la calidad. En segundo lugar, están los problemas sanitarios crecientes y la calidad del bulbo obtenida para la propagación de la cebolla ocañera no iguala a la foránea (cebolla peruana); esto genera inconvenientes en la comercialización, puesto que la cebolla ocañera no logra competir con los nichos de mercado nacional e internacional. De acuerdo con lo anterior, el posicionamiento de los productos de origen local en el comercio nacional e internacional constituiría una

alternativa más estable para las familias cultivadoras; sin embargo, el proceso de posicionamiento de la cebolla ocañera requiere un esfuerzo territorial en el que converja la gobernanza, las instituciones del sector agroindustrial y una mayor articulación del tejido social en las organizaciones existentes.

Taxonomía

La cebolla de bulbo ocañera hace parte de las familias Liliacea y Amaryllidaceae, puesto que tiene brácteas espatáceas en la flor y por esto pertenece al grupo *aggregatum*. Esta cebolla se obtiene de un bulbo que se reproduce, de clase monocotiledoneae y especie *Cepa* (Ozer & Arin, 2014).

De acuerdo con la clasificación botánica, la cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) cuenta con la siguiente taxonomía:

- Reino: Plantae.
- Subreino: Embriofita.
- División: Magnoliophyta.
- Subdivisión: Angiosperma.
- Clase: Liliopsida.
- Orden: Asparagales.
- Familia: Amaryllidaceae.
- Subfamilia: Allioideae.
- Tribu: Allieae.
- Género: *Allium*.
- Especie: *Allium cepa* L.

Descripción morfológica

El bulbo de la cebolla ocañera es de color rojo claro, de forma ovoide y tiene un sabor ligeramente picante. El tamaño del bulbo es mediano y este depende principalmente de la fertilidad del suelo, las condiciones agroclimáticas y el manejo que tenga el cultivo (Quintero Durán, 1983).



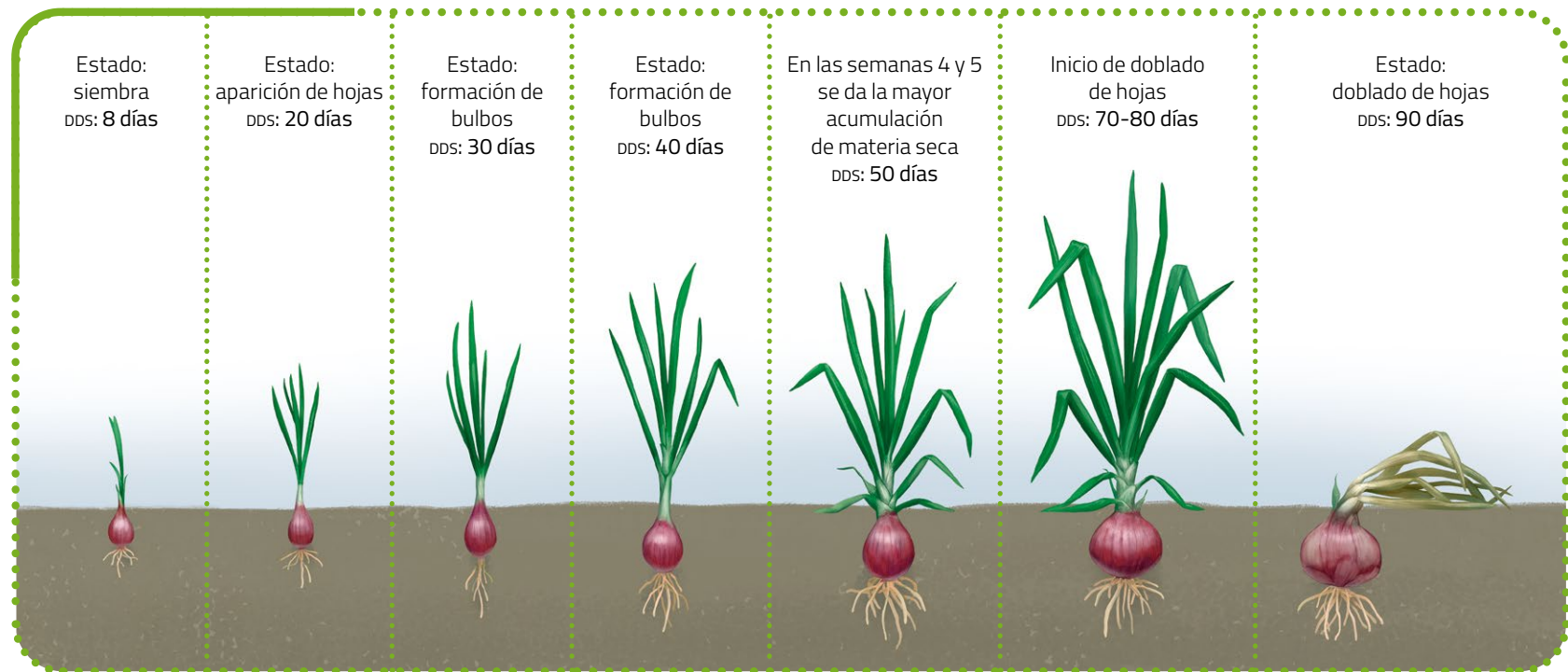
El sistema radicular de la cebolla roja ocañera es muy restringido y superficial, con raíces adventicias de color blanco y muy delgadas (en promedio un milímetro de diámetro) y alrededor de 25 raíces por planta (Jaramillo Henao & Mejía López, 1983).

Fenología

El desarrollo vegetal corresponde a la secuencia de eventos morfogenéticos que dan origen a las estructuras que caracterizan la planta adulta. Uno de estos eventos es la aparición del primordio como una nueva estructura. El intervalo entre dos eventos es denominado etapa. Basados en la serie de eventos del desarrollo, se construyen las escalas fenológicas para los diferentes cultivos (Vélez Vargas et al., 2007).

La propagación de la cebolla ocañera se realiza de forma asexual, a partir de bulbos. En los periodos de crecimiento y desarrollo de la planta, se distinguen dos fases: la primera se inicia con la germinación del bulbo y la emergencia de un brote visible, el cual presenta un color verde y de allí continúa la producción de hojas; la segunda corresponde el desarrollo del bulbo y termina con la inclinación del área foliar (Verjel Manzano et al., 2003).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el informe anual del Programa Nacional de Hortalizas (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 1982), la formación de bulbos se da alrededor de los 30 y 40 días, mientras que la etapa de doblado del follaje comienza a partir de los 70-80 días (figura 2).



dds: días después de la siembra.

Figura 2. Ciclo fenológico del cultivo de cebolla de bulbo ocañera.

Fuente: Elaboración propia, a partir de ICA (1982)

Sistema productivo de cebolla de bulbo ocañera

El cultivo de cebolla de bulbo ocañera se realiza de forma tradicional, con muy poca mecanización. Según Verjel Manzano et al. (2003), el cultivo se desarrolla en eras o cuadros de 1,2 m de ancho por 10 m de largo. Actualmente se evidencia en campo que estas distancias se han ampliado, puesto que el sistema de producción hace parte de la cultura de la zona y por décadas las familias campesinas han transmitido de forma oral los saberes ancestrales de este cultivo a sus generaciones.

Como se evidencia en la zona y de acuerdo con los productores S. Sánchez (comunicación personal, 16 de octubre de 2022) y N. Durán (comunicación personal, 22 de noviembre de 2022), el sistema de riego que se utiliza es por aspersión, y este es más efectivo que el riego por ramillón utilizado anteriormente. El sistema empleado está generalmente fijo en el lote, dispuesto en cuadros; para las líneas de riego, se usan manguera y aspersores. Es interesante resaltar que tanto el diseño de las eras como el sistema de riego se han adaptado para su utilización en los cultivos con los cuales se rota la cebolla, como el fríjol arbustivo y el maíz amarillo (figura 3).

23



**Figura 3. Sistema de riego para el cultivo de cebolla.
Vereda Los Osos, municipio de Abrego.**

Fotos: Elizabeth Rochel Ortega

En los predios donde se cultiva cebolla de bulbo ocañera, se realiza rotación de cultivos con fríjol rosado Zaragoza. Este cultivo presenta un crecimiento de tipo arbustivo, su ciclo vegetativo en la región es de 70 días y tiene rendimientos promedio de 2 t/ha en la zona. El 85 % de la producción de este grano abastece el mercado local de la costa Atlántica del país (Jaramillo Vásquez et al., 2003).

Variedades

La provincia de Ocaña se destaca por su marcado arraigo a la cebolla de bulbo ocañera; por ello, se hace una breve mención a las variedades que históricamente han estado presentes en la zona.

Cebolla común

La cebolla común se caracteriza por tener bulbos de color rojo pálido o rosado claro, con una forma ovoide, con diámetros que oscilan entre 3,5 y 6,0 cm cuando esta se encuentra lista para el consumo en fresco (figura 4). En cuanto al follaje, este se identifica por tener un color verde claro y ser susceptible al doblamiento. La planta alcanza una altura promedio de 59 cm (Jaramillo Vásquez et al., 2003).



Figura 4. Producción de cebolla común.

Foto: Silvia Juliana Flórez Morales

Una de las características de mayor relevancia de esta variedad es la pungencia o picor, o sensación picante, lo cual hace de este cultivar un producto muy apetecido para el consumo tanto en fresco como en conserva (encurtidos). Dentro del grupo de cebolla roja ocañera se referencian los tipos: Burguesa f1, Común, Híbrido Rojo f1 y Rosada Milenio f1 (Vergel Ortega et al., 2016).

Hacaritama

La RPT 20 es una variedad de cebolla ocañera mejorada a partir de accesiones colectadas en 1986, que se cruzaron con semillas amarillas (Texas) (F1), y se aplicó retrocruza con cebollas ocañeras (F2). En 1995, se escogieron las nueve líneas más representativas y en 2000 se seleccionó la mejor, que tomó el nombre de Hacaritama. Esta variedad presenta menor consumo hídrico, mayor tolerancia a raíz rosada y 18 % más de rendimiento que la ocañera nativa. El bulbo presenta mayor tamaño y color más rojizo que la ocañera tradicional, como se evidencia en la figura 5.

25



Figura 5. Producción de cebolla Hacaritama.

Fotos: Yanine Roza Leguizamón

- Ciclo vegetativo: de 78 a 82 días.
- Arquitectura: durante las primeras etapas del desarrollo vegetativo las hojas son más erectas que las de la ocañera tradicional.
- Color de follaje: verde más oscuro o azulado.
- Tallo: grueso y vigoroso.
- Bulbos: forma más redondeada en el bulbo comercial, diámetro de 2,5 a 4,5 cm; 4 a 6 bulbos por planta.
- Daño por raíz rosada: 8 %-9 %.
- Reposo o latencia: requiere más de 60 días.
- Sólidos solubles: de 6,1 a 6,2 °Bx.
- Rendimiento: de 20 a 21 t/ha.

Peruana (otra)

La producción de cebolla peruana se concentra principalmente en Arequipa, departamento que aporta más del 60 % de la producción que se da en Perú. El rendimiento del cultivo de cebolla en Arequipa, además de Ica, Tacna y Lima, es uno de los más elevados en Perú, pues se produce hasta 37,3 t/ha (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [Midagri], 2010).

Dentro de las variedades sembradas en Perú se encuentran:

- En costa: Roja Arequipeña, Roja, Roja Creole, Crystal White y Blanca Rio Grande.
- En sierra: Roja Arequipeña.
- En selva: Roja Arequipeña, Sintese 39 Roja.

En las parcelas de pequeño productor, predomina el bulbo de color rosado y se presentan cultivares como Arequipeña, Perilla, Camaneja, Americana y Lurin. También cultivares introducidos como Sivan, Rosita y Pantera Rosa. Para exportación, se emplean cultivares de bulbo color amarillo como Pegasus, Century, Nirvana y Caramelo, y algunos cultivares de bulbo color rojo como Matahary y Red Bone (De Albuquerque Maranhão & De Albuquerque Maranhão, 2013; Midagri, 2012).

La cebolla en cifras

En el departamento de Norte de Santander, los municipios de mayor producción de cebolla de bulbo se concentran en la provincia de Ocaña. La cebolla de bulbo es el primer producto de la economía de la región de la provincia de Ocaña por su participación en el producto interno bruto (PIB), los volúmenes de su producción, la mano de obra requerida, la cual es familiar y también contratada, y sobre todo por la importancia cultural en la zona.

Este sistema ocupa los primeros lugares en la producción de cultivos transitorios en los municipios de la provincia de Ocaña (tabla 1).

Tabla 1. Producción de cebolla por municipios de la provincia de Ocaña

Municipio	Participación (%)	Productividad (t)	Rendimiento (t/ha)
Ábrego	40	26.400	20,0
Bucarasica	53	803	15,0
El Carmen	20	5.600	28,0
Hacarí	25	1.253	15,0
La Playa de Belén	49	15.840	17,8
Ocaña	19	15.440	20,0
San Calixto	79	14.880	20,0
Villa Caro	21	360	16,4

Fuente: Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2020)

En cuanto a los rendimientos (figura 6), según los datos suministrados por las evaluaciones agropecuarias municipales, el municipio de El Carmen registra los mayores rendimientos en la zona (28,0 t/ha); de esta manera, supera el promedio a nivel nacional para el cultivo de cebolla de bulbo (20,4 t/ha), seguido de San Calixto, Ocaña y Ábrego con 20,0 t/ha.

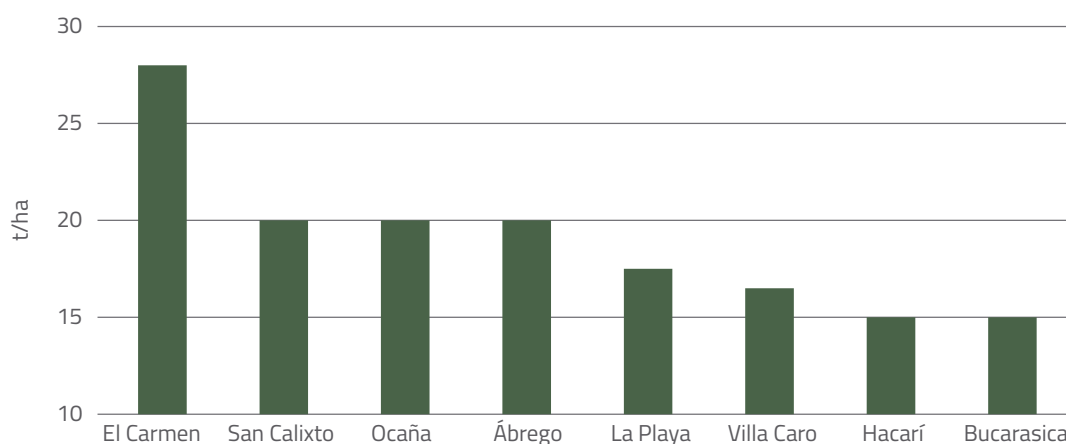


Figura 6. Rendimiento de cebolla de bulbo en municipios de la provincia de Ocaña.

Fuente: UPRA (2020)

Las siembras se realizan en los dos semestres del año y en promedio se establecen 1.614 ha por semestre (figura 7). Según los datos reportados en los anuarios estadísticos agropecuarios generados por la Secretaría Departamental de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander, la producción en promedio de estas áreas establecidas corresponde a 31.207 t por semestre (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander, 2022).

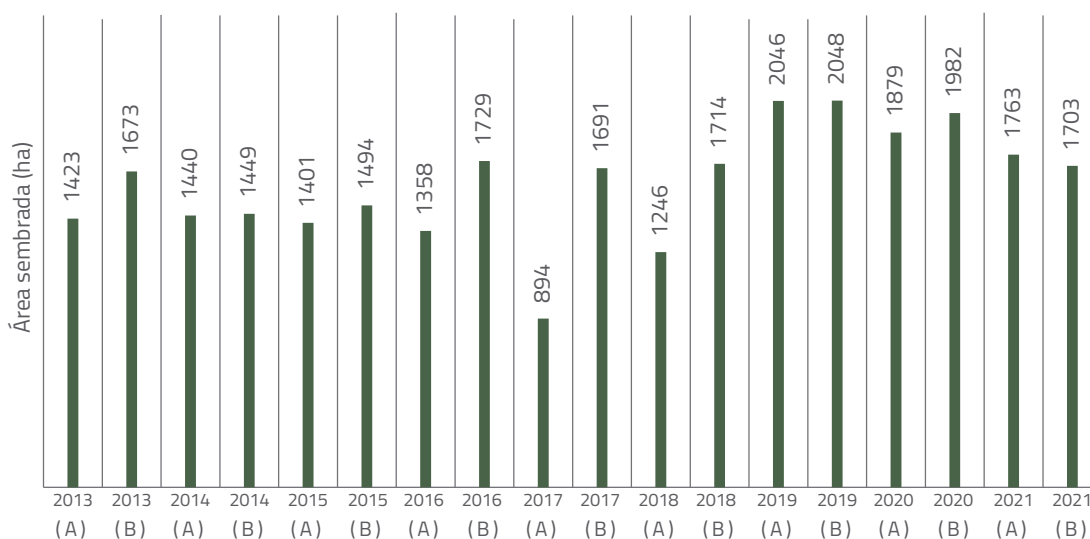


Figura 7. Área sembrada de cebolla de bulbo en el departamento de Norte de Santander.

Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander (2022)

Según cifras de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander (2022), las áreas de siembra han disminuido debido a los bajos precios que se registran en el mercado y a la rotación con cultivos transitorios, como pepino y cilantro. No obstante, desde el segundo semestre de 2019 la secretaría dejó de reportar las siembras de cebolla ocañera, por causa de las bajas áreas establecidas de este cultivar (figura 8). Las pérdidas en la calidad del material vegetal utilizado para la propagación son parte de las razones por las cuales estas áreas han disminuido considerablemente.

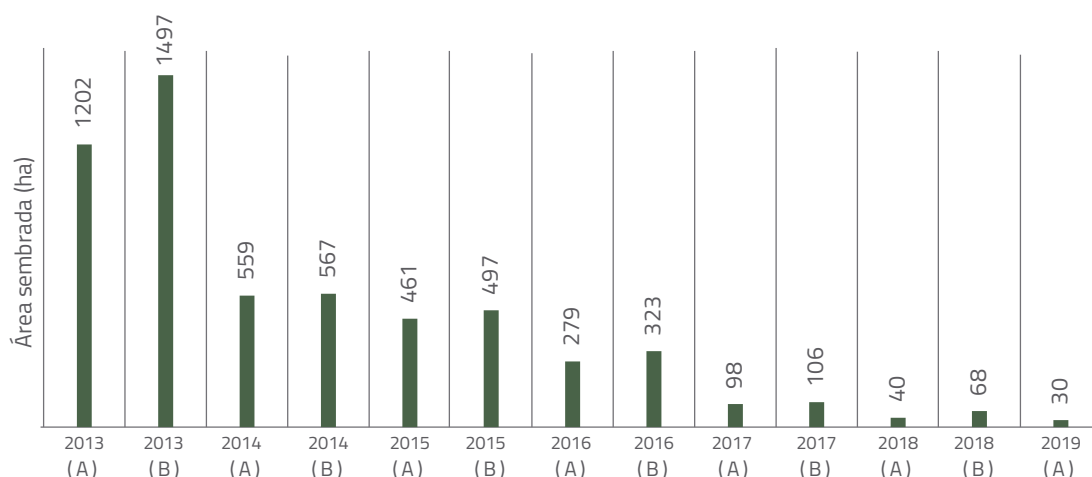


Figura 8. Área establecida de cebolla ocañera en el departamento de Norte de Santander.

Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander (2022)

Área de estudio

El área de estudio tiene una extensión de 596.311 ha, y está localizada entre los 7°31'47" y 8°48'3" de latitud norte y 72°50'13" y 73°38'1" de longitud oeste. Se encuentra en el occidente del departamento de Norte de Santander, en la provincia de Ocaña, e incluye los siguientes municipios de norte a sur: El Carmen, Convención, Teorama, San Calixto, Hacarí, Ocaña, La Playa, Ábrego, Bucarasica, Villa Caro, Cáchira y La Esperanza (figura 9).

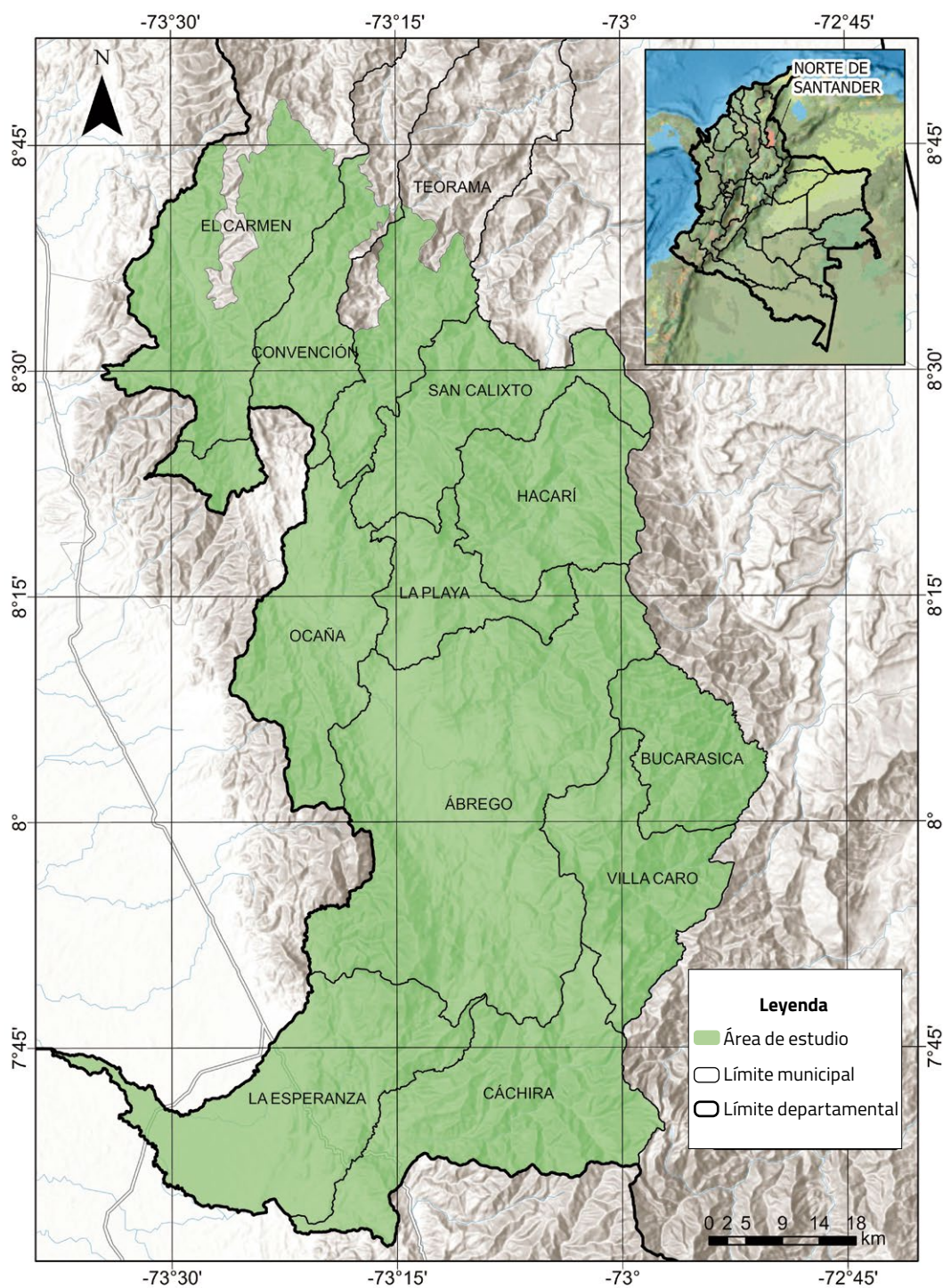


Figura 9. Zona de estudio del proyecto para generación de indicadores de calidad.

Fuente: Elaboración propia

Zonas de vida

En la tabla 2, se pueden identificar las zonas de vida características del área de estudio, de acuerdo con lo contemplado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1977).

Tabla 2. Zonas de vida de Holdridge en la zona de estudio

Código	Zona de vida	Área (ha)	%
bh-MB	Bosque húmedo montano bajo	37.000	6,2
bh-PM	Bosque húmedo premontano	166.233	27,9
bh-T	Bosque húmedo tropical	137.883	23,1
bmh-M	Bosque muy húmedo montano	13.748	2,3
bmh-MB	Bosque muy húmedo montano bajo	59.342	10,0
bmh-PM	Bosque muy húmedo premontano	129.892	21,8
bp-M	Bosque pluvial montano	302	0,1
bs-PM	Bosque seco premontano	46.060	7,7
bs-T	Bosque seco tropical	5851	1,0
Total		596.311	100,0

Fuente: Elaboración propia, a partir de IGAC (1977)

La zona de vida predominante corresponde al bosque húmedo premontano (bh-PM), la cual se caracteriza por tener una biotemperatura promedio de 18 a 24 °C y precipitaciones entre 1.000 y 2.000 mm promedio anual. Se encuentra ubicada hacia el norte y centro del área de estudio, principalmente en el municipio de Ábrego. La segunda zona de vida importante por su extensión es el bosque húmedo tropical (bh-T), caracterizado por tener biotemperaturas mayores de 24 °C y precipitaciones entre 2.000 y 4.000 mm promedio anual. Esta zona de vida se ubica en el norte y el sur del área de estudio, en especial en el municipio de La Esperanza. Por altitud, el piso premontano es el mayoritario (57,3 %), seguido por el piso tropical (24,1 %), luego el montano bajo (16,2 %) y después el montano (2,4 %).

Hidrografía

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios (Ideam, 2013), en el área de estudio se encuentran dos áreas hidrográficas: Magdalena Medio (codificada con el número 23) en el occidente y sur (33,7 % de superficie) y Catatumbo (16) en el norte y oriente (66,3 % de superficie). En total, el área de estudio presenta cinco subzonas hidrográficas: quebrada El Carmen (2321) y río Lebrija (2319) dentro de la zona hidrográfica 23 y río Algodonal (alto Catatumbo) (1605), río Tarra (1604) y río Presidente - Tres Bocas (1603) de la zona hidrográfica 16. De las subzonas, la que cuenta con la mayor área corresponde a la 1605, con el 30,3 %; esta también tiene un Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA), actualizado en 2018 (Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar], 2018). La subzona que sigue en cuanto a área es la 1604, con un 25,9 % de representatividad, seguida por la 2319 con un 25,6 %.

Altitud

El rango de altitud en la zona fluctúa entre 46 y 4.010 m s. n. m., y la zona más baja es la que se ubica en la parte suroccidental, municipio de La Esperanza, en la confluencia de los ríos Cáchira y San Alberto, y es la más alta en la parte suroriental, en el municipio de Cáchira, en inmediaciones del páramo de Bagueche.

Áreas de protección legal

De acuerdo con el Registro Único de Áreas Protegidas (Runap) del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Sinap, 2023), la zona de estudio presenta cuatro áreas de protección legal: tres reservas forestales protectoras nacionales y un área natural única. Las reservas son: quebrada Tenería, entre los municipios de La Playa y Ocaña, con 650 ha; río Tejo, en el municipio de Ocaña, con 2.500 ha, y río Algodonal, en el municipio de Ábrego, con 8.200 ha. El área natural única es Los Estoraques, la cual se encuentra en el municipio de La Playa y tiene una extensión de 641 ha.

Aptitud para cebolla de bulbo

La UPRA, con apoyo del Banco de Desarrollo Empresarial (Bancóldex), identificó zonas aptas de cebolla de bulbo a escala 1:100.000 para el país (UPRA & Bancóldex, 2018). Aunque en la zonificación no se discriminó el tipo o la variedad de cebolla de bulbo, su metodología indica que se tuvieron en cuenta los requerimientos de las cebollas rojas, amarillas y blancas que existen a lo largo del territorio nacional. Para el área de estudio, la zonificación referida en los dos semestres del año arrojó los resultados que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Aptitud del cultivo de cebolla de bulbo para área de estudio

Aptitud	Semestre 1		Semestre 2	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Alta	34.279	5,7	25.677	4,3
Media	24.712	4,1	33.368	5,6
Baja	31.514	5,3	34.696	5,8
No apta	461.010	77,3	457.776	76,8
Exclusiones	44.795	7,5	44.795	7,5

Fuente: Elaboración propia, a partir de UPRA & Bancóldex (2018)

En promedio, el 15,4 % del área de estudio presentó alguna aptitud para el cultivo. De igual forma, todos los municipios tuvieron algún grado de aptitud, pero se destaca Ábrego con 17.787 ha promedio, La Esperanza con 13.030 ha, El Carmen con 12.024 ha, Convención con 9.938 ha, Cáchira con 8.717 ha y Ocaña con 6.552 ha. Al comparar los dos semestres analizados, fue posible identificar que, en general, en el segundo semestre existen más zonas aptas, que se incrementan en un 3,6% (3.234 ha); no obstante, en términos de área con aptitud alta hay una disminución del 25,1 %, al pasar de 34.279 a 25.677 ha.



Capítulo II

Tiempo térmico para la cebolla ocañera

35

El crecimiento y desarrollo de los cultivos está relacionado principalmente con la acumulación y el transporte de nutrientes por el proceso de fotosíntesis, y regulado por elementos ambientales como la disponibilidad de agua, la temperatura y la radiación solar. En este sentido, el presente capítulo aborda la determinación del tiempo térmico para la cebolla de bulbo ocañera, entendiendo que la temperatura del aire es una variable que regula y controla la producción de varias hormonas, las cuales son sensibles a los valores extremos.

Generalidades

La temperatura del aire es uno de los elementos climáticos de mayor importancia en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, ya que tiene una influencia determinante en sus procesos fisiológicos. Para el óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas es necesario que no se presenten valores extremos de temperatura (máximos o mínimos), y que las temperaturas medias diarias sean tales que la acumulación de la temperatura (calor) de las plantas se satisfaga en un tiempo aceptable, de tal manera que su rendimiento no se vea afectado; lo primero se aborda considerando las temperaturas cardinales y lo segundo, a partir de la constante térmica (C_T) y del fotoperiodo (Campos Aranda, 2005).

La CT está relacionada con la suma de temperatura o de grados día (GD) que debe acumular una planta o un cultivo para completar adecuadamente su ciclo de vida. Cada cultivo tiene una CT determinada que resulta de la suma de la temperatura desde la germinación hasta la madurez total. Para calcular los grados día acumulados (GDA), se debe conocer la temperatura base (T_b) de crecimiento del cultivo, que es aquella por debajo del umbral de actividad fisiológica en la planta (Jaramillo-Robledo, 2005). Se necesitan registros de temperatura media (T_m) o de las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) diarias y mediante el método residual se van acumulando las temperaturas.

Cálculo de los grados día acumulados (GDA)

La estimación de los GDA se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se calcula la T_m diaria sumando la T_{max} y T_{min} y dividiendo por dos:

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad \text{Ecuación 1}$$

2. Se restan las diarias de la T_m y la T_b :

$$GD = T_m - T_b \quad \text{Ecuación 2}$$

3. Se suman los residuos obtenidos:

$$GDA = \sum GD \quad \text{Ecuación 3}$$

Si los GD son menores que cero no suma. Los GD representan unidades térmicas en grados-día ($^{\circ}\text{Cd}$).

El concepto de GD es una de las herramientas más utilizadas para predecir la fenología y el desarrollo de los cultivos (McMaster & Wilhelm, 1997), ya que representa el reloj térmico que regula las diferentes etapas de las plantas, las cuales deben acumular una cierta cantidad de GD para pasar de un estado a otro (Campo Arana & Pérez Polo, 2015). Así, pues, dependiendo de la velocidad

con que se acumulen los GD, las fases fenológicas o el desarrollo completo del cultivo se pueden adelantar en temporadas calurosas, por ejemplo, o prolongar en épocas más frías.

Los grados día acumulados y la cebolla ocañera

Como la temperatura media varía de acuerdo con el lugar y la época del año, la acumulación de los GD necesarios para el desarrollo de los cultivos puede variar en función de estos dos factores, a partir de los cuales se pueden identificar zonas y fechas de siembra óptimas, considerando específicamente la temperatura. Por tanto, con el fin de analizar el ritmo de crecimiento del cultivo de la cebolla en la provincia de Ocaña, se calcularon los GDA, teniendo en cuenta una T_b para todo el ciclo de 10 °C, valor aproximado para variedades de bulbo (Cristancho et al., 1990; Mejía López & Jaramillo Henao, 1996). Se definió como duración máxima del ciclo de cultivo 90 días, usual en la región y acorde a lo reportado por Verjel Manzano et al. (2003) y Duque M. et al. (1989). El objetivo fue determinar las posibles diferencias en el área de estudio según las épocas de siembra habituales en la región.

Información utilizada y modelación espacial para el cálculo de los GDA

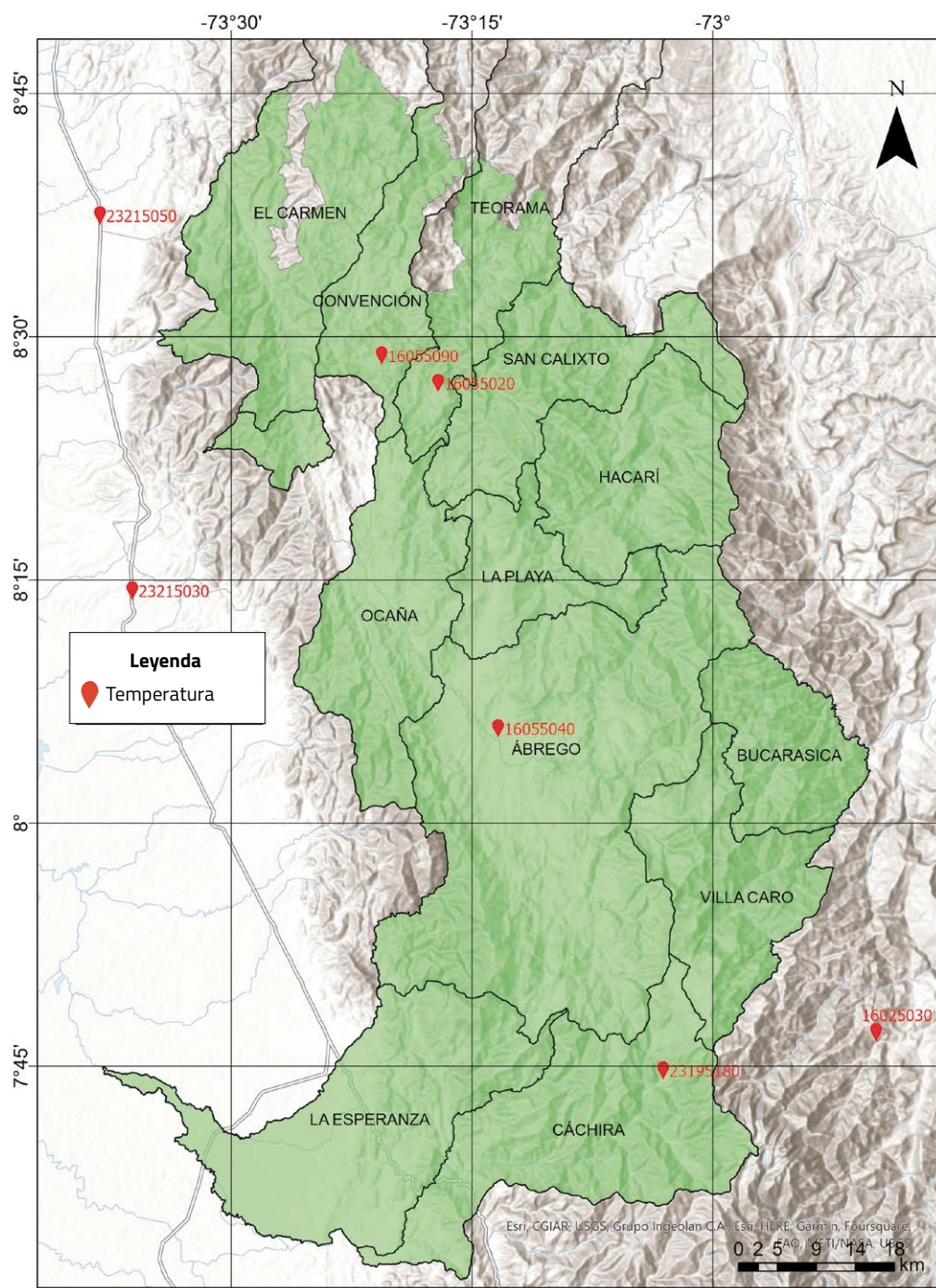
Se recopilaron series climáticas de las temperaturas diarias (T_{max} y T_{min}) entre 1987 y 2016, provenientes de las estaciones meteorológicas localizadas en los municipios de la provincia de Ocaña y a sus alrededores (tabla 4 y figura 10). Esta información surtió un proceso de control de calidad que incluyó: revisión de coherencia estadística, análisis de homogeneidad, complementación de datos faltantes y validación de las series climáticas obtenidas, utilizando el paquete Climatol de R-Stat (Gómez-Latorre et al., 2021).

Tabla 4. Localización de estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de los GDA en el área de estudio

Cod. estación	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud (m s. n. m.)
23195180	Escuela Agrícola Cáchira	-73,05	7,73	1.882
23215030	Aguas Claras	-73,60	8,22	208
16055020	Teorama	-73,28	8,44	1.160
16055040	Centro Administrativo Ábrego	-73,22	8,08	1.430
16055090	Institución Agrícola Convención	-73,34	8,47	176
16025030	Salazar	-72,83	7,77	860

Fuente: Elaboración propia

Luego se fijaron cuatro posibles fechas de siembra en el primer semestre: 1.^{ro} y 15 de abril, y 1.^{ro} y 15 de mayo, y cuatro fechas en el segundo semestre: 1.^{ro} y 15 de octubre, y 1.^{ro} y 15 de noviembre. A partir de estas se calcularon los GDA por año durante los 90 días establecidos y posteriormente se promediaron todos los años. Estos resultados fueron mapeados usando un modelo de predicción lineal (*linear model prediction* [OLS]), utilizando el paquete *Gstat* (*Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modelling*) de R-Stat e incluyendo como covariable el modelo digital de elevación (MDE).



Cálculo de los GDA

En la figura 11, se muestran los GDA en cada una de las estaciones meteorológicas por fechas de siembra seleccionadas para la modelación: las estaciones 16055090 (Institución Agrícola Convención) y 16055020 (Teorama), ubicadas en el norte con elevaciones de 176 y 1.160 m s. n. m., respectivamente; la 16055040 (Centro Administrativo Ábrego), hacia el centro a 1.430 m s. n. m., y la 23195180 (Escuela Agrícola Cáchira), en el sur a 1.882 m s. n. m. Se observa una mayor acumulación de GD en las estaciones al norte, con valores entre 118,2 y 967,0 °Cd, seguidas de 16055040 (Centro Administrativo Ábrego), con valores de 1.034,3 a 889,2 °Cd, y con una acumulación menor en las estaciones del sur entre 662,4 y 565,7 °Cd.

Aunque no se tiene certeza en los GDA necesarios para el ciclo total de la cebolla ocañera, para un ciclo de cultivo de 90 días se considera como umbral óptimo entre 700 y 900 °Cd. Por ello, para el área de influencia de la estación 23195180 (Escuela Agrícola Cáchira) los GDA no serían suficientes para completar el ciclo en este número de días; esto hace que el cultivo necesite más tiempo para su desarrollo, lo cual se puede considerar una desventaja frente a las otras ubicaciones donde sí se obtienen valores en este rango. Asimismo, es posible observar que durante las fechas de siembra del primer semestre los GDA son mayores que en el segundo semestre, lo que supone que la época de abril y mayo es favorable para el cultivo en términos de temperatura.

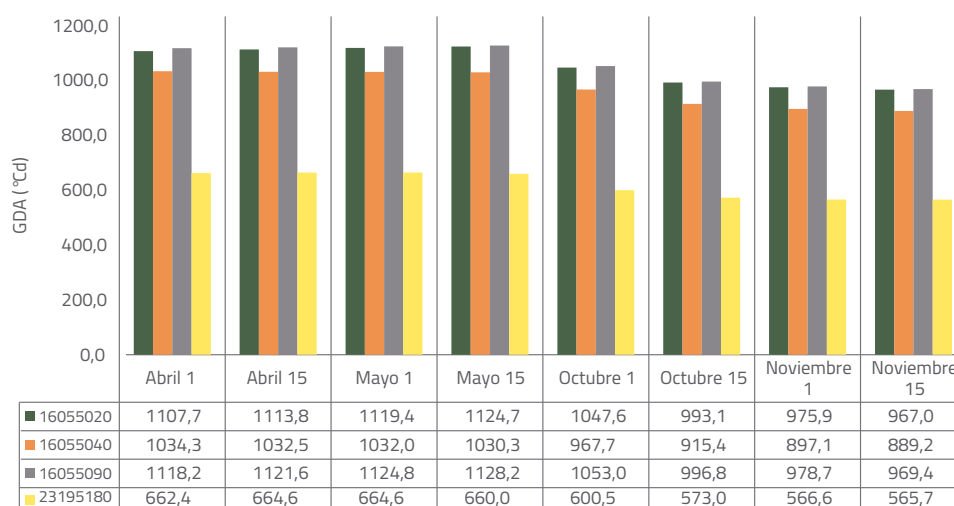


Figura 11. GDA por fecha de siembra en las estaciones ubicadas dentro de los municipios analizados en la provincia de Ocaña.

Fuente: Elaboración propia

Distribución espacial de los GDA

Las figuras 12 y 13 exponen la distribución espacial de los GDA para el cultivo de cebolla en las fechas de siembra del primer y segundo semestre del año, respectivamente. En este sentido, se observa que gran parte del área de estudio, en promedio, acumula entre 700 y 900 °Cd o más durante los 90 días considerados, sobre todo en el segundo semestre, lo cual es óptimo para el cultivo.

Sobre el costado suroriental de la provincia, en los municipios de Abrego, Cáchira, Villa Caro y Bucarasica, se incrementan de forma notable las áreas para el segundo semestre, donde la acumulación para la cebolla es favorable (700 y 900 °Cd).

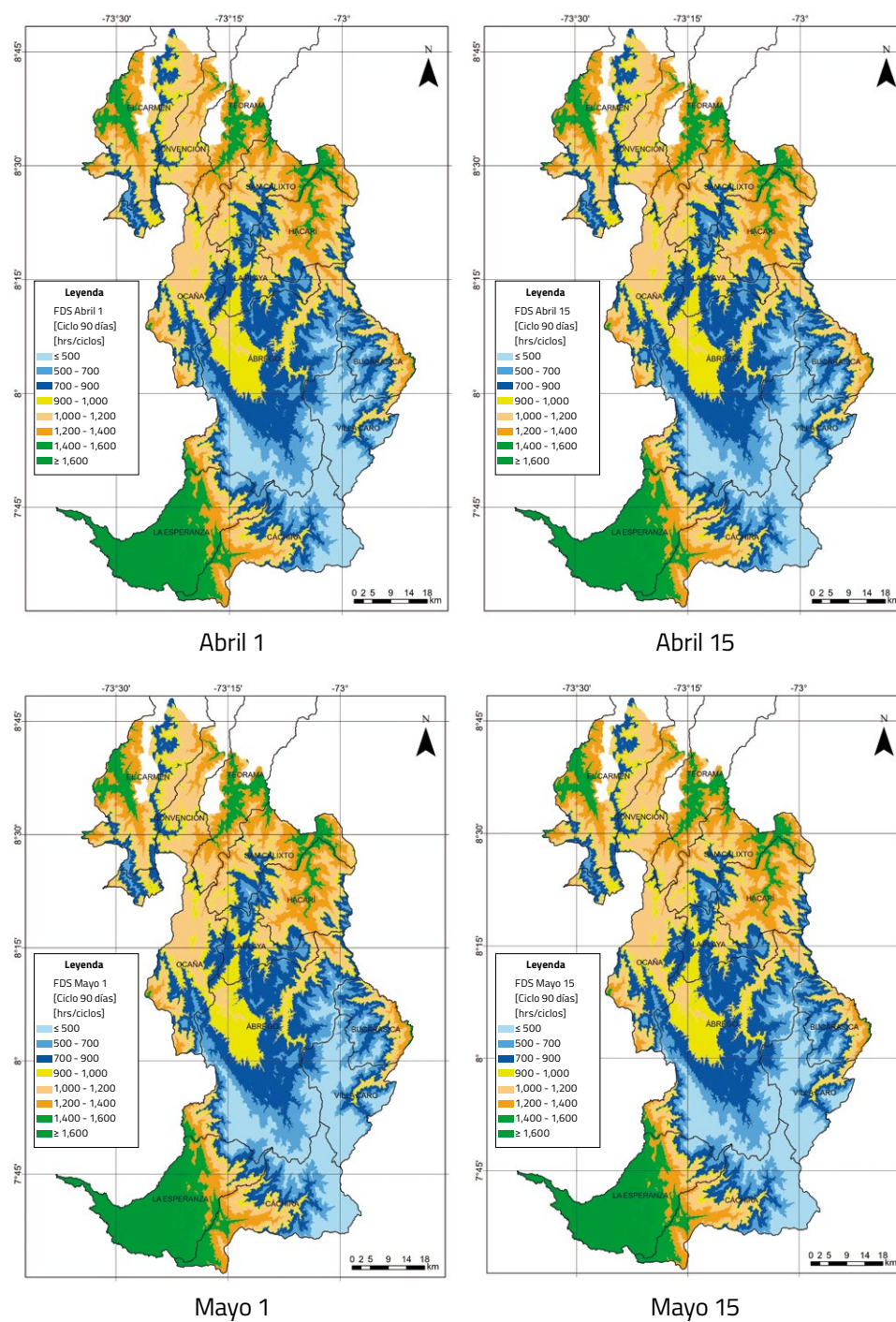


Figura 12. Distribución espacial de los GDA en los municipios considerados de la provincia de Ocaña en las fechas de siembra del semestre 1.

Fuente: Elaboración propia

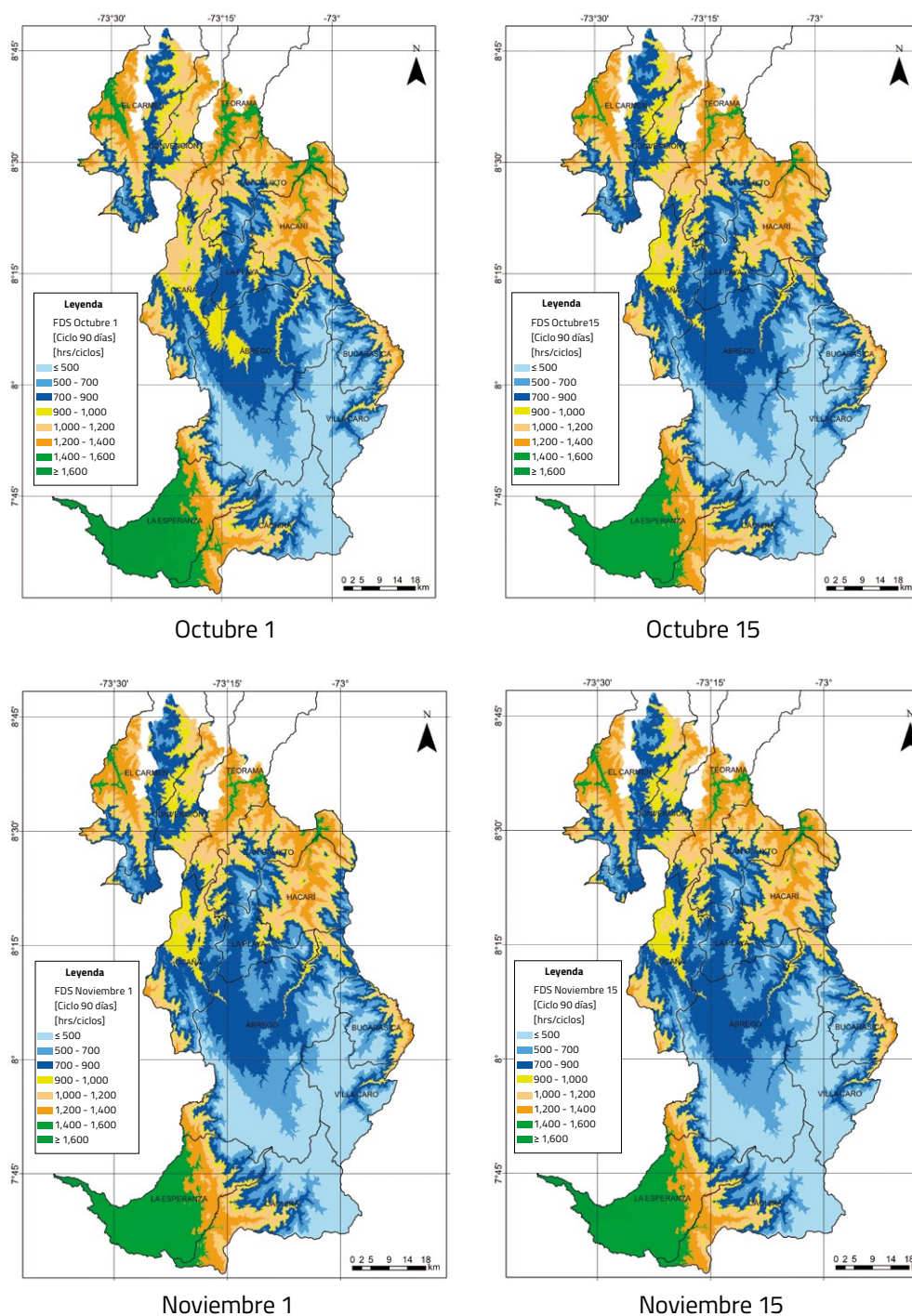


Figura 13. Distribución espacial de los GDA en los municipios considerados en la provincia de Ocaña en las fechas de siembra del semestre 2.

Fuente: Elaboración propia



Capítulo III

Determinación de la huella hídrica para la cebolla ocañera

45

La escasez del recurso hídrico y el deterioro de la calidad del agua se han convertido en una de las fuentes de riesgo más importantes a nivel global (Flörke et al., 2018). Por lo tanto, mejorar la eficiencia en el uso del agua se considera una ruta fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y aliviar la escasez (Benedetti et al., 2019), más cuando el sector agrícola ya es responsable del 70 % de la demanda mundial de agua y se espera que su disponibilidad disminuya en un 40 % para 2030 (Foley et al., 2011). En Colombia, la agricultura es el sector productivo que mayor demanda de agua genera en el país; para 2020 esa demanda se calculó en un 43,25 % del total (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2023). Además, en comparación con otros usos, el agua utilizada en la agricultura suele tener menores retornos (Young & Loomis, 2014); por consiguiente, la necesidad de guiar las decisiones de gestión del agua se encuentra entre los problemas más importantes para garantizar el uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos agrícolas (Bai et al., 2017).

Con la transformación de los paradigmas del análisis del agua de los cultivos, Hoekstra y Hung (2003) introdujeron el concepto de la *huella hídrica*, que se ha usado como una herramienta que permite estimar la cantidad de agua oculta en

cualquier bien o servicio consumidos por un individuo o grupo de individuos de un área específica (Zárate Torres et al., 2017). El análisis incluye la identificación del origen del agua con base en los conceptos de *agua verde* y *agua azul*, para la estimación de la huella hídrica verde y la huella hídrica azul.

El agua verde se relaciona con la humedad del suelo. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2000) definió el concepto como el agua almacenada en el suelo proveniente de la lluvia, que soporta la vegetación en secano y que se mantiene en el suelo; asimismo, no hace parte del proceso de recarga a las fuentes de agua superficial o subterránea.

Según el Ideam (2023), la huella hídrica verde representa la apropiación humana del agua verde por la actividad agrícola, aprovechando el agua de la lluvia que queda almacenada en la humedad del suelo y que sostiene la mayor parte de la agricultura de secano en Colombia. Por su parte, el agua azul es la que proviene de la lluvia y es captada en ríos, quebradas, lagos y acuíferos para que luego sea aprovechada y se suplan las diferentes necesidades hídricas de las actividades antrópicas: riego en agricultura, abastecimiento humano, usos industriales y productivos. En efecto, en el sector agrícola la huella hídrica azul es la estimación del agua de riego potencialmente efectivo para sostener la agricultura.

En este sector, la determinación de la huella hídrica consiste en la estimación de la evapotranspiración verde (ET_{verde}) y azul (ET_{azul}) de los cultivos, dentro del periodo predeterminado en la definición del alcance del estudio (Zárate Torres et al., 2017). Las unidades de medición de la evapotranspiración acumulada del total de días del ciclo del cultivo evaluado (mm/ciclo) permiten calcular el volumen de agua evapotranspirada en $m^3/(\text{ciclo ha})$. Después de conocer el área productiva y el rendimiento del cultivo en la región, las unidades pueden ser extrapoladas a m^3/t .

En ese contexto, el presente capítulo se enfoca en el estudio del uso del agua, tomando los conceptos del enfoque de huella hídrica para la producción de cebolla de bulbo en la zona de estudio y definiendo como indicadores la ET_{verde} y la ET_{azul} en diferentes escenarios climáticos y fechas de siembra modales.



Alcance del estudio para la determinación de la huella hídrica

El cálculo de la huella hídrica como uno de los indicadores tradicionales de gestión del recurso hídrico de cuencas hidrográficas a nivel nacional, para el sector agrícola en Colombia, ha sido abordado en los Estudios Nacionales del Agua (ENA) de 2014, 2018 y 2022 realizados por el Ideam. La unidad de análisis de los estudios ha sido la cuenca hidrográfica y la escala temporal se ha realizado con agregaciones mensuales y anuales; esto ajustado a la disponibilidad de información y tamaño del estudio (nacional). No obstante, a diferencia de los ENA, el presente análisis ha considerado los siguientes alcances y diferencias:

1. Escala temporal: escala diaria como unidad temporal del análisis; se evaluó el ciclo del cultivo de cebolla de bulbo con 90 días de duración, que es el tiempo máximo para la cosecha.
2. Escala espacial: datos y cálculos de las condiciones agroclimáticas a escala puntual (ubicación de las estaciones meteorológicas) dentro del área de estudio.
3. Con el objetivo de identificar zonas donde potencialmente el comportamiento de la huella hídrica fuera favorable o desfavorable para la producción de cebolla de bulbo, se asumió que toda el área de estudio es apta para producción del cultivo, independiente de las tradicionales zonas de producción.
4. A partir de los estudios previos adelantados en la zona por Verjel Manzano et al. (2003) y Vergel Ortega et al. (2016) y de visitas técnicas realizadas por los autores, se estableció que el sistema de producción tradicional implementa el riego como parte suplementaria al aporte de las lluvias. El sistema de riego que se usó para las simulaciones fue aspersión aplicando láminas de acuerdo con un factor de agotamiento, el cual será explicado más adelante.
5. Dado que se simulan aplicaciones de lámina de riego, se asume que el cultivo no presenta síntomas por estrés hídrico debido a la condición de humedad estándar, según los conceptos que exponen Allen et al. (2006).

Datos de entrada para el cálculo de la huella hídrica

El cálculo de la huella hídrica se realizó a partir de tres fuentes de información: clima, suelo y cultivo, las cuales son necesarias para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), la capacidad de campo (Θ_{cc}) y el punto de marchitez permanente (Θ_{pmp}) en el suelo y el balance hídrico agrícola para el cultivo de cebolla de bulbo ocañera. Por ello, esta sección describe de forma detallada el tratamiento realizado a la información que se usó, con el objetivo de tener un mayor contexto sobre los insumos empleados.

Información utilizada

Para el proceso de cálculo, se compilaron series climáticas a escala diaria del periodo 1980-2011, provenientes de las estaciones meteorológicas de la red hidrometeorológica del Ideam, en los municipios de la provincia de Ocaña y sus alrededores. El control de calidad de las series climáticas lo realizó la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) durante el proyecto “Modelos de adaptación y prevención agroclimática (MAPA)”. Dichas series fueron sometidas a un proceso de filtrado de datos anómalos, verificación y corrección de heterogeneidad, generación de datos faltantes y verificación de calidad de las series resultantes. Las variables compiladas fueron: precipitación (Pr), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{media}), humedad relativa (Hr) y brillo solar (Bs), que son insumos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ET_o y el balance hídrico. En el cálculo de la ET_o , se implementó la ecuación de la FAO Penman-Monteith (ecuación 4) (Allen et al., 2006):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/(m² día)).

G: flujo del calor del suelo (MJ/(m² día)).

T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

e_s : presión de vapor de saturación (kPa).

e_a : presión real de vapor (kPa).

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C).

γ : constante psicrométrica (kPa/°C).

Debido a la insuficiente información de la variable de velocidad del viento para la zona de estudio, se asumió un valor de 2 m/s, siguiendo la recomendación de Allen et al. (2006).

Propiedades hidrofísicas del suelo

Las propiedades hidrofísicas son unas de las variables más importantes relacionadas con la humedad de los suelos (capacidad de retención), la cual es la fuente natural de agua para la agricultura y la vegetación nativa, e influye en una variedad de procesos relacionados con el crecimiento de las plantas; no obstante, debido a la gran heterogeneidad en su distribución espacial y temporal, su cuantificación y uso en investigación ha sido limitada (Dobriyal et al., 2012). En la capacidad de retención de humedad, hay dos propiedades del suelo claves: por un lado, la capacidad de campo (θ_{cc}), definida como el volumen de agua que puede almacenar un suelo contra la gravedad, correspondiente a la condición después de dos o tres días de drenaje libre después de un periodo de humectación total por lluvia o riego (Kabat & Beekma, 1994); por otro lado, el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), definido como el contenido de humedad del suelo en el que las plantas que se han marchitado durante el día no recuperarán la turgencia durante la noche en una atmósfera saturada (Kabat & Beekma, 1994).

Como señalan Araujo-Carrillo et al. (2021), en gran parte de país, incluyendo la provincia de Ocaña, no se cuenta con información detallada de las propiedades hidrofísicas mencionadas, y solo se tienen referencias a partir del levantamiento agrológico desarrollado en el departamento de Norte de Santander por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2004). El estudio de suelos del IGAC es de carácter general (escala 1:100.000) y fue construido desde un enfoque convencional; es decir, a partir de la identificación de polígonos relativamente homogéneos de suelo representados por perfiles modales. Sin embargo, dado que para el momento del levantamiento las propiedades hidrofísicas solo eran calculadas en alrededor del 10 % de los perfiles modales del estudio, los datos de Θ_{cc} y Θ_{pmp} se reportaron únicamente para ocho perfiles en todo el departamento. A nivel global existen varios modelos que se han aplicado para obtener estas propiedades, algunos de los cuales se caracterizan por su cada vez más detallada resolución espacial (por ejemplo, 250 m) y por el nivel de actualidad (menos de cinco años de publicación). Algunos de ellos son los trabajos desarrollados en HiHydroSoil v.2.0 por Simons et al. (2020) o por Turek et al. (2023).

Con los datos disponibles del estudio de suelos del IGAC (2004) y utilizando funciones de pedotransferencia, como las reportadas por Saxton y Rawls (2006), fue posible identificar que la Θ_{cc} (% vol.) tuvo un valor medio de $25,53 \pm 9,71\%$, con un mínimo de 7,96 % y máximo de 38,34 %. Para el caso del Θ_{pmp} (% vol.), el valor medio fue de $14,42 \pm 5,73\%$, con un mínimo de 4,33 % y un máximo de 21,63 %. Los valores medios calculados están muy cerca de los identificados para la zona de estudio respecto a los estudios globales, aunque sus valores máximos fueron mayores. Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 14.

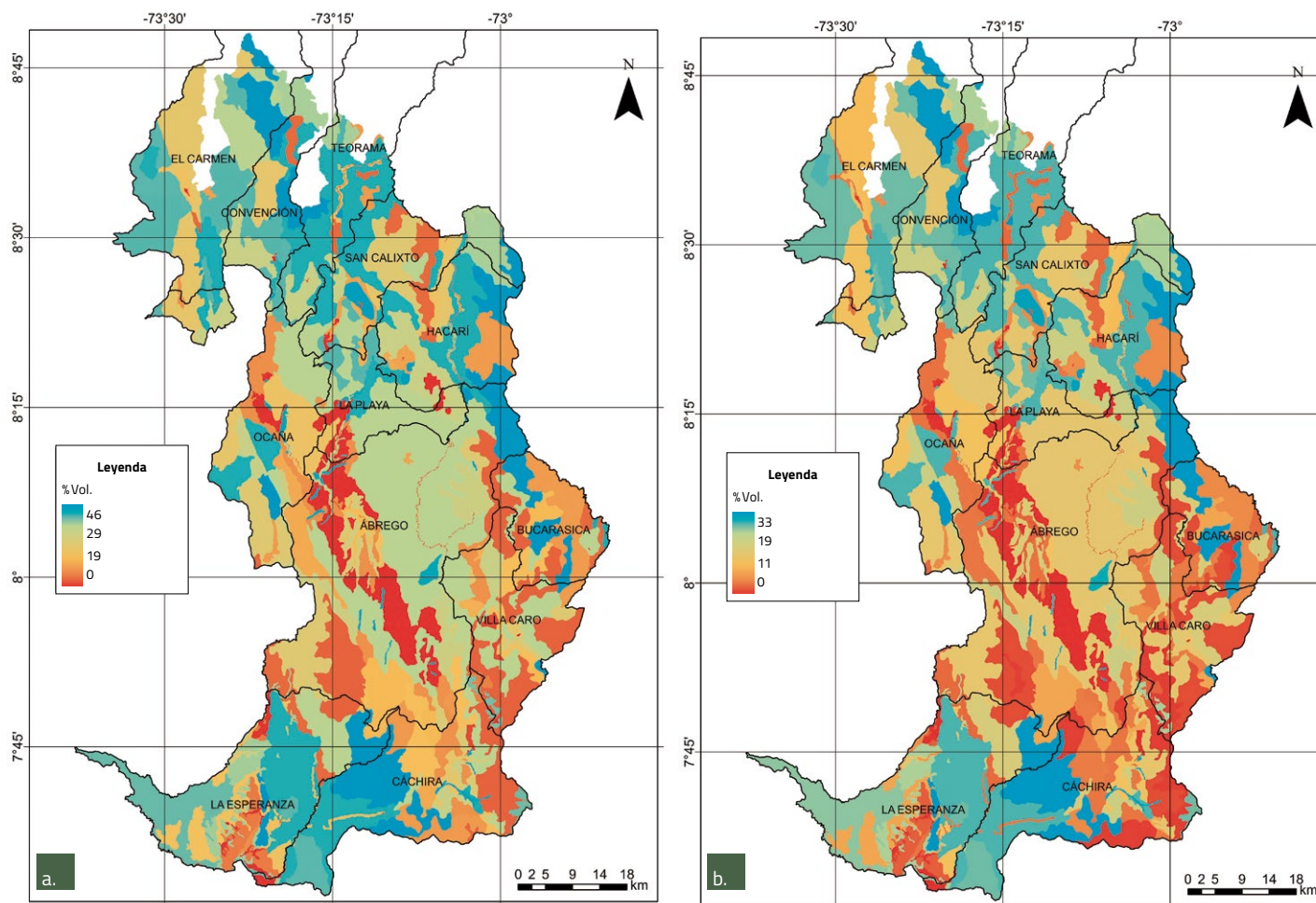


Figura 14. Propiedades físicas de la capa superficial del suelo en la provincia de Ocaña.
 a. Capacidad de campo; b. Punto de marchitez permanente.

Fuente: Elaboración propia

Datos del cultivo

Para el cálculo del balance hídrico, fue necesario incluir variables del cultivo asociadas al crecimiento y al desarrollo, y su relación con la demanda hídrica. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica, cuyas referencias se señalan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de las variables del cultivo usadas para el balance hídrico

Variable	Valor	Referencia
Coeficiente del cultivo en etapa inicial (Kc_{ini})	0,7	Verjel Manzano et al. (2003)
Coeficiente del cultivo en mediados de temporada (Kc_{med})	1,1	
Coeficiente del cultivo al final de temporada (Kc_{fin})	0,9	
Duración de la etapa inicial (L_{ini})	20 días	Allen et al. (2006)
Duración de la etapa de desarrollo (L_{des})	40 días	
Duración de la etapa de mediados de temporada (L_{med})	20 días	
Duración de la etapa final (L_{fin})	10 días	
Profundidad de la raíz inicial (Pr_{ini})	0,1 m	
Profundidad de la raíz final (Pr_{fin})	0,3 m	
Factor de agotamiento del cultivo (p)	0,3	

Fuente: Elaboración propia

Selección de las fechas de siembra para la simulación de la huella hídrica

Después de obtener las series diarias de las variables climáticas para el periodo 1980-2011, se aplicaron unos pasos para seleccionar los periodos de modelación, los cuales se detallan a continuación.

1. Se seleccionaron las series diarias de la variable P_r para cada una de las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio (figura 15).

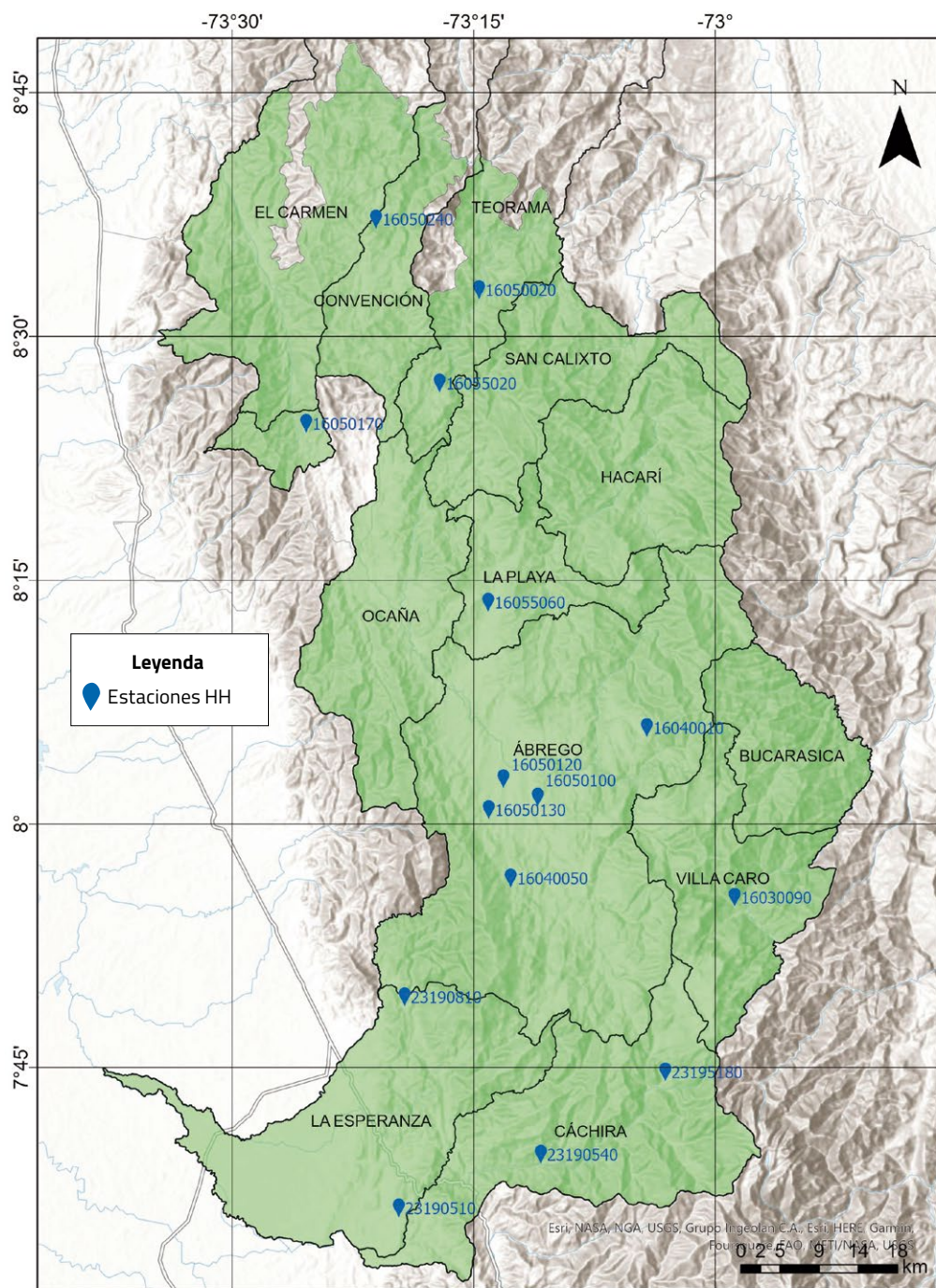


Figura 15. Ubicación geográfica de las estaciones de precipitación usadas para el análisis de la huella hídrica.

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionaron 15 estaciones meteorológicas, las cuales se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Estaciones de precipitación seleccionadas para el análisis de la huella hídrica

Cod. estación	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud [m s. n. m.]
23190540	La Vega	-73,18	7,65	710
23195180	Escuela Agrícola Cáchira	-73,05	7,74	1.882
23190810	Los Planes	-73,32	7,81	650
16030090	Villa Caro	-72,98	7,91	1.490
16050130	El Campanario	-73,23	8,00	1.500
16050120	Bocatoma Río Frío	-73,22	8,04	1.700
16040010	Alto El Venado	-73,07	8,09	1.920
16055060	La Playa	-73,24	8,22	1.500
16055020	Teorama	-73,29	8,44	1.160
16050020	Quince Letras	-73,24	8,54	360
23190510	El Caobo	-73,33	7,60	300
16050240	El Palacio	-73,35	8,61	1.280
16040050	La María	-73,21	7,93	1.800
16050100	El Chorro	-73,18	8,02	1.600
16050170	Brotare	-73,42	8,40	1.545

Fuente: Elaboración propia

- Se filtraron los valores de P_r que estuvieran dentro de las fechas modales de siembra para la zona, las cuales se dividen en dos semestres: semestre 1 entre abril y mayo; semestre 2 entre octubre y noviembre. Dentro de estas ventanas de tiempo, se seleccionaron como fechas de siembra para la simulación los días 1 y 15 de cada mes, lo que dio como resultado cuatro fechas por semestre.

3. Una vez seleccionadas las fechas de simulación, se acumularon los valores de P_r en cada una de las estaciones, de acuerdo con el ciclo del cultivo de 90 días; se inició los días 1 y 15 de los meses anteriormente seleccionados. Luego se aplicó una sumatoria de los valores acumulados para las 15 estaciones; así, se obtuvieron dos series del acumulado de la P_r del área de estudio: 128 fechas de siembra para el semestre 1 y 126 para el semestre 2.
4. Las dos series con el acumulado de las 15 estaciones se ordenaron de menor a mayor, con el fin de calcular la probabilidad de ocurrencia y seleccionar las fechas de modelación identificando la condición seca, normal y húmeda con las fechas de siembra que se ubicaron en 20 %, 50 % y 80 % de probabilidad de ocurrencia, respectivamente. Las fechas de siembra para las simulaciones finales seleccionadas a través de dicho análisis se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Fechas de siembra por condición de humedad seleccionadas para la simulación de la huella hídrica

Condición de humedad	Semestre 1	Semestre 2
Seco	1986-04-01	1986-10-01
Normal	1995-05-15	1995-10-01
Húmedo	2005-05-01	2004-10-01

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de los componentes azul y verde para el cultivo de cebolla de bulbo

Este apartado describe de forma resumida las fórmulas empleadas para la determinación de los componentes azul y verde de la huella hídrica, mediante la aplicación del balance hídrico agrícola y la determinación de la evapotranspiración azul (ET_{azul}) y verde (ET_{verde}) acumulada.

Balance hídrico agrícola

Después de conseguir los datos de entrada, se adoptaron las bases teóricas y los supuestos publicados por Allen et al. (2006) para aplicar un balance hídrico diario en el suelo y expresar el contenido de humedad en la zona de raíces, en función del agotamiento de agua en la zona radicular, de tal manera que se obtuviera la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo aplicando la ecuación 5.

$$D_{ri} = Dr_{i-1} - (P-RO)_i - I_i + (ET_o \times K_c)_i + DP_i \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

D_{ri} : agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i (mm).

Dr_{i-1} : contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior (mm).

ET_o : evapotranspiración de referencia del día i (mm).

I_i : lámina neta de riego en el día i (mm).

K_c : coeficiente del cultivo del día i .

DP_i : pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda de día i (mm).

El resultado de la expresión $(P-RO)_i$ se puede interpretar como la precipitación efectiva Pe_i , siendo esta definida como la diferencia entre la precipitación P_i (mm) y el escurrimiento superficial RO_i (mm). Para el cálculo de la precipitación efectiva, se asume un porcentaje fijo de precipitación del 10 %. El aporte por capilaridad se asume como cero, debido a que se considera que el nivel freático se encuentra suficientemente profundo, por lo cual no existiría aporte por este componente y si lo hubiera sería mínimo.

En la práctica, no es recomendable dejar que el agua se agote hasta el punto de marchitez permanente, ya que no todas las especies son tolerantes a estos estados de estrés hídrico. Por lo anterior, para este estudio se aplicó el concepto de fracción del agua fácilmente aprovechable p (tabla 5), un factor

de carácter fisiológico característico de cada especie; este indica la fracción de la humedad aprovechable a partir de la cual el cultivo muestra síntomas fisiológicos asociados al estrés hídrico por déficit (clorosis, disminución de rendimiento, marchitez, etcétera). De acuerdo con esto, se puede inferir que de la humedad total aprovechable (HTA) (ecuación 6) cada cultivo tiene la capacidad de aprovechar solamente una fracción, lo cual se conoce como humedad o agua fácilmente aprovechable (AFA) (ecuación 7).

$$HTA_i = \left(\frac{\Theta_{cc} - \Theta_{pmp}}{100} \right) Zr_i \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

HTA_i : humedad total disponible en la zona de raíces en día i (mm).

Zr_i : profundidad efectiva de raíces en el día i (mm).

Θ_{cc} : contenido de humedad volumétrico del suelo a capacidad de campo (%).

Θ_{pmp} : contenido de humedad volumétrico del suelo en punto de marchitez permanente (%).

$$AFA = p HTA \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

p : fracción del agua fácilmente aprovechable o factor de agotamiento (-).

A través de la estimación del balance hídrico se calculó la lámina de riego (I) usando como umbral el factor de agotamiento anteriormente expuesto; por lo tanto, la lámina de riego calculada compensa las pérdidas por evapotranspiración cuando $D_{ri} \leq AFA$.

Evapotranspiración azul y verde

Finalmente, la formulación general para la estimación de los componentes verde y azul de la evapotranspiración se obtuvo aplicando las ecuaciones 8 y 9 (Zárate Torres et al., 2017).

$$ET_{azul} = \min \left(\sum_{i=0}^n I, \sum_{i=0}^n ET_o \times K_c \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$ET_{verde} = \sum_{i=0}^n ET_o \times K_c - ET_{azul} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

ET_{azul} : evapotranspiración azul acumulada (mm).

ET_{verde} : evapotranspiración verde acumulada (mm).

I : lámina neta de riego (mm).

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm/día).

K_c : coeficiente del cultivo.

n : número de días i acumulados del ciclo, para este caso 90 días.

Resultados del cálculo de la huella hídrica

A continuación, se muestran los resultados del componente azul y verde de la huella hídrica, representados por la ET_{azul} y ET_{verde} , en condiciones de épocas seca, húmeda y normal o promedio, para los semestres 1 y 2.

Semestre 1

La figura 16 indica los resultados que se obtuvieron en cada uno de los sitios representados por estaciones meteorológicas, evaluadas en la condición normal; en esta se muestra el valor de la ET_{azul} y ET_{verde} , sobre un gráfico circular con su respectivo color asociado. Las diferencias de diámetro de la gráfica representan la heterogeneidad total de agua evapotranspirada durante el ciclo ($ET_{azul} + ET_{verde}$). Por ejemplo, la estación 16050020 (Quince Letras) tiene el mayor diámetro, dado que la evapotranspiración total del ciclo fue de 331,5 mm (103,3 mm + 228,2 mm), mientras que la estación 23185180 (Escuela Agrícola Cáchira) presenta el menor diámetro, pues el total de agua evapotranspirada fue de 258,7 mm (123,0 mm + 135,7 mm). De esta forma, se pueden identificar geográficamente las zonas

con mayor o menor evapotranspiración del cultivo (ET_c) o consumo de agua. Por consiguiente, las zonas representadas por las estaciones ubicadas en el sureste y en el centro de la región (16040010, Alto El Venado; 16030090, Villa Caro; 16040050, La María; 23185180, Escuela Agrícola Cáchira) fueron las que menor consumo de agua presentaron con los valores indicados en las gráficas. Por el contrario, las zonas ubicadas al norte, occidente, suroccidente y sur presentaron los mayores consumos.

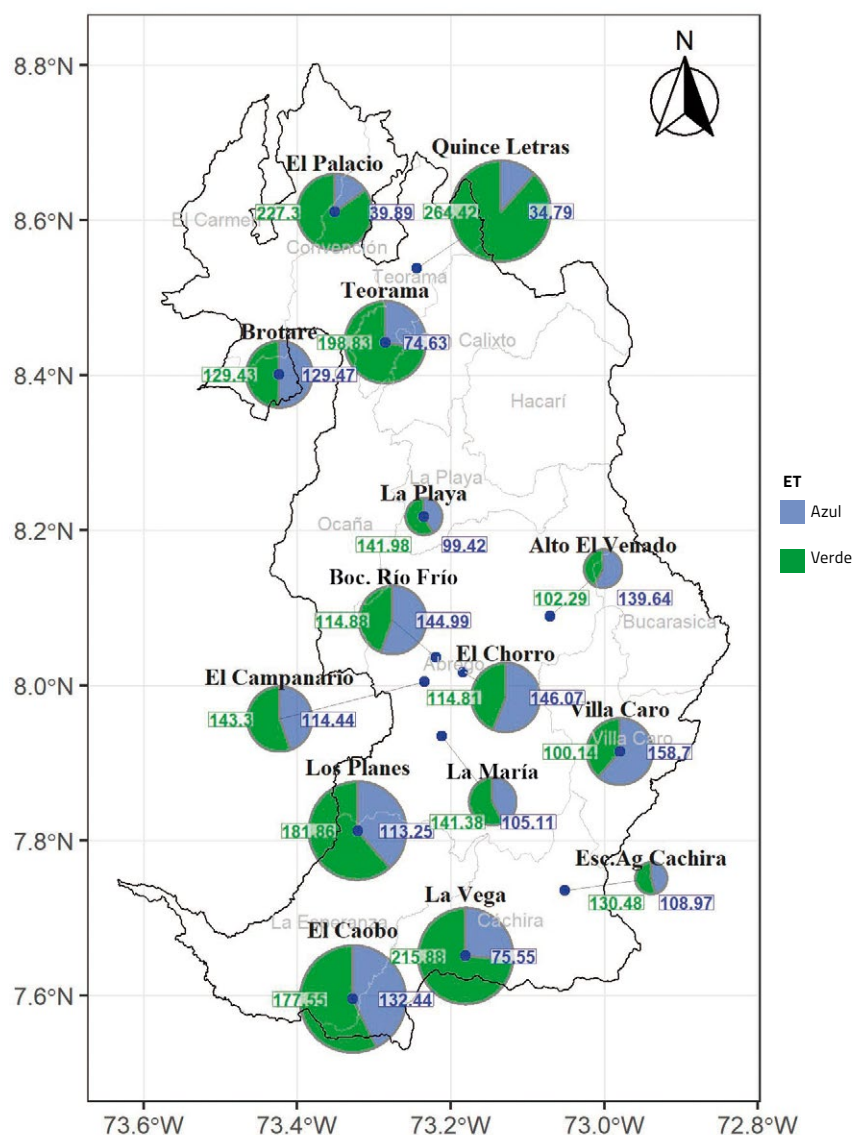


Figura 16. ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 1, condición climática normal.

Fuente: Elaboración propia

De nuevo se toman los datos de las estaciones 16050020 (Quince Letras) y 23185180 (Escuela Agrícola Cáchira) como ejemplos guía para la interpretación y los posibles usos de los índices ET_{azul} y ET_{verde} . En el área de influencia de la estación 16050020 (localizada en inmediaciones del municipio de Teorama), un cultivo de cebolla ocañera requiere 331,5 mm de agua (3,315 m³/ha) durante el ciclo para su producción en condición estándar (sin presentar estrés hídrico por déficit), de los cuales 228,2 mm (2,282 m³/ha) pueden ser soportados por las lluvias (ET_{verde}) y el restante, que son 103,3 mm (1,033 m³/ha), deben complementarse a través de riego (ET_{azul}). Es importante aclarar que la cantidad de agua azul requerida corresponde al valor neto aplicado en la zona de raíz; por tanto, en la práctica se necesita un volumen mayor, puesto que la eficiencia de riego nunca es del 100 %. Según el Ideam (2023), la eficiencia de riego por aspersión en Colombia se estima en un 75 %; por ende, si se asume dicho valor, el volumen de agua real requerida para riego es de 1,377 m³/ha. De igual manera, el indicador permite identificar el porcentaje de aporte en los dos componentes: para este caso, la ET_{verde} aportó un 68,83 % del agua evapotranspirada, mientras que la ET_{azul} representó 31,16 %.

De manera análoga, para un cultivo de cebolla de bulbo ubicado en la zona representada por la estación 23185180 (Escuela Agrícola Cáchira) se necesitan 2,587 m³/ha de agua durante el ciclo; en este caso, 1,357 m³/ha pueden ser soportados por la lluvia y 1,640 m³/ha complementados por el riego, asumiendo la eficiencia de riego anteriormente mencionada. La ET_{verde} brindó el 52,4 % del total de agua evapotranspirada, mientras que la ET_{azul} , el 47,6 %. Asimismo, este tipo de comparaciones y cálculos son replicables a la condición seca y húmeda (figura 17).



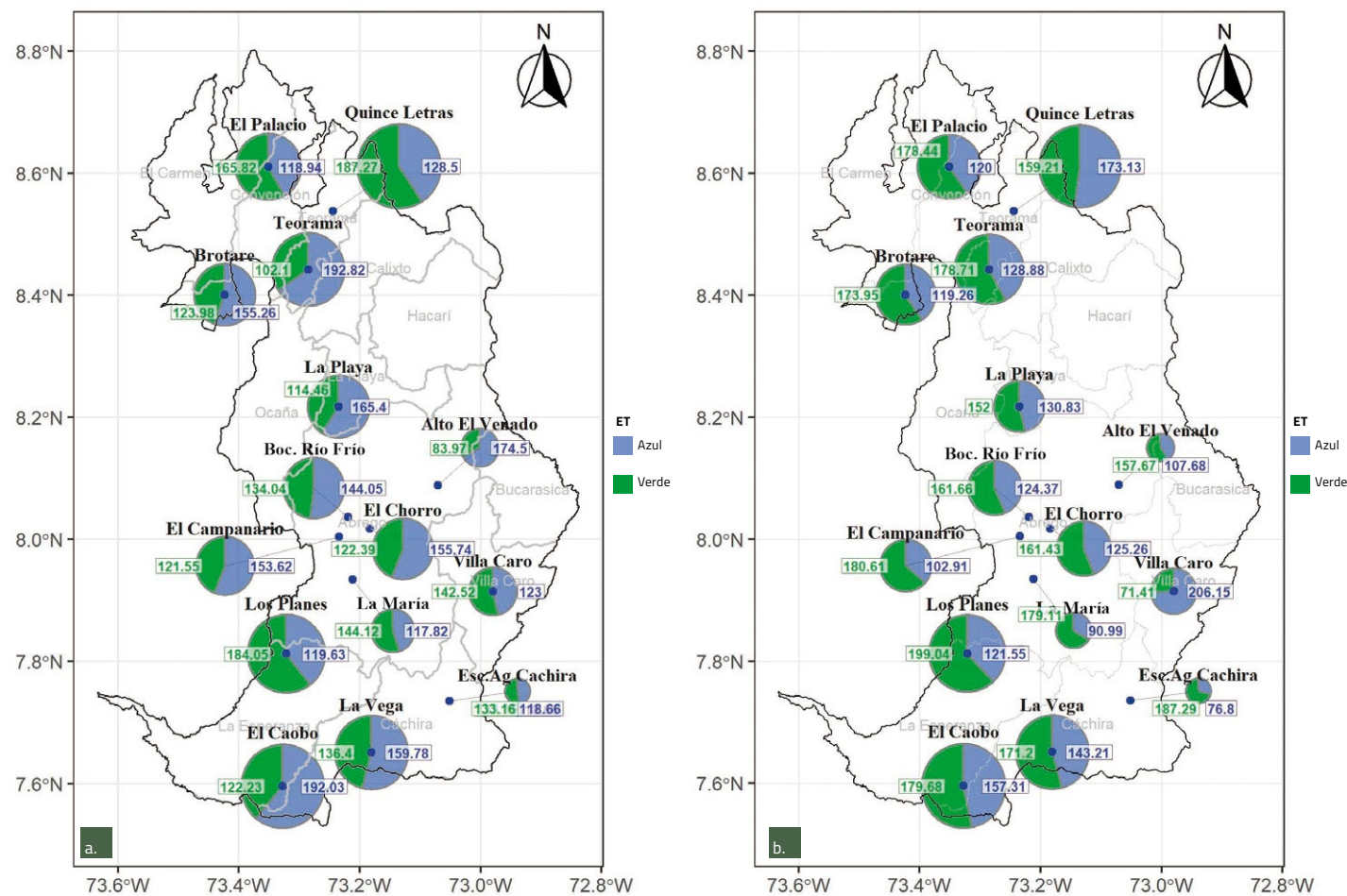


Figura 17. ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 1. a. Condición climática seca; b. Condición climática seca húmeda.

Fuente: Elaboración propia

Otro ejemplo de la utilidad del indicador ET_{azul} se aprecia en la figura 18, en la cual se proyecta el volumen de agua de riego necesario para una eficiencia del 75 % por condición climática para los sitios evaluados. Como se indicó anteriormente, la mayoría de las estaciones meteorológicas muestran que el mayor requerimiento de agua azul de presenta en la condición seca, pero para el caso de 16030090 (Villa Caro) y 16030090 (Quince Letras) el mayor requerimiento se presenta en la condición húmeda, con valores de 2,748 y 2,308 m³/ha, respectivamente. Estos valores son útiles para dimensionar la construcción de reservorios, estructuras hidráulicas de distritos de riego y labores asociadas a la planificación del riego para el cultivo.

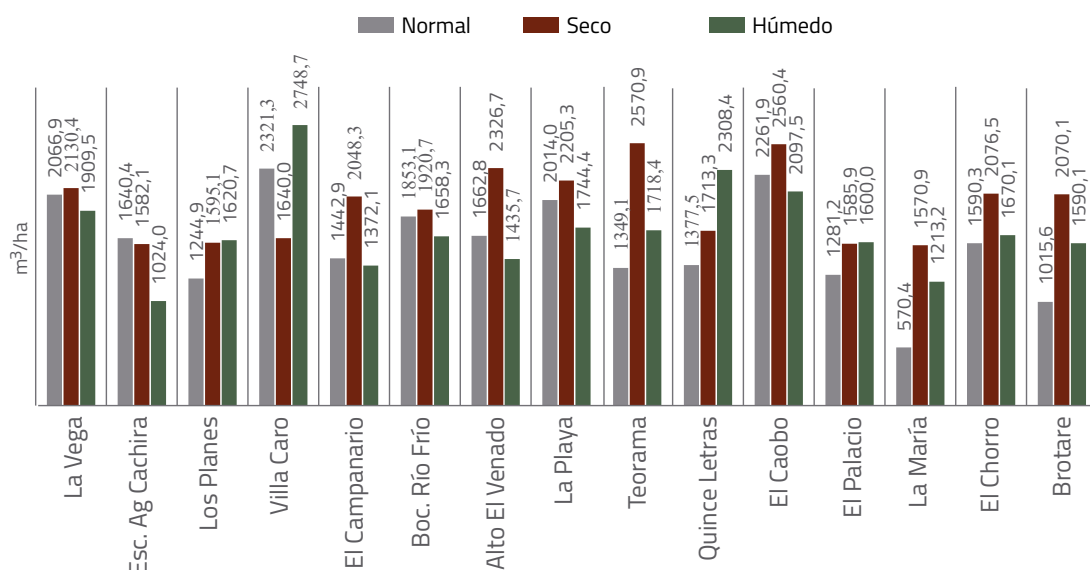


Figura 18. Volumen de agua azul requerida en el semestre 1, para una eficiencia de riego del 75 %.

Fuente: Elaboración propia

Semestre 2

Así como los resultados del semestre 1 que presentaron condición climática normal (16030090 [Quince Letras] y 23185180 [Escuela Agrícola Cáchira]), se puede ver que se mantiene la proporción de consumo total: mayor consumo en la zona de 16030090 y menor en 23185180 (figura 19) con 301,91 y 245,35 mm, respectivamente. En cuanto a la proporción entre ET_{verde} y ET_{azul} , se aprecia que en 16030090 el 75,6 % de consumo de agua se dio a partir

de la disponibilidad de las lluvias con una ET_{verde} de 228,3 mm (2,283 m³/ha) y el restante 24,4 % debe complementarse con riego; es decir, con una ET_{azul} de 73,7 mm (737 m³/ha). En cuanto a la zona donde se encuentra ubicada la estación 23185180 (Escuela Agrícola Cáchira), las proporciones fueron diferentes: el 47,2 % de agua consumida por el cultivo fue surtido por las lluvias (1,157 m³/ha), mientras que el 52,8 % (1,295 m³/ha) debe ser provisto por agua de riego.

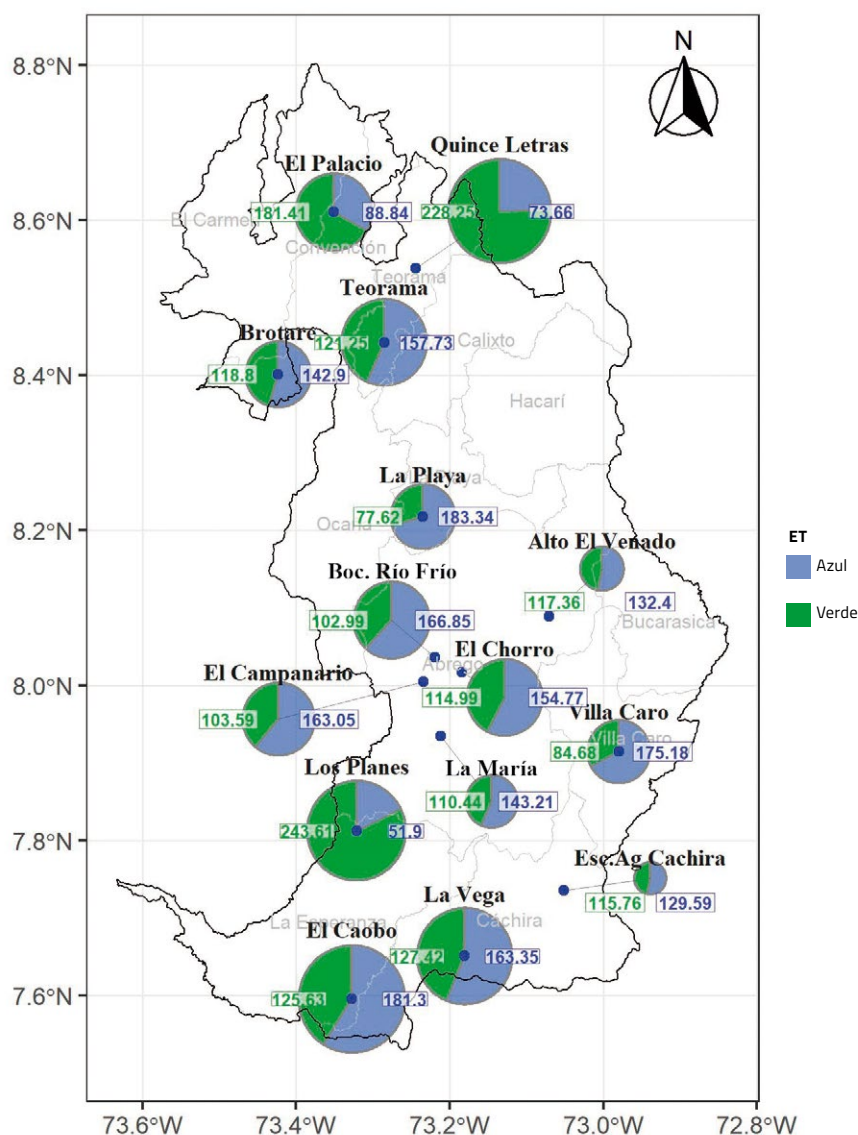


Figura 19. ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 2, condición climática normal.

Fuente: Elaboración propia

La figura 20 indica los resultados de la condición climática seca y húmeda para el semestre 2. Son evidentes las diferencias en las proporciones de consumo de agua del cultivo entre la ET_{verde} y ET_{azul} . En la condición seca (figura 20a) domina el consumo de la ET_{azul} en la mayoría de los puntos analizados, debido a la menor disponibilidad de lluvias, con algunas excepciones que serán analizadas en la figura 21. Lo mismo aplica para la condición húmeda (figura 20b): las proporciones de ET_{verde} son dominantes en la mayoría de los puntos, dada la mayor disponibilidad de precipitaciones.

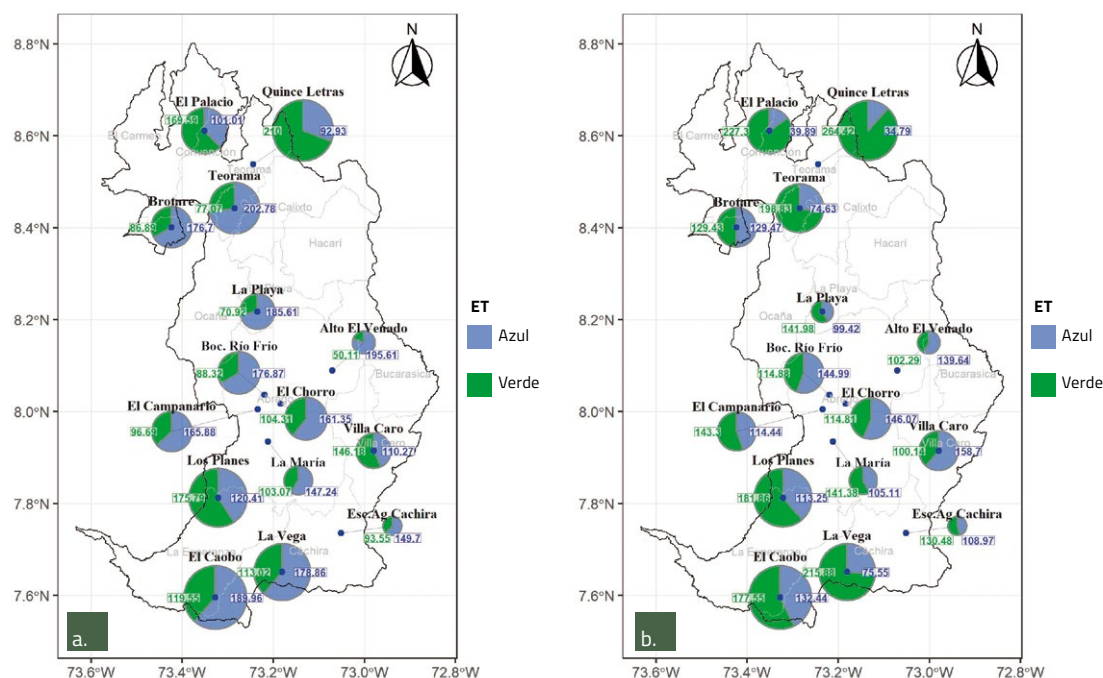


Figura 20. ET_{azul} y ET_{verde} para el semestre 2. a. Condición climática seca; b. Condición climática húmeda.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 21, se indica que el mayor volumen de agua azul requerida se presenta en la estación 16055020 (Teorama) con 2,703 m³/ha, seguida de 16040010 (Alto El Venado) con 2,608 m³/ha y de 23190510 (El Caobo) con 2,532 m³/ha. Los menores requerimientos de riego se presentan en 16030090 (Quince Letras) con 1,239 m³/ha y en 16050240 (El Palacio) con 1,346 m³/ha.

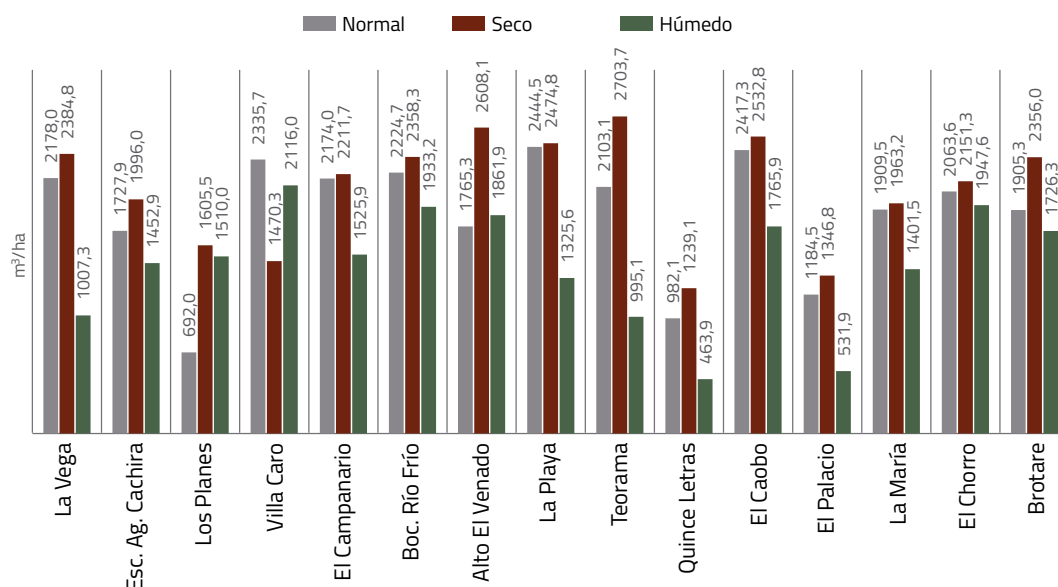


Figura 21. Volumen de agua azul requerida en el semestre 2, para una eficiencia de riego del 75 %.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al comparar los dos semestres, en la figura 22 se observa, como tendencia, que los mayores requerimientos para riego se presentan en las condiciones secas del semestre 2; por lo tanto, para la planificación de siembras y gestión del recurso hídrico es recomendable hacer las proyecciones para el abastecimiento de agua y las labores relacionadas, tomando como aspectos críticos las condiciones anteriormente mencionadas.

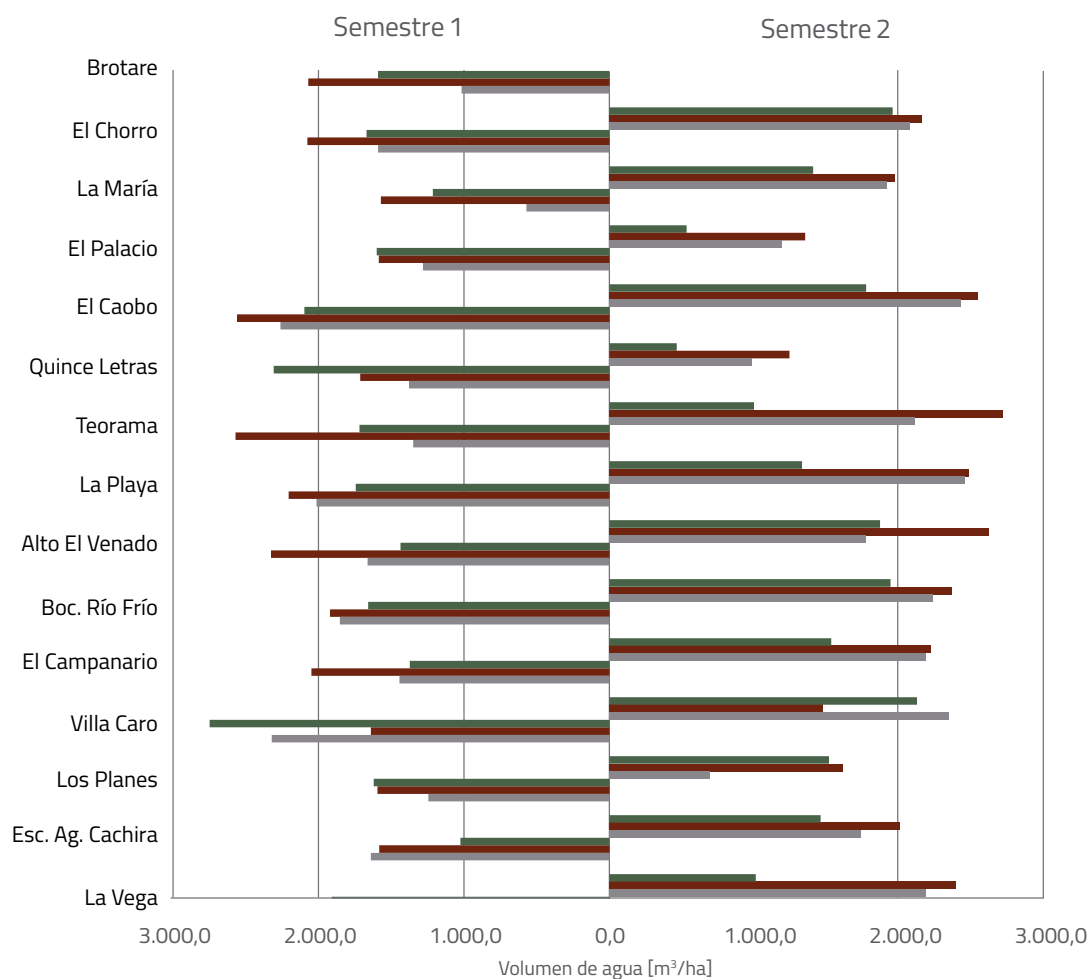


Figura 22. Comparación de volumen de agua para riego entre el semestre 1 y el semestre 2.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV

Degradación de suelos y erosión del núcleo productivo

67

La degradación de los suelos es un problema ambiental, social, económico y cultural que se encuentra ligado a condiciones de bienestar de la humanidad. De acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD, 2020), aproximadamente el 33 % de los suelos en el planeta ya está degradado y el 90 % podría estarlo en 2050. La misma convención señala que una quinta parte de la población vive y trabaja sobre suelos degradados y la generación de 2 o 3 cm de suelo puede tomar miles de años. Las causas de la degradación son multifacéticas y tienen orígenes naturales y antropogénicos que crean una reducción de la función de los suelos, sus servicios ecosistémicos y la productividad, lo que trae como resultado el deterioro de la estructura social, económica y ambiental de las comunidades (Bateman & Muñoz-Rojas, 2019).

De acuerdo con el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC, 2022), los procesos de degradación más relevantes en el país son el sellamiento de los suelos, la contaminación, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la compactación, la desertificación y la erosión. El SIAC señala que el 45,6 % del área continental e insular presenta algún grado de susceptibilidad a la degradación, ubicada principalmente en las cordilleras y en los valles interandinos donde se encuentran la mayor densidad de la población, la agricultura industrializada y de subsistencia, la minería, los proyectos viales, hidroenergéticos y turísticos.

El país ha realizado estudios de algunos procesos de degradación, especialmente salinización, y ha registrado un 12,7 % del área total continental e insular con susceptibilidad entre media y muy alta (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] et al., 2017); asimismo, desertificación con un 14,3 % de áreas con este tipo de degradación (Ideam et al., 2010), y erosión con un 39,8 % del área en algún grado (Ideam & Universidad de Ciencias Aplicadas [UDCA], 2015). En los otros procesos de degradación, no se tienen cifras nacionales, aunque para el caso de la pérdida de materia orgánica, a nivel nacional, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ha cuantificado el *stock* de carbono de 0 a 30 cm, con un resultado de 6,24 Gt, alrededor de 56,0 t/ha (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] e Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS], 2018). El área de estudio no cuenta con investigaciones detalladas de procesos de degradación de suelos; no obstante, al analizar los estudios nacionales descritos anteriormente, es posible indicar los siguientes aspectos relacionados con la zona.

Contexto de la degradación de suelos

68

Este apartado tiene como objetivo hacer un breve contexto acerca de la problemática generada por la degradación de suelos, a través de la desertificación, la salinización, el bajo contenido de carbono orgánico y la erosión.

Desertificación

De acuerdo con el Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT], 2005), los municipios en el área de estudio con mayor desertificación y sequía son Ocaña y Ábrego; sin embargo, los restantes diez municipios también tuvieron áreas con este tipo de degradación. En la tabla 8, se muestran las áreas y el grado de desertificación.

Tabla 8. Área y grado de desertificación en municipios de la zona del proyecto

Municipio	Área total (km ²)	Área con desertificación (km ²)	%	Grado (%)			
				Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Ábrego	1625	166	10,2	0,9	2,6	6,7	0,0
Bucarasica	271	46	17,0	15,1	1,8	0,0	0,0
Cáchira	496	77	15,5	1,5	13,7	0,3	0,0
Convención	913	12	1,3	1,3	0,0	0,0	0,0
El Carmen	1523	68	4,5	4,5	0,0	0,0	0,0
La Esperanza	412	68	16,6	1,0	3,8	4,0	7,7
Hacarí	423	19	4,5	0,0	4,5	0,0	0,0
La Playa	233	62	26,8	11,6	2,5	12,7	0,0
Ocaña	391	164	42,0	2,0	26,6	13,4	0,0
San Calixto	391	2	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0
Teorama	951	4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
Villa Caro	389	82	21,1	2,7	18,5	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia, a partir de MAVDT (2005)

Después de señalar por municipio el grado de desertificación, se encontró que a nivel general el 9,6 % del área presenta este tipo de degradación (770 km²); el grado moderado es el más representativo (43,3 %), seguido del alto (27,1 %), luego del bajo (25,5 %) y por último del muy alto (4,1 %). Estos datos permiten afirmar que, a pesar de la presencia de este tipo de degradación de suelos en la zona, la afectación identificada se caracteriza por ser puntual y por tener una influencia en alrededor de la décima parte del territorio, pero con posibilidades de extenderse, pues debido a los fenómenos de variabilidad climática como El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la precipitación en zonas deficitarias, como amplias zonas en los municipios de Ocaña, Ábrego o La Playa, podría disminuir; esto generaría mayor evapotranspiración (por aumento de la temperatura) y por ende una ampliación de las zonas subhúmedas secas ($P/ETP=0,5-0,65$), las cuales son susceptibles a este tipo de degradación.

Salinización

A partir del estudio realizado por el Ideam et al. (2017), se identificó que el 72,5 % del área presenta una muy ligera salinización, sin dominancia específica; en el área restante, el 22,1 %, el grado de salinización es moderada, de clase magnésica, y el 4,6 % es de grado severo y muy severo, de clase sódica. La figura 23 muestra la distribución de este tipo de degradación en el área de estudio.

La clase de salinización hace referencia al tipo de sal o ion dominante en la solución y el complejo de cambio del suelo; esta es magnésica cuando el contenido de magnesio intercambiable es mayor que el 40 % y sódica cuando hay una alta cantidad de sodio intercambiable ($PSI > 15 \%$) y bajo nivel de sales solubles ($CE < 4 \text{ dS/m}$). Aunque casi tres cuartas partes del área de estudio no tienen problemas por salinización, existen municipios en los cuales estos problemas se agravan, como es el caso de El Carmen, Teorama, Hacarí, La Esperanza y Cáchira, donde el grado severo tiene incidencia.

La manifestación más clara de la salinización es aquella asociada al menor o al bajo crecimiento de los cultivos, y está directamente relacionada con la productividad, en especial con aquellos que utilizan agua de riego para suplir sus demandas hídricas. Es común que al incorporar agua de riego haya ascenso de sales del subsuelo a la superficie y que esto afecte los cultivos, lo que podría restringir la capacidad de toma de agua de las plantas, dado que se altera la presión osmótica y, por consiguiente, en lugar de que el agua se mueva de la matriz del suelo a la planta se mueve en sentido inverso, lo cual genera marchitamiento y deshidratación en las plantas.



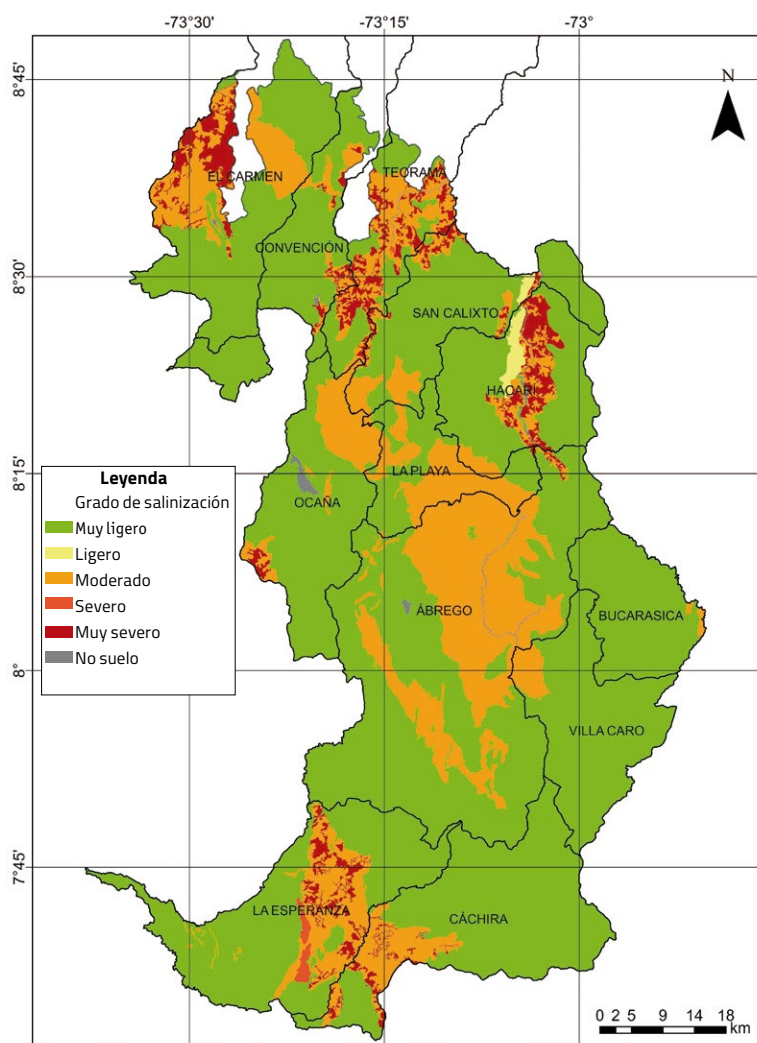


Figura 23. Grado de salinización en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Ideam et al. (2017)

Por lo anterior, además de identificar muy bien las fuentes naturales de sales, producto de los procesos químicos que se originan en la biosfera, es importante, al usar riego, realizar los análisis de calidad y dureza de agua para irrigación.

Carbono orgánico

El carbono orgánico es primordial en la producción de alimento y la mitigación y adaptación al cambio climático, ya que altos contenidos están asociados a procesos que proveen a las plantas los nutrientes y el agua que necesitan para

incrementar su fertilidad y agua disponible, lo que a su vez mejora la productividad de los cultivos. El *stock* de carbono orgánico en suelos (sco) es producto de la densidad aparente, la cantidad de fragmentos de roca, la profundidad y el contenido de carbono orgánico. De acuerdo con un estudio realizado por el IGAC (FAO e ITPS, 2018), para el área de estudio el valor promedio de sco en la capa superficial (0-30 cm) se calculó en $67,2 \pm 22,7$ t C/ha, con un valor mínimo de 20 y un máximo de 192 t C/ha. El valor promedio alcanzado para el área es mayor que el promedio nacional (56,0 t C/ha); la distribución puede observarse en la figura 24. Aunque el valor de sco es mayor que el promedio calculado para el país, cuando se compara con la región Andina es menor (83,8 t C/ha), pero cuando se hace el mismo ejercicio con la región Caribe es mayor (38,5 t C/ha). Se mencionan estas dos regiones naturales porque el área de estudio, aunque se encuentra dentro de la primera, incorpora elementos de la segunda y colinda con esta.

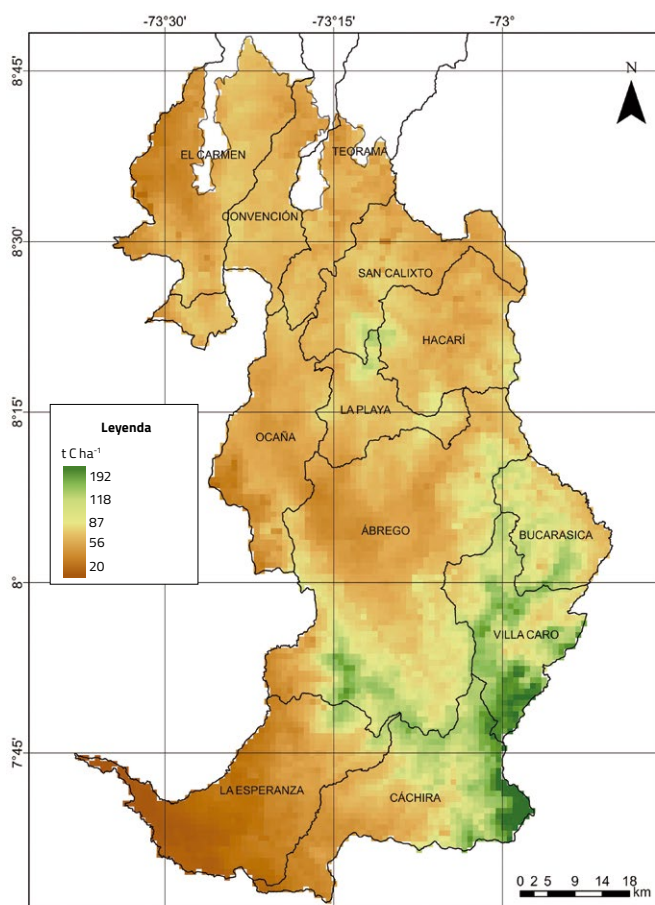


Figura 24. Stock de carbono en suelos entre 0 y 30 cm en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, a partir de IGAC (citado por FAO & ITPS, 2018).

Erosión

Otro proceso de degradación corresponde a la erosión; este, aunque es un proceso natural, se puede ver intensificado y acelerado por acciones antrópicas. De acuerdo con el Ideam y la UDCA (2015), la erosión corresponde a la pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre por acción del agua o del viento, que es mediada por el hombre, y trae consecuencias ambientales, sociales, económicas y culturales. Para el área de estudio, la erosión causada por la acción del agua es la más representativa, pues en esta las gotas de lluvia o de riego, en conjunto con la fuerza gravitacional, generan un arrastre de las partículas del suelo, y así desplazan los sedimentos y forman zanjas y cárcavas. En la figura 25, se observan las clases de erosión hídrica que se presentan en el área de estudio.

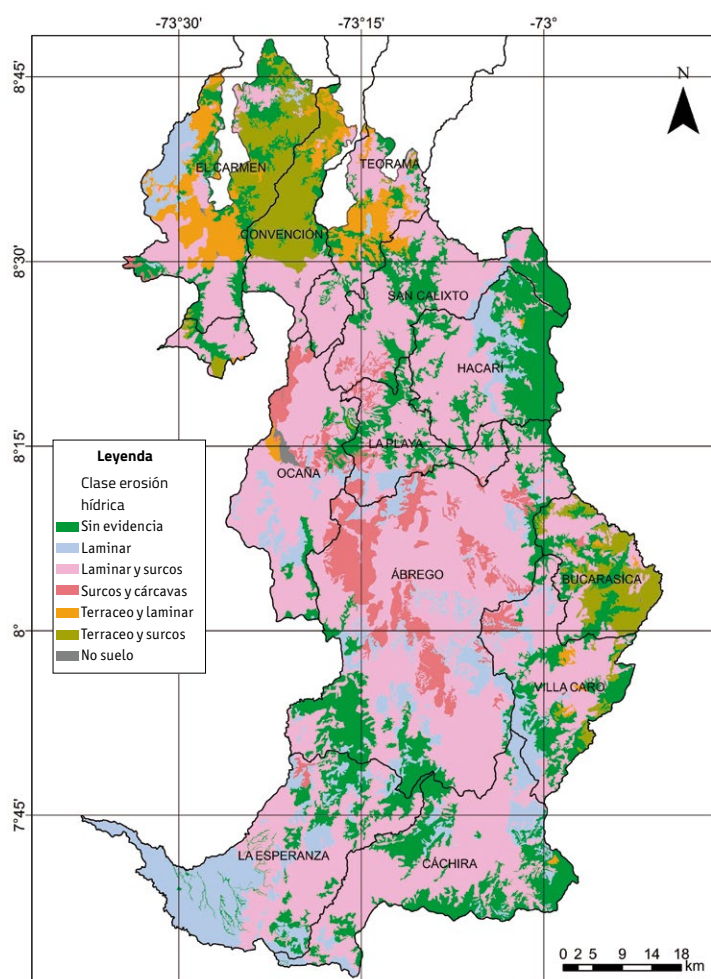


Figura 25. Clases de erosión hídrica en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Ideam y UDCA (2015)

Teniendo en cuenta el estudio realizado por el Ideam y la UDCA (2015), la clase de erosión hídrica más representativa la constituye la combinada entre laminar y surcos (50 % del área), seguida por la laminar (12,3 %) y surcos y cárcavas (5,4 %). El área sin evidencia de erosión alcanzó el 21,8 %. Estos resultados señalan que el 78 % del área tiene alguna clase de erosión hídrica, y el terraceo es la menos representativa.

En lo que respecta al grado, el mismo estudio del Ideam y de la UDCA (2015) menciona que el 46,5 % se considera moderado; el 20,2 %, ligero; el 10,3 %, severo, y el 1,0 %, muy severo. Lo anterior indica que casi tres quintas partes del área de estudio tienen un grado de erosión en el que se evidencian o se encuentran completamente removidos los horizontes superficiales y subsuperficiales del suelo. Esta condición permite observar con frecuencia surcos, cárcavas y calvas o terraceos. Estas zonas requieren prácticas de conservación y restauración inmediatas o urgentes, dado que las funciones y los servicios originales de los suelos están destruidos.

En la figura 26, se muestra el grado de erosión hídrica que presenta el área de estudio. Cabe señalar que el mismo estudio identificó en Ocaña y Ábrego dos focos de erosión; es decir, zonas donde se inicia el proceso erosivo de arranque del suelo en un grado severo y muy severo.



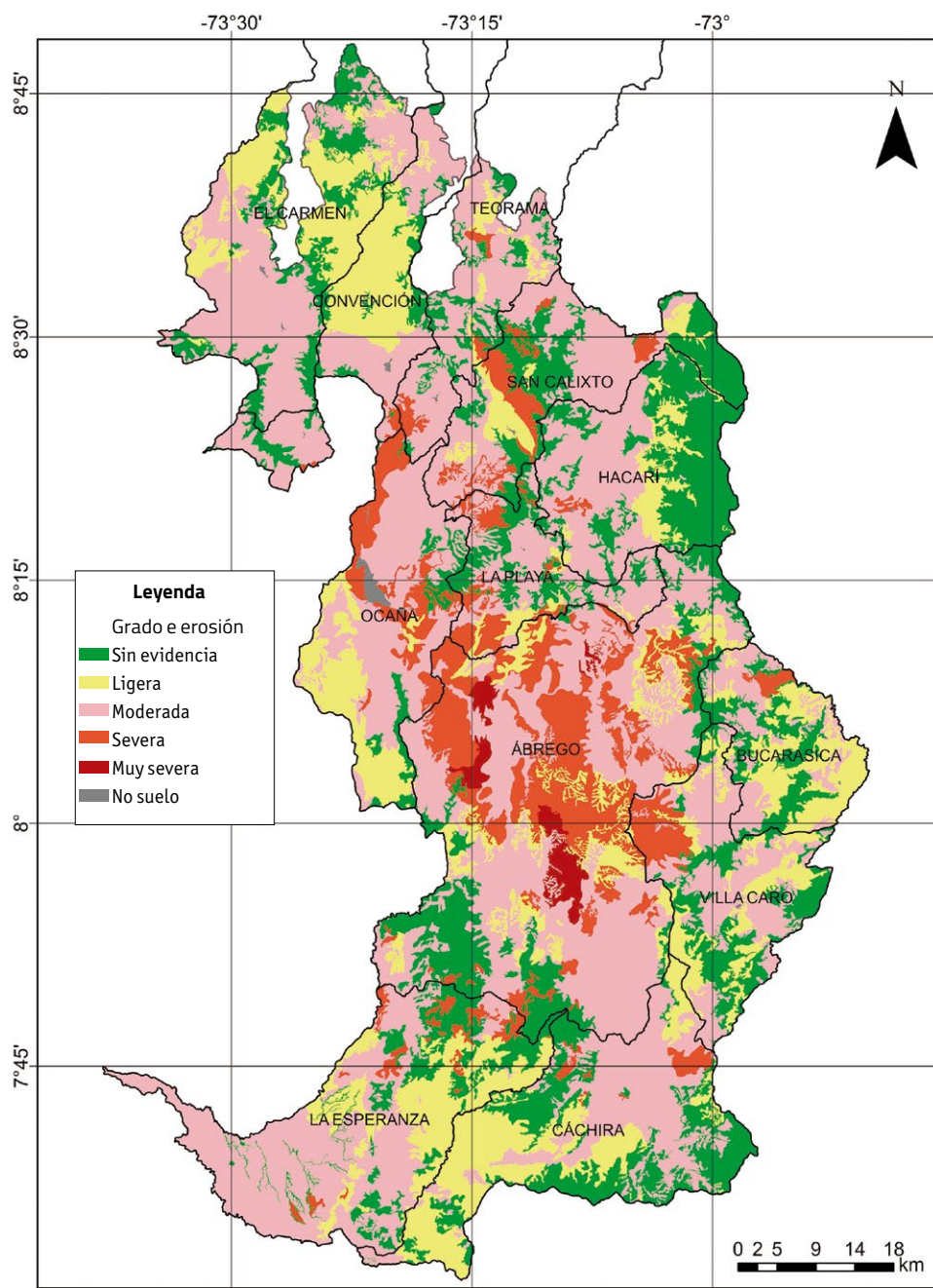


Figura 26. Grado de erosión hídrica en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Ideam y UDCA (2015)

Indicador de calidad de suelos seleccionado

Con los resultados de diferentes procesos de degradación de suelo que se analizaron para el área de estudio, fue posible identificar que aunque para los cuatro procesos existen zonas con alta vulnerabilidad o alto grado de degradación, no todos estos tienen el mismo patrón, severidad y posibilidad de análisis en detalle. Por lo anterior, se planteó un indicador de calidad de suelos en función del proceso de degradación que mayor impacto está generando en la zona, el cual por su representatividad corresponde a la erosión hídrica.

En este caso, el planteamiento no partió de replicar la metodología que desarrollaron el Ideam y la UDCA (2015), basado en el modelo FPEIR (fuerzas motrices, presiones, estado, impactos y respuestas), un modelo propio elaborado para poder identificar, analizar y evaluar los diferentes factores biofísicos y socioeconómicos que intervienen en la degradación de suelos por erosión. Aunque el modelo se caracteriza por la mirada integral de este proceso de degradación de tierras, no permite una evaluación en función de una razón o tasa, indicadores que pueden ser obtenidos a partir de otros modelos, como los de carácter empírico que se usan en una gran cantidad de estudios; por ejemplo, el caso de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por su sigla en inglés), desarrollada por Wischmeir y Smith (1978), o la ecuación USLE revisada (RUSLE, por su sigla en inglés), desarrollada por Renard et al. (1997). Estos modelos, en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG) y los productos de sensores remotos, han permitido evaluar la erosión del suelo y su distribución geográfica (López-Vicente & Navas, 2009; Mitasova et al., 2013; Sahu et al., 2021). Su simplicidad, mínimo requerimiento de datos y aplicabilidad en varios relieves y regiones han permitido que el modelo USLE haya sido ampliamente utilizado para tres aplicaciones críticas (Sahu et al., 2021): 1) ayuda en la detección y selección de prácticas agrícolas; 2) recomendaciones de cultivos, y 3) evaluación de pérdidas de suelo asociadas a erosión hídrica.

Sin embargo, cabe señalar que, como todo modelo, USLE tiene limitaciones, entre ellas el proceso de asignación de valores de diferentes factores asociados que se basan en un concepto empírico, lo que introduce errores en la selección de los valores apropiados (Sahu et al., 2021), la aplicabilidad y efectividad bajo diferentes condiciones (Demirci & Karaburum, 2012), y no incluye la pérdida de

suelo como resultado de la formación de cárcavas ni estima la deposición de sedimentos en áreas específicas (Beskow et al., 2009). Entendiendo que los patrones espaciales de cambio en el uso y la cobertura de la tierra aceleran los procesos erosivos en áreas susceptibles, se enfatiza en la necesidad de reevaluar o complementar las aproximaciones cualitativas que se tienen en la zona, como la alcanzada por el Ideam y la UDCA (2015) y Borrelli et al. (2017).

Aunque en los últimos años los modelos han puesto un gran interés en representar los procesos físicos, el hecho de escalarlos en el espacio y en el tiempo implica grandes desafíos (Hu & Flanagan, 2013). Nearing (2013) observó que la desventaja de los modelos basados en procesos es la complejidad del modelo y sus sustanciales requerimientos de datos, lo que imposibilita su aplicación por encima de escalas de campo o pequeñas áreas de captación. En este contexto, modelos empíricos para predecir la erosión hídrica de suelos, principalmente laminar y en surcos, como *RUSLE* (también llamados modelos basados en aproximaciones [Renard et al., 1997]), pueden proveer estimaciones razonables para propósitos prácticos (Borrelli et al., 2017). *RUSLE* es muy usado gracias a su claridad y es comparativamente sencillo para el cálculo de sus parámetros de entrada con referencia a otros modelos (Eniyew et al., 2021).

En el modelo *RUSLE* se consideran seis factores: la erosividad de la lluvia (*R*), la erodabilidad del suelo (*K*), la longitud de la pendiente (*L*), la inclinación de la pendiente (*S*), la cobertura de la tierra (*C*) y un factor de práctica y manejo de la tierra (*P*). De esta manera, la expresión matemática principal de modelos *USLE* se presenta en la ecuación 10:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde *A* es la pérdida de suelo media anual, expresada en t/(ha año).

R es expresada en MJ mm/(ha h año).

K es expresada en t ha h/(h MJ mm).

L es expresada en m.

S es expresada en %.

C y *P* son adimensionales.

La erosividad de la lluvia

La erosividad de la lluvia hace referencia a la propensión del suelo a ser arrastrado desde una región perturbada o sin vegetación hacia las aguas superficiales durante las tormentas. Es determinada por las características físicas de la precipitación, que incluye el tamaño de la gota de lluvia, su propagación, su energía cinética, su velocidad terminal, entre otros factores. De acuerdo con Wischmeier y Smith (1978) y Renard y Freimund (1994), la erosividad es el promedio anual a largo término del producto de la energía cinética de un evento de lluvia (E) en MJ/ha y la intensidad máxima de la lluvia en 30 min (I_{30}) en mm/h.

Sin embargo, debido a que E y I_{30} no están disponibles en el área de estudio porque no se tiene registro en estaciones climáticas en periodos amplios de estas variables, en especial la intensidad, ha sido cuantificado a partir de modelos que la relacionan con la precipitación anual. Dentro de estos modelos se destacan el de Roose (1976), para el occidente de África; el índice modificado de Fourier (IMF), desarrollado por Arnoldus (1977) para Marruecos; el de Hurni (1985) para Etiopía, o el de Renard y Freimund (1994) para la parte continental de Estados Unidos. En el caso de Suramérica, se destaca el modelo propuesto por Riquetti et al. (2020), en el que se incorporan, además de datos climáticos (precipitación y temperatura), variables geográficas como altitud, longitud y latitud. Para Colombia, se destacan los modelos desarrollados por Hoyos et al. (2005) en la zona cafetera, los cuales involucran el comportamiento estacional de las lluvias. No obstante, para la zona de estudio fueron utilizados los modelos planteados por Ramírez Ortiz (2006) y Ramírez Ortiz e Hincapié (2009), en los cuales el factor R es asociado al IMF, como se expresa en la ecuación 11:

$$EI_{30} = \sum_{i=1}^{12} 38,4 IMF_m + 28,3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde IMF es calculado como muestra la ecuación 12:

$$IMF_m = \frac{p_i^2}{P_t} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde p_i es la precipitación mensual (mm) y P_t es la precipitación anual (mm). Ramírez Ortiz (2006) encontró para este modelo un coeficiente de determinación de 0,64 para la zona cafetera central del departamento de Caldas. En la figura 27, se evidencia la erosividad para la zona de estudio.

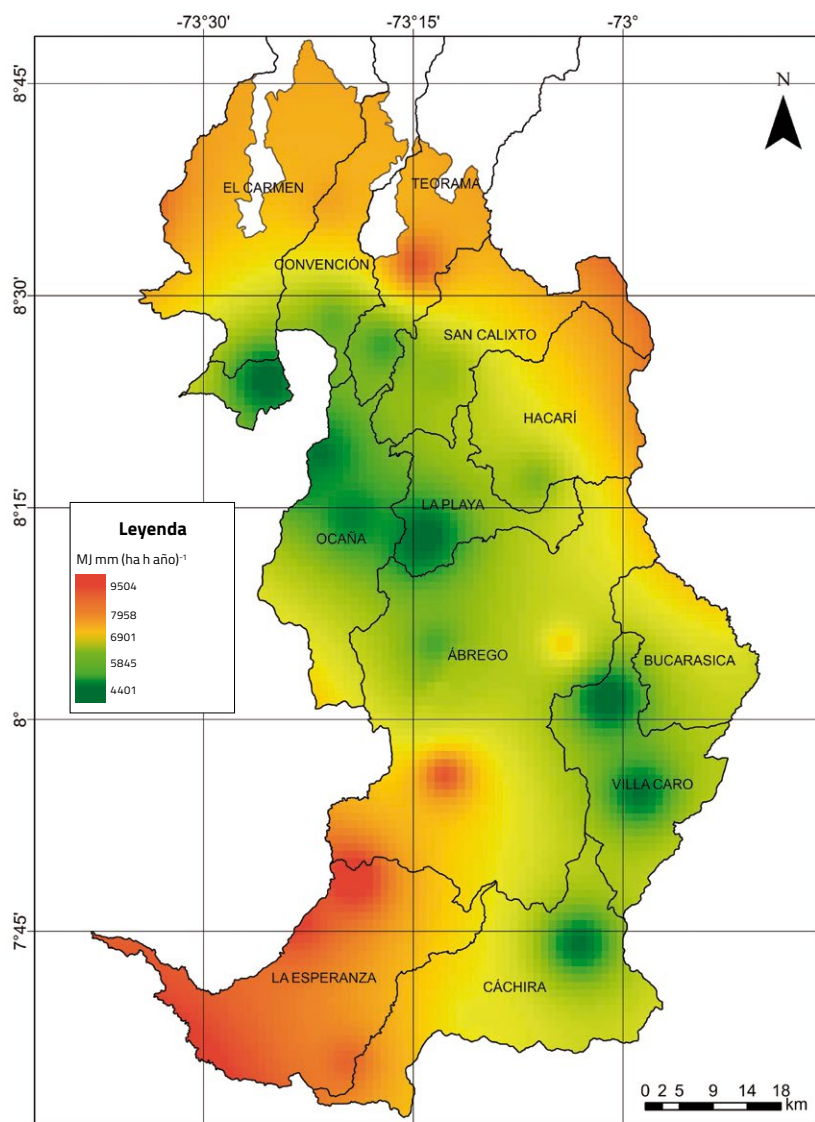


Figura 27. Factor calculado en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el modelo seleccionado, el factor de erosividad de la lluvia tuvo un promedio de $6.975 \pm 881 \text{ MJ mm}/(\text{ha h año})$, un valor mínimo de 4.401 y máximo de $9.504 \text{ MJ mm}/(\text{ha h año})$. Estos valores, de acuerdo con la clasificación de erosividad de las lluvias propuesta para la zona cafetera colombiana por Rivera-Posada y Gómez-Aristizábal (1991), se consideran moderados ($5.000\text{-}7.500 \text{ MJ mm}/[\text{ha h año}]$), con valores medios similares a los reportados por Echeverry Tafur y Obando Moncayo (2010) para la región

centro-sur del departamento de Caldas (7.953-10.389 MJ mm/[ha h año]), más bajos que los reportados por Hoyos et al. (2005) para la cuenca de Dosquebradas en el departamento de Risaralda (10.409-15.975 MJ mm/[ha h año]) y más altos que los reportados por Guio-Martínez et al. (2015) en la cuenca del embalse de La Copa en el departamento de Boyacá (2.550-3.676 MJ mm/[ha h año]). En cuanto a su distribución, es posible observar que en elevaciones más bajas la erosividad fue menor, en especial al sur del área de estudio (municipio La Esperanza) y al norte (Teorama y San Calixto). Dada la dependencia de la erosividad con respecto a la distribución de las lluvias en el área de estudio, también fue clara la asociación entre las zonas con mayores volúmenes anuales (norte y sur del área de estudio) y la mayor erosividad. La zona central (Ocaña y La Playa) y Villa Caro presentan las áreas evaluadas con menor erosividad.

Aunque Borrelli et al. (2017) desarrollaron un mapa de erosión global siguiendo el modelo *RUSLE* con una resolución nativa de 250 m, los datos compartidos y disponibles en *European Soil Data Centre* (ESDAC) (Panagos et al., 2012) no están en esa resolución, sino que fueron resampleados a 25 km, una aproximación sumamente gruesa para regiones como la provincia de Ocaña. Teniendo en cuenta lo anterior, el resultado del factor *R* fue de 5.775 MJ mm/(ha h año), con un mínimo de 2.299 y un máximo de 10.184 MJ mm/(ha h año). Otros modelos internacionales, como el desarrollado para Suramérica por Riquetti et al. (2020), dan cuenta de que los valores obtenidos se asemejan bastante (6.055 ± 1.424 MJ mm/[ha h año]). Cabe señalar que el modelo sudamericano tuvo una fuente de información distinta, con datos climáticos provenientes de WorldClim (Fick & Hijmans, 2017), con un rango base de análisis entre 1961 y 2005, mientras que el desarrollado en esta zona contó con información climática del Ideam del periodo 1991-2020.

La erodabilidad del suelo

El factor *K* (o factor de erodabilidad del suelo) es la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión medida sobre una “parcela unitaria”, definida de manera arbitraria, con un largo de 22,13 m, un ancho mínimo de 1,83 m y con una inclinación uniforme de pendiente del 9 %, en barbecho continuo y con labranza en toda su sección (Wischmeier & Smith, 1978). Römken et al. (1997) indican que es una propiedad compleja que debe ser vista como el cambio en el suelo por la aplicación de una fuerza externa o energía, un efecto integrado de la lluvia, escorrentía e infiltración. El factor *K* puede ser estimado usando una

regresión que describe la relación entre la resistencia del suelo al desprendimiento y al transporte, y las propiedades físicas y químicas del suelo. Esta relación, desarrollada en un nomograma por Wischmeier y Smith (1978), está basada en la expresión que se muestra en la ecuación 13:

$$100K = 2.1 \times 10^4 \times (2-MO) \times M^{1.14} + 3.25 \times (s-2) + 2.5 \times (p-3) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde MO es la materia orgánica, M es el producto del porcentaje de limo modificado o entre 0,002-0,1 mm de tamaño y la suma del porcentaje de arena y limo, s es la estructura del suelo (codificada de acuerdo con clasificación de suelos) y p es la clase de permeabilidad del perfil. No obstante, debido a que la ecuación 13 requiere datos de propiedades físicas (fracciones texturales, estructura, permeabilidad) y químicas (materia orgánica) que no están disponibles en ciertas zonas, algunos investigadores han generado aproximaciones considerando una menor cantidad de datos y de más fácil obtención. Römken et al. (1997) derivaron una alternativa menos precisa para la estimación de la erodabilidad usando únicamente información de texturas. Para ello se basaron en el concepto del diámetro medio geométrico de la partícula de las fracciones texturales D_g .

Por su parte, el modelo *Erosión/Productivity Impact Calculator* (EPIC) (Sharpley & Williams, 1990) utiliza para el cálculo pocas propiedades, entre ellas el contenido de carbono orgánico (CO) y la distribución de tamaño de las partículas del suelo. Torri et al. (1997) obtuvieron un ajuste no lineal del factor K en función de las variables D_g , CO y el porcentaje de arcilla. Teniendo en cuenta que para la provincia de Ocaña solo se dispone de la información de suelos del estudio general a escala 1:100.000 del IGAC (2004), con gran parte de esta contenida en las distintas unidades cartográficas de suelo (UCS), se optó por conseguir la información de textura y de carbono a partir de modelos continuos, como los derivados del mapeo digital de suelos (MDS) (McBratney et al., 2003).

Para el caso de las fracciones texturales, se utilizaron los productos generados por Varón-Ramírez et al. (2022) respecto a la capa superficial (≈ 20 cm). Estos autores construyeron mapas texturales a partir de información de los perfiles de suelo del IGAC y de covariables ambientales auxiliares, e implementando un ensamble espacial que incluyó diferentes algoritmos de aprendizaje automático. Aunque las capas que se usaron fueron generadas a una resolución

gruesa (1 km²), se obtuvieron parámetros de bondad de ajuste para identificar la precisión de las capas empleadas, las cuales se consideraron aceptables, entendiendo sus limitaciones (tabla 9).

Tabla 9. Parámetros de bondad de ajuste de capas texturales utilizadas

Parámetro	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)
EMA	7,69	9,81	6,3
EM	-0,57	2,05	-1,47
R ²	0,33	0,26	0,03
REMC	9,08	12,21	8,7

EMA: Error medio absoluto; EM: Error medio.; R²: Coeficiente de determinación;
REMC: Raíz cuadrada del error medio cuadrático.

Fuente: Varón-Ramírez et al. (2022)

Para el caso del CO, se desarrolló un modelo propio a partir de la información de suelos del área. Siguiendo los planteamientos del MDS, con 87 perfiles de suelos del estudio del IGAC (2004) y 17 covariables ambientales (que incluyeron variables climáticas, de suelo, relieve y cobertura) se construyó un modelo ensamblado de aprendizaje automático, integrado por un modelo de regresión lineal múltiple, un modelo de bosques aleatorios optimizado (*ranger*) y un modelo en forma de árbol de decisión que hace uso de reglas para subconjuntos de datos (*cubist*). El producto de ese modelo se comparó con el generado a nivel mundial por SoilGrids, versión 2.0 (Poggio et al., 2021), el cual es un referente para aproximaciones basadas en MDS. Los resultados se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de bondad de ajuste de capas de carbono orgánico comparadas

Parámetro	CO (%) modelo ensamblado	CO (%) SoilGrids
EMA	1,09	2,29
EM	0,18	-2,25
R ²	0,27	0,13
REMC	1,45	2,68

EMA: Error medio absoluto; EM: Error medio.; R²: Coeficiente de determinación;
REMC: Raíz cuadrada del error medio cuadrático.

Fuente: Elaboración propia

Con las variables de suelo anteriores se calcularon los mapas de erodabilidad con el modelo D_g , EPIC y Torri et al. (1997). A nivel estadístico, los resultados se expresan en la tabla 11.

Tabla 11. Valores del factor obtenidos para la provincia de Ocaña

Modelo	$t\ ha\ h/(ha\ MJ\ mm)$			
	Valor mínimo	Valor medio	Valor máximo	Desviación estándar
D_g	0,003	0,021	0,044	0,013
EPIC	0,006	0,050	0,072	0,005
Torri et al. (1997)	0,000	0,021	0,037	0,007

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que, de acuerdo con algunos estudios (Godoi et al., 2021; Wang et al., 2013), modelos como el D_g o EPIC suelen subestimar los valores de K . Con el modelo de Torri et al. (1997), de acuerdo con la clasificación propuesta por Rivera-Posada y Gómez-Aristizábal (1991), la zona evaluada tuvo una calificación de erodabilidad entre muy baja y baja (0,01-0,04 $t\ ha\ h/[ha\ MJ\ mm]$). Los valores fueron más altos que los que reportaron Ramírez-Ortiz et al. (2009) para suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas, y Rengifo-Rengifo et al. (2022) para los valles interandinos y zona subandina del departamento del Cauca. Al contrastarlos con los valores del modelo global de Borrelli et al. (2017), se encontró que para la zona los valores obtenidos fueron muy similares ($0,021 \pm 0,005\ t\ ha\ h/[ha\ MJ\ mm]$).

Los resultados del factor K indican que las zonas hacia el noroccidente de Ábrego y el centro de Ocaña y La Esperanza fueron las que presentaron tasas más altas ($> 0,03\ t\ ha\ h/[ha\ MJ\ mm]$); en contraste, zonas en el sur de Ábrego y norte de La Esperanza y Cáchira presentaron bajos valores. En la figura 28, se observa la distribución del factor K en la provincia de Ocaña.

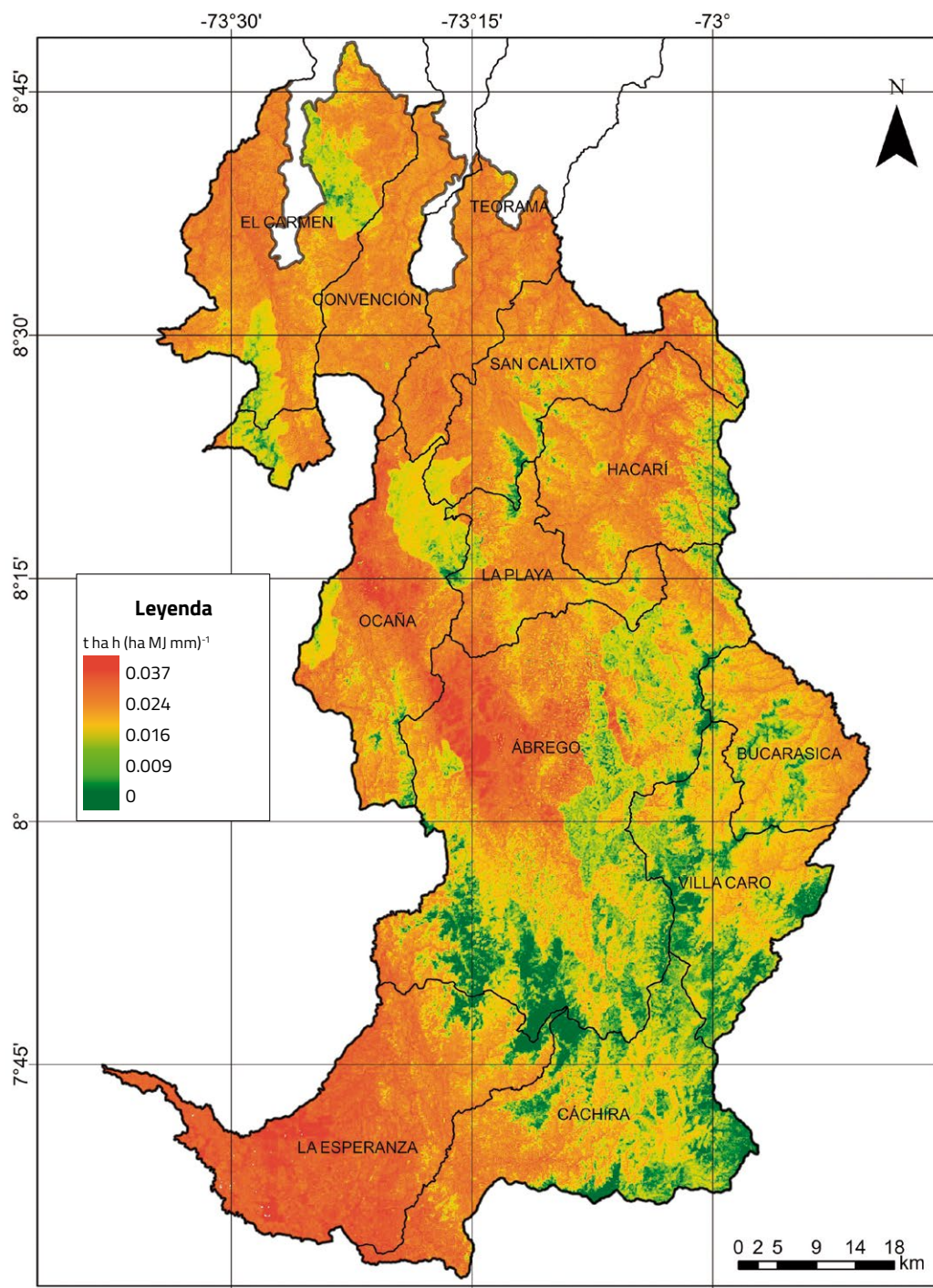


Figura 28. Factor K calculado en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Factores de longitud (L) e inclinación (S) de la pendiente

El factor de longitud de la pendiente (L) y de la inclinación de la pendiente (S) son dos parámetros de carácter topográfico que suelen ser considerados uno solo (LS) y están definidos como la relación de pérdida de suelo de un campo por unidad de área con una longitud e inclinación de pendiente definidos (22,13 m y 9 %, respectivamente) y la pérdida de suelo en una condición de barbecho continuo (Wischmeier & Smith, 1978). Los efectos de la inclinación de la pendiente tienen un mayor impacto que la longitud (Olorunfemi et al., 2020); no obstante, cuanto mayor y más larga sea la inclinación y la longitud de la pendiente, mayor será la tasa de erosión del suelo (Hudson, 1995).

La resolución espacial del modelo digital de elevación (MDE), disponibilidad de recursos computacionales y la escala de trabajo son los principales problemas que se deben considerar para el procesamiento del parámetro LS (Eniyew et al., 2021). Un MDE con resoluciones espaciales mayores que 100 m no representa de manera precisa la red de drenaje de una cuenca (Panagos, Borrelli, Meusburgerb, Van der Zanden et al., 2015), por ello un MDE con una resolución fina (< 15 m) es mejor para identificar y determinar el factor LS en áreas vulnerables a nivel de subcuenca hidrográfica (Benavidez et al., 2018). Por lo anterior, el MDE seleccionado correspondió al provisto por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), a partir de la misión *Advanced Land Observation Satellite* ($ALOS$), cuya resolución espacial fue de 12,5 m. El factor LS se calculó usando la aproximación del terreno bidimensional propuesta por Desmet y Govers (1996), cuyo algoritmo se encuentra disponible en el programa *System for the Automated Geoscientific Analyses* ($SAGA$). La configuración de la aproximación incluyó un tipo de pendiente local y un área específica de la cuenca a partir de la longitud de esta. Además, y siguiendo el procedimiento planteado por Panagos et al. (2015), la estimación fue limitada a una pendiente con un ángulo máximo de 50 %. El resultado se muestra en la figura 29.

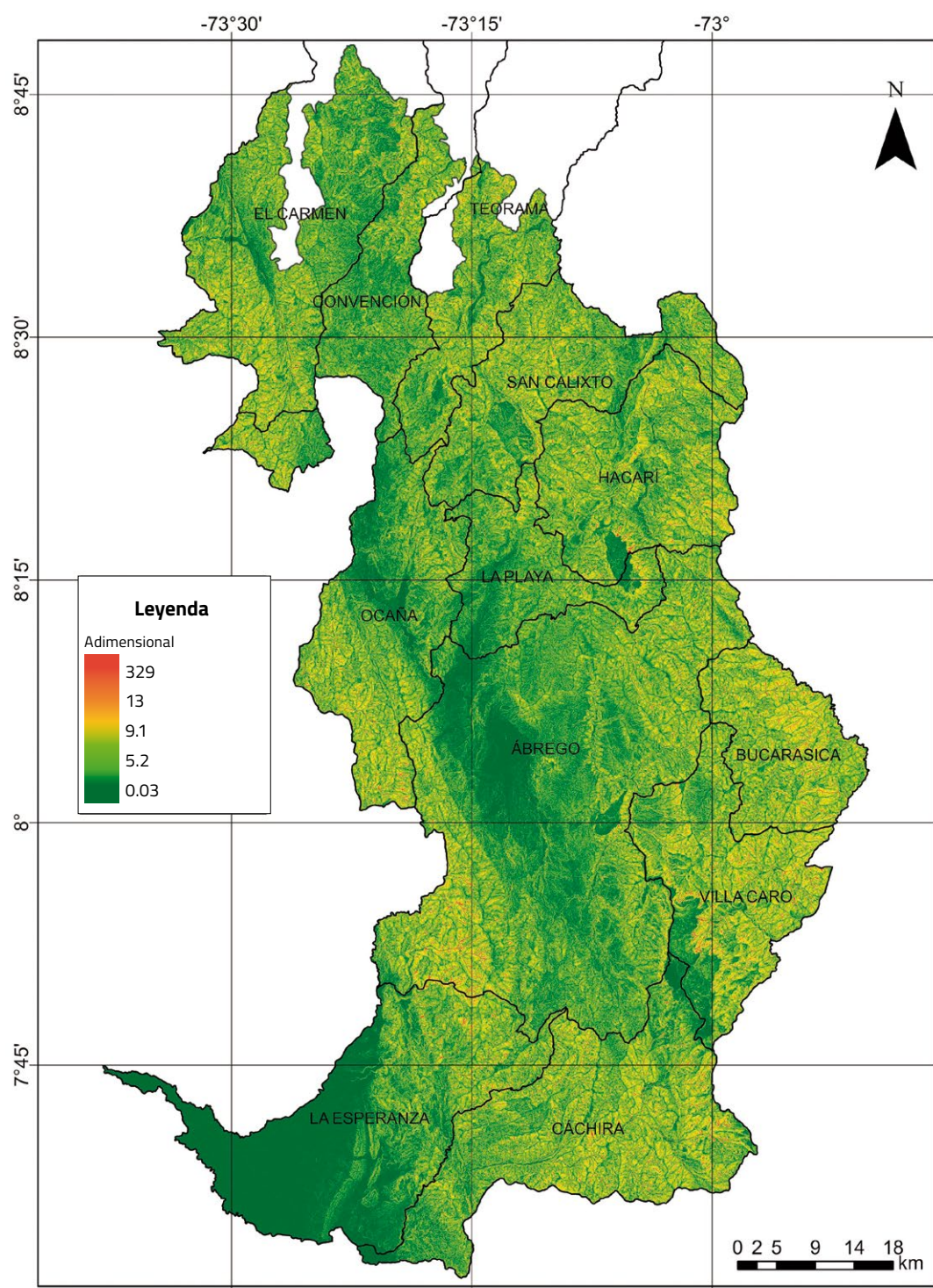


Figura 29. Factor *LS* calculado en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mostraron que el valor promedio fue de $5,27 \pm 3,31$, con un valor mínimo de 0,03 y máximo de 329. Como era de esperarse, debido a las condiciones orográficas, algunas zonas altas de las cuencas tuvieron los valores más altos. Una de ellas fue la zona suroccidental del municipio de Ábrego, en especial la zona más alta de la subzona hidrográfica con código 2319, que incluye al río San Alberto y algunos tributarios como las quebradas Chimborazo y Mataeplátano. Las zonas con valores más bajos se encontraron en los paisajes de valle en Ábrego, Iomerío en La Playa, Ocaña y Ábrego, y el piedemonte en el municipio de La Esperanza.

Factor de cobertura

El factor de cobertura C en la ecuación $RUSLE$ mide el efecto combinado de todas las coberturas interrelacionadas y su manejo (Wischmeier & Smith, 1978); es decir, refleja el efecto de las coberturas de biomasa y las actividades perturbadoras de los suelos (Alewell et al., 2019). El factor C se expresa como la relación entre la pérdida de suelo bajo condiciones especificadas frente a la pérdida correspondiente en barbecho continuo (labranza limpia). En consecuencia, es inversamente proporcional a la cubierta superficial del suelo, que intercepta las gotas de lluvia y atenúa la escorrentía superficial (Alewell et al., 2019). Por lo general, el factor C tiene un rango entre 1 y 0: 1 indica ninguna cobertura presente en la superficie que actúa como barrera, mientras que valores cercanos a 0 indican un efecto de cobertura muy fuerte y de buena protección sobre el suelo (Pham et al., 2018).

Las tecnologías dispuestas por los sensores remotos proveen mucha información acerca de la cobertura de la tierra a través del índice de diferencia normalizada de vegetación ($NDVI$, por su sigla en inglés), el cual se correlaciona de manera positiva con la cantidad de biomasa verde y da una indicación de la diferencia de cobertura de vegetación (Van der Knijff et al., 2000). El factor C ha sido calculado usando múltiples ecuaciones (De Jong, 1994; Durigon et al., 2014; Karaburun, 2010; Van der Knijff et al., 2000). No obstante, debido a las condiciones climáticas tropicales, con intensas lluvias y mayores coberturas vegetales, la ecuación que se usó en este caso para calcular el factor C fue la que desarrollaron Durigon et al. (2014), denominada factor C rescalado (C_r), y se expresa como se muestra en la ecuación 14:

$$C_r = \left(\frac{-NDVI+1}{2} \right)$$

Ecuación 14

Debido a la diversidad actual de imágenes de satélite disponibles y a diferentes resoluciones (espaciales, temporales, radiométricas y espectrales), se optó por utilizar la plataforma de geomática basada en la nube Google Earth Engine (GEE) para analizar tres conjuntos de imágenes de satélite, todas evaluadas en el mismo periodo: desde julio de 2018 hasta junio de 2022. Los conjuntos fueron: MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices, que ofrece un índice de vegetación cada 16 días, con un tamaño de pixel de 250 m; Landsat 8 OLI/TIRS colección 2, con preprocesamiento (reflectancia en la superficie y corregida atmosféricamente), con la cual se pudieron construir NDVI a 30 m de resolución y con una frecuencia de 16 días, y Sentinel 2, con un nivel de preprocesamiento 2A (reflectancia en la superficie, corregida atmosféricamente y orto-rectificada), con la cual se puede computar el NDVI a 10 m y con una frecuencia de 5 días. Dado que todos provienen de sensores pasivos (ópticos), la presencia de nubosidad, sombras y bruma es una limitante para su uso en ciertas condiciones o momentos.

Para el área de estudio, se calculó el factor C_r en los tres conjuntos de datos y pudo establecerse que para el caso de los productos de Landsat el factor tuvo un mayor promedio (0,37), mientras que para MODIS y Sentinel fueron más parecidos (0,13 y 0,17, respectivamente). Aunque Durigon et al. (2014) realizaron su trabajo principalmente con productos de Landsat (para el caso la misión Landsat 5), en el área de estudio la cercanía de los valores de MODIS y Sentinel 2 indicó que sobre estas plataformas se seleccionara el factor. En la figura 30 se muestra el factor C_r .

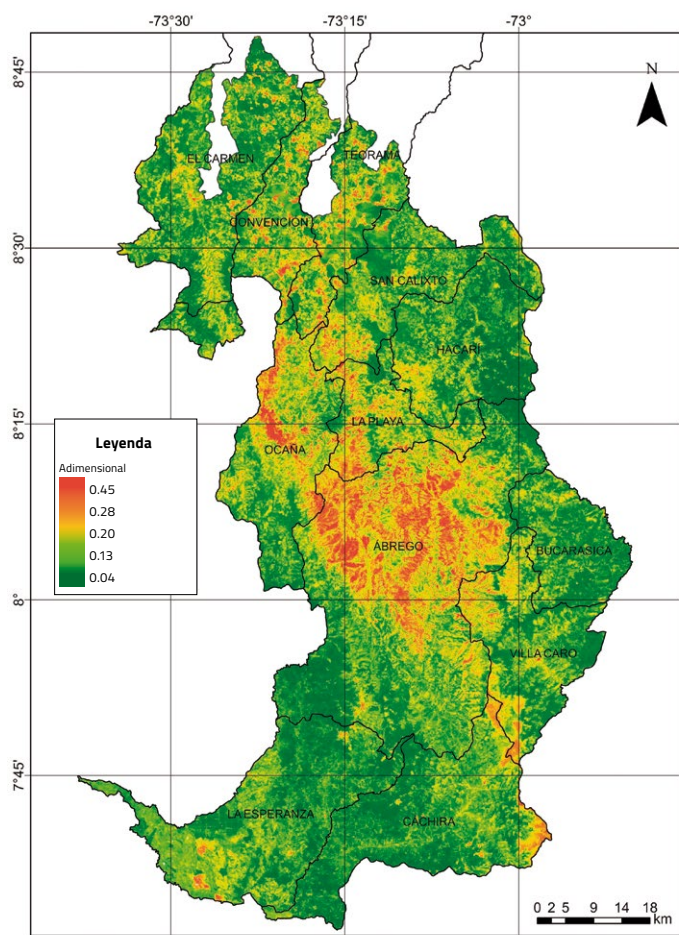


Figura 30. Factor C calculado en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

El resultado que se obtuvo mostró que Ábrego fue el municipio que mayor área tuvo con valores más altos del factor C, lo que indica que son menos las coberturas que actúan como barrera para prevenir la erosión. Gran parte de este resultado es derivado del misceláneo erosionado y rocoso que se encuentra en este municipio. El municipio de Ocaña también tuvo valores altos. En contraste, los municipios con mayor presencia de coberturas que actúan como barreras contra la erosión fueron Hacarí, Bucarasica, Cáchira y La Esperanza.

Factor de manejo

El factor P expresa la relación entre la pérdida de suelo en un campo con una práctica de manejo específica y la pérdida de suelo en condiciones de cultivo

en surcos o hileras rectas cuesta arriba y cuesta abajo (Alewell et al., 2019). Los valores típicos del factor P varían entre 0,2 para terrazas de banco en pendientes hasta 1,0 en zonas donde no se evidencian prácticas de control contra la erosión (Wischmeier & Smith, 1978). Este factor se considera el valor más incierto (Morgan & Nearing, 2011; Renard et al., 1997) debido a las dificultades de su estimación en campo, como la necesidad de observaciones directas a la parcela para determinar el tipo de uso del suelo e identificar el sistema de cultivo específico, aspectos que en escalas más amplias implican altos recursos en tiempo y dinero. Teniendo en cuenta lo anterior, el factor P fue asumido como 1 para toda el área de estudio. Cabe resaltar que asumir un solo valor no significa que en el área de estudio no existan parcelas, fincas o unidades productivas con prácticas de manejo o de conservación de suelos como cultivos en contorno, cultivos en franjas o terraceos; lo que quiere decir es que a la escala de generación de este factor no se cuenta con la información detallada para poder inferirlo de manera adecuada. Aunque existen metodologías que asocian el factor P a la inclinación de la pendiente (Wischmeier & Smith, 1978), se prefirió no usarlos para no incluir más incertidumbre sobre el resultado final del modelo.

La pérdida de suelo en el área de estudio

La información obtenida tras el cómputo de la ecuación 10 permitió tener un resultado general a partir de la conjunción de cada uno de los parámetros calculados (figura 31). Los resultados de pérdida se clasificaron de acuerdo con una adaptación de la metodología de la FAO et al. (1980) y la propuesta por Pérez (2001) (tabla 12).

Tabla 12. Clasificación de erosión hídrica actual o pérdida de suelo

Clase	Pérdida de suelo (t/[ha año])
< 10	Ninguna o ligera
10-25	Baja
25-50	Moderada
50-100	Alta
100-200	Muy alta
> 200	Extrema

Fuente: Elaboración propia, a partir de FAO et al. (1980) y Pérez (2001)

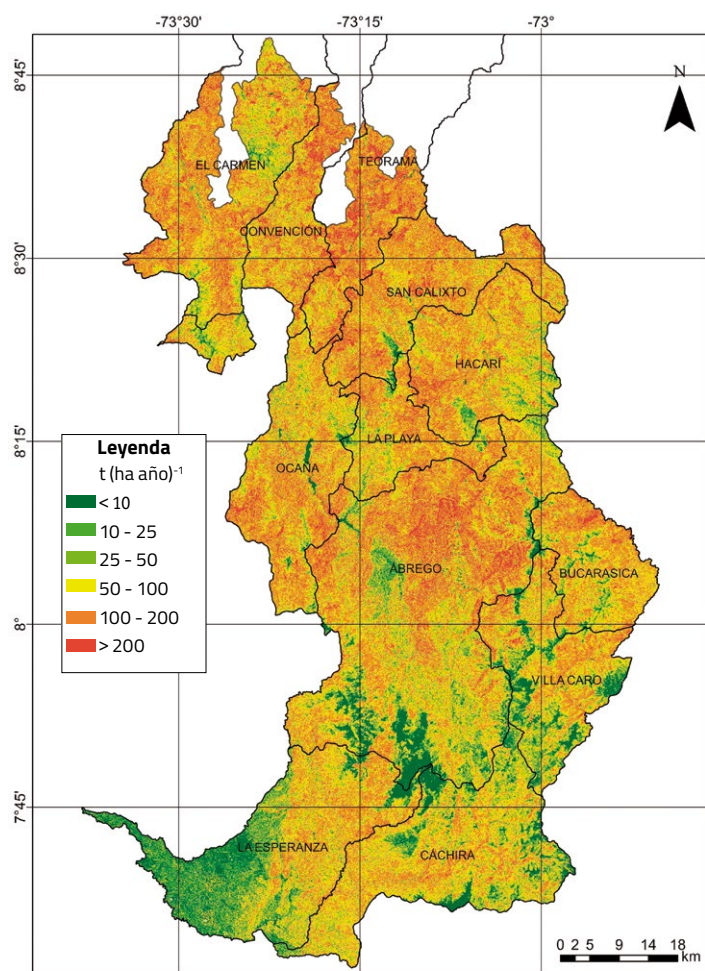


Figura 31. Pérdida de suelos actual en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

La pérdida de suelo en el área analizada fue clasificada como muy alta en el 35,9 % del área, seguida por la categoría alta con el 31,4 %. A lo anterior se suma que en el área de estudio alrededor del 75 % de esta tiene pérdidas de suelo superiores a 50 t/(ha año). Aunque en el trabajo desarrollado por el Ideam y la UDCA (2015), con una metodología diferente, el grado de erosión fue principalmente moderado, al comparar las áreas con las mayores pérdidas o grados de erosión se encontraron coincidencias; por ejemplo, las registradas en Ábrego y Ocaña, identificados en el trabajo del Ideam y la UDCA (2015) como focos de erosión y que, de acuerdo con los resultados (tabla 13), también se identifican con las mayores áreas en la categoría muy alta. No obstante, además de estos municipios, se identificó El Carmen como otra zona con muy alta pérdida de suelo.

Tabla 13. Pérdida de suelos por municipio

Municipio	Pérdida de suelos t/(ha año)												Total
	< 10	%	10-25	%	25-50	%	50-100	%	100-200	%	> 200	%	
Ábrego	8.602	6,2	9.486	6,9	19.069	13,8	40.867	29,7	47.050	34,1	12.720	9,2	137.794
Bucarasica	542	2,0	1.133	4,2	2.693	10,0	10.108	37,6	11.022	41,0	1.381	5,1	26.878
Cáchira	4.988	8,1	5.797	9,5	11.450	18,7	24.219	39,6	13.847	22,6	904	1,5	61.204
Convención	97	0,4	469	1,8	1.706	6,7	7.459	29,3	11.782	46,2	3.986	15,6	25.499
El Carmen	438	0,8	1.766	3,2	5.816	10,5	17.488	31,4	24.313	43,7	5.815	10,5	55.635
Hacarí	578	1,4	1.851	4,4	5.140	12,3	15.105	36,2	16.490	39,5	2.590	6,2	41.755
La Esperanza	8.961	13,8	14.607	22,5	10.627	16,3	16.817	25,9	13.160	20,2	870	1,3	65.042
La Playa	339	1,4	1.013	4,2	2.731	11,3	7.808	32,3	10.596	43,8	1.719	7,1	24.207
Ocaña	1.044	2,0	2.030	3,9	6.133	11,8	17.654	34,0	21.449	41,3	3.616	7,0	51.928
San Calixto	361	0,9	1.009	2,6	2.480	6,3	11.085	28,1	20.263	51,3	4.278	10,8	39.476
Teorama	146	0,6	310	1,2	1.068	4,2	5.117	20,0	12.876	50,3	6.070	23,7	25.587
Villa Caro	3.936	9,8	4.208	10,5	6.852	17,1	12.845	32,1	10.896	27,3	1.232	3,1	39.968
Total	30.032	5,0	43.679	7,3	75.766	12,7	186.572	31,4	213.745	35,9	45.180	7,6	594.973

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los factores del modelo *RUSLE*, como se mencionó anteriormente, la pérdida de suelo tampoco ha sido calculada para esta área de estudio. Sin embargo, una aproximación hecha a nivel global en la plataforma *GloSEM* (*Global Soil Erosion Modelling*) de alta resolución (≈ 100 m), versión 1.3 (Borrelli et al., 2022), se tuvo en cuenta para ser contrastada. Cabe señalar que *GloSEM* 1.3 solo fue calculado a nivel de áreas de cultivo, las cuales se seleccionaron con el mapa de cobertura de la tierra de la Agencia Espacial Europea (ESA, por su sigla en inglés) y *Copernicus Global Land Cover Layers – Land Cover* (CGLS-LC100 colección 3), y su objetivo fue generar una línea base (2019) y escenarios futuros (2070) de erosión de suelos. Al comparar los dos productos para las mismas áreas, se encontró que el obtenido con datos locales tuvo una tasa promedio mayor de pérdida (90 ± 77 t/[ha año]) frente al producto global ($69,4 \pm 68$ t/[ha año]). Al realizar la reclasificación (tabla 12), hay coincidencias respecto a la proporción de áreas en categorías moderada (13 %), alta (18 %) y muy alta (30,5 %); no obstante, el modelo local sí resalta zonas con categoría extrema (9 %).

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por su sigla en inglés) y el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por su sigla en inglés) (1999), la tolerancia en pérdida de suelos en cultivos agrícolas se encuentra entre 25 y 125 t/(ha año). Sin embargo, Kuhwald et al. (2022) indican que las pérdidas de suelo derivadas de la cosecha de los cultivos, cuya estimación es diferente a la planteada con el modelo *RUSLE*, puede alcanzar tasas de hasta 22 t/(ha cosecha), un valor que en cebolla fue calculado para zonas subsaharianas en 5,2 t/(ha cosecha) (Mwango et al., 2014).



Conclusiones

La fragilidad ambiental que caracteriza el núcleo productivo de cebolla ocañera indica una problemática que viene de muchos años atrás. Desde 1941 se ha reportado la degradación de suelos como un problema de alta relevancia en la zona. En la actualidad, los estudios de degradación de suelos han mostrado que la zona es altamente vulnerable, lo que indica que las prácticas de manejo de cebolla y de otros cultivos deben ser revaluadas, y además hacerles análisis que permitan que indicadores medibles y objetivos, como los determinados en este trabajo, aporten herramientas para la toma de decisiones que sinteticen el panorama general de la zona de estudio.

Como resultado del primer indicador analizado (tiempo térmico), se destaca que el centro y el sur del área de estudio presentan condiciones climáticas óptimas (acumulación entre 700 y 900 °Cd) para el ciclo del cultivo. Por lo anterior, desde el punto de vista biofísico, se encuentra que la provincia de Ocaña tiene condiciones térmicas óptimas para el desarrollo del ciclo de cultivo de cebolla ocañera, especialmente en el segundo semestre. Sin embargo, es necesario que en el marco de las actividades de investigación se establezcan con precisión los valores de temperatura base y el umbral de grados días acumulados para las diferentes variedades.

Con el segundo indicador (manejo del agua) se pone en discusión la manera como el deterioro de la calidad y la escasez del agua plantean retos para mejorar la eficiencia en su uso, como elemento fundamental para garantizar la seguridad alimentaria. La determinación de la huella hídrica permite estimar la cantidad de agua oculta, para un área específica; de esta manera, es estratégica para un contexto de un clima cambiante, ya que la determinación del requerimiento hídrico, basado en el cálculo de la ET_{verde} como agua acumulada en el suelo, y la ET_{azul} como aquella utilizable a través de riego, permite el cálculo en términos de

volumen de agua evapotranspirada en $\text{m}^3/(\text{ciclo ha})$, extrapolable como unidad de producción o rendimiento en términos de m^3/t .

El promedio general de consumo de agua para la cebolla ocañera varía entre 200 y 400 mm por cada ciclo, dependiendo de la zona, la condición y la época de análisis. Como rasgo general, se encontró que el primer semestre tiene mayor demanda de agua, sobre todo en términos de ET_{azul} más que en ET_{verde} , excepto en el sur de la zona de estudio en condición seca, donde la ET_{verde} está ligeramente por encima de la ET_{azul} .

Asimismo, el segundo semestre mantiene esta característica, solo que los porcentajes de consumo de agua por efecto de la ET_{verde} y la ET_{azul} pueden llegar a un 80 %, de acuerdo con la condición, como sucede en Quince Letras, Teorama, El Caobo, entre otras. Los aportes de este indicador para la gestión del recurso hídrico están planteados teniendo en cuenta las proyecciones para el abastecimiento de agua y las labores relacionadas, tomando como periodos críticos las épocas modales de siembra.

Es evidente que el deterioro ambiental que se observó en la zona de estudio a través de la degradación de suelos muestra este último indicador como el de mayor fragilidad. En este sentido, conforme a lo expresado en el capítulo 4, para la zona no existen datos experimentales de pérdida de suelo, y menos asociados al cultivo de cebolla; sin embargo, hay antecedentes en otros lugares donde se describen estas condiciones que permiten establecer la relación. Si la erosión de suelos es una consecuencia directa de la compactación producida por el paso repetido de ciclos de aplicaciones constantes de herbicidas y fertilizantes, en el trabajo de campo sobre cultivos tradicionales de cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) se encontraron pérdidas de hasta 14,4 t/(ha año), lo que sugiere la implementación inmediata de prácticas de conservación de suelos. Cabe señalar que las tasas de degradación de suelo de otros lugares, si se comparan con el lugar de estudio, pueden ser bajas. Esto se explica, entre otros factores, porque la inclinación promedio analizada fue del 25 %, mientras que en el área trabajada el promedio fue del 35 %.

Una de las soluciones para afrontar la problemática de la pérdida de suelos es el uso de cultivos de cobertura e incluso el manejo de “malezas”. Aunque el productor cree tener su cultivo “limpio” para facilitar las labores culturales en cada fase fenológica (aplicación de agroquímicos, deshierbe, cosecha, etcétera),

son evidentes las ventajas que ofrecen las coberturas asociadas, las cuales van desde el control biológico, hasta el secuestro de carbono de los suelos o el incremento en la proporción de materia orgánica. No obstante, dada la poca recepción por parte de productores al manejo de las coberturas o “malezas”, otras opciones como el manejo de *mulches* pueden ser aplicados. Cabe señalar que estas alternativas no se vienen aplicando de manera masiva debido a los altos costos asociados, pues estas coberturas (generalmente pastos de corte) vienen de zonas más bajas (departamento del Cesar) y su precio y transporte se han encarecido con el tiempo.

Teniendo en cuenta que el riego es una tecnología que utilizan la mayoría de los productores en el área de estudio, el modelo *RUSLE* tampoco tasa las pérdidas de suelo generadas por este. Lo anterior es importante porque la introducción de estas tecnologías puede derivar en el incremento de las pérdidas de suelo si no se realizan de manera adecuada. La selección inadecuada de boquillas o emisores de gotas gruesas hace que se presente una alta energía cinética, lo cual afecta la superficie del suelo, produce compactación y separación de las partículas, causa la obstrucción de los poros y, por ende, reduce la tasa de infiltración. Por consiguiente, es recomendable identificar los siguientes aspectos: conductividad hidráulica, tasa de infiltración, grado de compactación y porosidad de los suelos con mayor detalle. De esta manera, prácticas como la siembra en curvas de nivel, la instalación de sistemas de riego de acuerdo con los parámetros o las capacidades del suelo y del cultivo, la construcción de depósitos de almacenamiento de aguas debajo de los surcos o la aplicación de poliacrilamida hidrosoluble aniónica de alto peso molecular son algunas alternativas para reducir el impacto o las pérdidas de suelo derivadas de los sistemas de irrigación.



Referencias

- Alewell C., Borrelli, P., Meusbürger, K., & Panagos, P. (2019). *Using the USLE: Chances, challenges, and limitations of soil erosion modelling*. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203-225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- 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*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Araujo-Carrillo, G. A., Varón-Ramírez, V. M., Jaramillo-Barrios, C. I., Estupiñán-Casallas, J. M., Silva-Arero, E. A., Gómez-Latorre, D. A., & Martínez-Maldonado, F. E. (2021). IRAKA: The first Colombian soil information system with digital soil mapping products. *Catena*, 196, 104940. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104940>
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bull*, 34, 39-51.
- Bai, M., Zhou, S., Zhao, M., & Yu, J. (2017). Water use efficiency improvement against a backdrop of expanding city agglomeration in developing countries-A case study on industrial and agricultural water use in the Bohai Bay Region of China. *Water*, 9(2), 89. <https://doi.org/10.3390/w9020089>
- Bateman, A. M., & Muñoz-Rojas, M. (2019). To whom the burden of soil degradation and management concerns. En P. Ferreira (Ed.), *Soil Degradation, Restoration and Management in a Global Change Context* (pp. 1-22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.001>
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Benedetti, I., Branca, G., & Zucaro, R. (2019). Evaluating input use efficiency in agriculture through a stochastic frontier production: An application on a case study in Apulia (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 236, 117609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117609>

- Beskow, S., Mello, C. R., Norton, L. D., Curi, N., Viola, M. R., & Avanzi, J. C. (2009). Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using derrestreed modeling. *Catena*, 79, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>
- Borrelli, P., Ballabio, C., Yang, J. E. Robinson, D. A., & Panagos, P. (2022). GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. *Scientific Data*, 9, 406. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L. & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8, 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Campo Arana, R., & Pérez Polo, D. (2015). Efecto de la densidad de siembra y la fenología del ñame (*Dioscorea* spp.) sobre la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*). *Fitopatología Colombiana*, 39(2), 37-40. <https://ascolfi.org/download/2015-fitopatocol-v39-2/>
- Campos Aranda, D. F. (2005). *Agroclimatología: cuantitativa de cultivos*. Trillas.
- Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación [CNULD]. (2020). *World Soil Day 2020: Keep soil alive, protect biodiversity*. <https://www.unccd.int/news-stories/statements/world-soil-day-2020-keep-soil-alive-protect-biodiversity>
- Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar]. (2018). *Actualización del Pomca del río Algodonal (Alto Catatumbo) – Norte de Santander*. https://www.corpocesar.gov.co/actualizacion_del_pomca_del_rio_algodonal_norte_de_santander.html
- Cristancho, V. J., Buitrago, A. A., & Corredor, L. R. (1990). *El cultivo de la cebolla cabezona*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). <https://hdl.handle.net/11404/5508>
- De Albuquerque Maranhão, E. H., & De Albuquerque Maranhão, E. A. (2013). Factores que determinan el desarrollo de la “Raíz Rosada” de la cebolla causada por *Pyrenochaeta terrestris*. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, 5, 264-298. <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/182>
- De Faria Godoi, R., Rodrigues, D. B. B., Borrelli, P., & Oliveira, P. T. S. (2021). High-resolution soil erodibility map of Brazil. *Science of the Total Environment*, 781, 146673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146673>
- De Jong, S. M. (1994). *Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a mediterranean environment*. Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap.

- Demirci, A., & Karaburun, A. (2012). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the buyukcekmece lake watershed, northwest Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 66, 903-913. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1300-9>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], & Servicio de Conservación de Recursos Naturales [NRCS]. (1999). *National soil survey handbook: Title430-VI*. U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427-433. <https://www.jsowonline.org/content/51/5/427>
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458-459, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
- Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). *NDVI* time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 441-453. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>
- Duque M., C. M., Perdomo G., C. E., & Jaramillo V., J. (1989). Estudio de crecimiento y absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en cebolla, *Allium cepa* L., variedad ocañera. *Acta Agronómica*, 39(3-4), 45-53. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/15406
- Echeverry Tafur, L., & Obando Moncayo, F. H. (2010). Erosividad de las lluvias en la región Centro-Sur del departamento de Caldas, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5307-5318. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24951>
- Eniyew, S., Teshome, M., Sisay, E., & Bezabih, T. (2021). Integrating RUSLE model with remote sensing and GIS for evaluation soil erosion in Telkwonz Watershed, Northwestern Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100623>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Flörke, M., Schneider, C., & McDonald, R. I. (2018). Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability*, (1), 51-58. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>

- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gómez-Latorre, D. A., Araujo-Carrillo, G. A., Martínez, F. E., Rodríguez Roa, A. O., Estupiñán C., J. M., & Deantonio F., L. Y. (2021). Análisis de eventos climáticos extremos asociados a excesos de lluvia y heladas meteorológicas en el Altiplano Cundiboyacense de Colombia. *Revista de Climatología*, 21, 112-126. <https://rclimatol.eu/en/2021/09/18/analysis-of-extreme-climatic-events-associated-with-excessive-rainfall-and-meteorological-frosts-in-the-cundiboyacense-high-plateau-of-colombia/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2012). *Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de política*. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf
- Guio-Martínez, V. H., Cely-Reyes, G., & Moreno-Pérez, D. F. (2015). Determinación y mapeación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse de La Copa, Boyacá. *Ingenio Magno*, 6, 34-46.
- Higuera Carrillo, E. L. (2022). Comercio campesino local en vilo: una mirada teórica desde la acción colectiva de los campesinos productores de cebolla ocañera en el departamento norte de Santander. *Tesla. Revista Científica*, 2(1), 39-50. <https://doi.org/10.55204/trc.v2i1.15>
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2003). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. En A. Y. Hoekstra (Ed.), *Virtual water trade. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade* (pp. 25-47). IHE Delft.
- Hoyos, N., Waylen, P. R., & Jaramillo, Á. (2005). Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.014>
- Hu, L.-J., & Flanagan, D. C. (2013). Towards new-generation soil erosion modeling: building a unified omnivorous model. *Journal of Soil Water Conservation*, 68(4), 100-103. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.4.100A>
- Hudson, N. (1995). *Soil Conservation* (3.ª ed.). Iowa State University Press.
- Hurni, H. (1985). *Soil Conservation Manual for Ethiopia: A Field Guide for Conservation Implementation*. Verlag Nicht Ermittlbar.

- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (1982). *Informe anual de progreso 1981B-1982A. Programa Nacional de Hortalizas*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/20367>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrológicas de Colombia*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/MEMORIAS-MAPA-ZONIFICACION-HIDROGRAFICA.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], & Universidad de Ciencias Aplicadas [UDCA]. (2017). *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por salinización*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). <https://observatorio.epacartagena.gov.co/protocolo-para-la-identificacion-y-evaluacion-de-la-degradacion-de-suelos-por-salinizacion/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2010). *Protocolo para la identificación y evaluación de los procesos de degradación de suelos y tierras por desertificación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). http://www.ideam.gov.co/documents/11769/241818/20120814_Protocolo_desertific%20acion.pdf/c34ac460-215b-4cb8-8ffe-a8f9218e2bac
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], & Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA] (2015). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia - 2015*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1977). *Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia: memoria explicativa sobre el mapa ecológico*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Norte de Santander*.
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). *Clima Andino y café en Colombia*. Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafé). <http://hdl.handle.net/10778/859>
- Jaramillo Henao, D. & Mejía López, J. (1983). *Cebolla ocañera*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/31944>
- Jaramillo Vásquez, J., Conde Villamizar, P. J., Rengifo Estrada, G. A., & Vergel Manzano, L. (2003). *Producción de cebolla de bulbo ocañera* [Manual técnico]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13428>

- Kabat, P., & Beekma, J. (1994). Water in the unsaturated zone. En H. Ritzema (Ed.), *Drainage Principles and Applications* (pp. 383-434). ILRI Publication 16.
- Karaburun, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion Modeling using NDVI In Buyukcekmece watershed. *Journal of Apply Sciences*, 3(1), 77-85.
- Kuhwald, M., Busche, F., Saggau, P., & Duttman, R. (2022). Is soil loss due to crop harvesting the most disregarded soil erosion process? A review of harvest erosion. *Soil and Tillage Research*, 215, 105213. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105213>
- Lobo, J. (2022, 21 de junio). La cebolla ocañera, una tradición agrícola que está de regreso. *Radio Nacional de Colombia*. <https://www.radionacional.co/actualidad/campo-colombiano/campesinos-colombianos-la-cebolla-ocanera-esta-de-regreso#:~:text=La%20cebolla%20oca%C3%B1era%2C%20un%20producto,la%20econom%C3%ADa%20de%20la%20regi%C3%B3n>
- López-Vicente, M., & Navas, A. (2009). Predicting soil erosion with *RUSLE* in Mediterranean agricultural systems at catchment scale. *Soil Science*, 174(5), 272-282. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181a4bf50>
- Mejía López, J. & Jaramillo Henao, D. (1996). Cebolla ocañera. En A. López-Ávila (Ed.), *El cultivo del ajo y las cebollas en Colombia* (pp. 43-60). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13057>
- McBratney, A. B., Mendonça, M. L. & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291-300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2005). *Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia*. <https://www.unccd.int/sites/default/files/naps/colombia-spa2004.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [Midagri]. (2010). *Resumen ejecutivo "CEBOLLA" – Perú – Un campo fértil para sus inversiones y el desarrollo de sus exportaciones*. <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/377>
- Mitasova, H., Barton, M., Ullah, I., Hofierka, J., & Harmon, R. (2013). GIS-Based Soil Erosion Modeling. En J. F. Shroder, & M. Bishop (Eds.), *Treatise on Geomorphology: Vol. 3. Remote Sensing and GI Science in Geomorphology* (pp. 228-258). Academic Press.
- Mwango, S. B., Msanya, B. M., Mtakwa, P. W., Kimaro, D. N., Deckers, J., Poesen, J., Lilanga, S., & Sanga, R. (2014). Soil Loss due to Crop Harvesting in Usambara Mountains, Tanzania: The Case of Carrot, Onion, and Potato. *International Journal of Plant & Soil Science*, 4(1), 18-28. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/12479>

- Morgan, R. P. C., & Nearing, M. A. (Eds.). (2011). *Handbook of erosion modelling*. Blackwell Publishing.
- Nearing, M. A. (2013). Soil Erosion and Conservation. En J. Wainwright, & M. Mulligan (Eds.), *Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity* (2.ª ed.) (pp. 365-378). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118351475.ch22>
- Obregón Botero, R., & Otoyá, F. J. (1941). Aspecto de la agricultura intensiva en la provincia de Ocaña, departamento Norte de Santander. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 4(14-15), 1645-1729. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/34249>
- Olorunfemi, I. E., Komolafeb, A. A., Fasinmirina, J. T., Olufayoa, A. A., & Akandec, S. O. (2020). A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models. *Catena*, 194, 104725. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2000). *New dimensions in water security. Water, society and ecosystem service^s in the 21st century*. <https://www.fao.org/3/x4687e/x4687e.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], e Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS]. (2018). *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap). Versión 1.5*. [Reporte Técnico]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://doi.org/10.4060/ca7597en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [Unesco]. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Ozer, N., & Arin, L. (2014). Evaluation of fungal antagonists to control black mold disease under field conditions and to induce the accumulation of antifungal compounds in onion following seed and set treatment. *Crop Protection*, 65(1), 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.06.027>
- Pacheco Carrascal, E., Bohórquez, J., & Vergel, M. (2009). Caracterización del cultivo de cebolla en la provincia de Ocaña. En D. Miranda Lasprilla, C. Carranza, S. Magnitskiy, M. Rodríguez, & G. Fischer (Eds.). *Tercer Congreso Colombiano de Horticultura y Simposio Internacional de Cebolla y Ajo en el Trópico. Libro de resúmenes* (p. 172). Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34347>

- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburgerb, K., van der Zanden, E., Poesen, J., Alewell, C. (2015). Modeling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>
- Panagos, P., Borrelli, P., & Mausburgerb, K. (2015). A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2), 117-126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., & Montanarella, L. (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29(2), 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
- Pérez Gallardo, S. J. (2001). *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
- Pham, T. G., Degener, J., & Kappas, M. (2018). *Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam*. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). *SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty*. *soil*, 7(1), 217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Quintero, F. L. (2004, 13 de junio). La resurrección de la cebolla ocañera. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1526296>
- Quintero Durán, R. (1983). *Cebolla ocañera*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13370>
- Ramírez Ortiz, F. A. (2006). *Evaluación del riesgo por erosión potencial en la zona cafetera central del departamento de Caldas* [Tesis de pregrado, Universidad del Tolima].
- Ramírez Ortiz, F. A., e Hincapié Gómez, E. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60(2), 173-189. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060%2802%29173-189.pdf>
- Ramírez-Ortiz, O. F., Hincapié-Gómez, G.E., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60(1), 58-71. [https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060\(01\)58-71.pdf](https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060(01)58-71.pdf)

- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Coords.), (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agricultural Handbook. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf
- Rengifo-Rengifo, I., Muñoz-Gómez, F. A., & Toro-Trochez, O. A. (2022). Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 29-44. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738>
- Rivera-Posada, H., & Gómez-Aristizábal, A. (1991). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37-52. <https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/cenicafe/issue/view/185/111>
- Riquetti, N. B., Mello, C. R., Beskow, S., & Viola, M. R. (2020). Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 724, 138315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138315>
- Römkens, M. J. M., Young, R. A., Poesen, J. W. A., McCool, D. K., El-Swaify, S. A., & Bradford, J. M. (1997). Soil erodibility factor (K), En K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, & D. C. Yoder (Coords.), *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (pp. 65-99). USDA Agricultural Handbook. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf
- Roose, E. J. (1976). Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. Soil Erosion: Prediction and Control. *Soil Conservation Society of America*, 21, 60-74. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/09135.pdf
- Sahu, K. K., Kar, S., & Rout, S. (2021). Satellite-Based Soil Erosion Mapping. En S. A. Bandh (Ed.), *Sustainable Agriculture. Technical Progressions and Transitions* (pp. 225-252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83066-3_13
- Santacoloma-Varón, L. E. (2015). Importancia de la economía campesina en los contextos contemporáneos: una mirada al caso colombiano. *Entramado*, 11(2), 38-50. <https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22210>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Norte de Santander. (2022, marzo). *Anuario estadístico 2013 -2021*. Gobernación de Norte de Santander. <https://t.ly/7uaNI>
- Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1990). *EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. U. S. Department of Agriculture Technical.
- Simons, G., Koster, R., & Droogers, P. (2020). *HiHydroSoil v2.0 - A high resolution soil map of global hydraulic properties*. FutureWater. https://www.futurewater.nl/wp-content/uploads/2020/10/HiHydroSoil-v2.0-High-Resolution-Soil-Maps-of-Global-Hydraulic-Properties_v2.pdf
- Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC]. (2022). *Suelo y tierra*. http://www.siac.gov.co/suelosytierras#p_p_id_56_INSTANCE_TDFMWIVsLclh_
- Sistema Nacional de Áreas Protegidas [Sinap]. (2023). *Registro Único Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP*. <https://www.parquesnacionales.gov.co/porta/es/sistema-nacional-de-areas-protegidas-sinap/registro-unico-nacional-de-areas-protegidas/>
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L. (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodability factor using a global dataset. *Catena*, 31(1-2), 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00036-2)
- Turek, M. E., De Jong van Lier, Q., & Armindo, R. A. (2020). Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. *Geoderma*, 376, 114557. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114557>
- Turek, M. E., Poggio, L., Batjes, N. H., Armindo, R. A., De Jong van Lier, Q., De Sousa, L., & Heuvelink, G. B. M. (2023). Global mapping of volumetric water retention at 100, 330 and 15 000 cm suction using the WoSIS database. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(2), 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.08.001>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2020). *Reporte: área, producción y rendimiento cebolla*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], & Bancóldex. (2018). *Cultivo comercial de cebolla de bulbo: identificación de zonas aptas en Colombia, a escala 1:100.000*. <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Zonificaci-n-de-aptitud-para-el-cultivo-comercial-nxvg-ufyf/data>
- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau; Joint Research Center; Space Applications Institute.

- Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., & Guevara Santamaría, M. A. (2022). Colombian soil texture: Building a spatial ensemble model. *Earth System Science Data*, 14(10), 4719-4741. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4719-2022>
- Vélez Vargas, L. D., Clavijo Porras, J., & Ligarreto Moreno, G. A. (2007). Análisis ecofisiológico del cultivo asociado maíz (*Zea mays* L.) - frijol voluble (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 60(2), 3965-3984. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179914078008>
- Vergel Ortega, M., Martínez Lozano, J. J., & Zafra Tristanchó, S. L. (2016). Cultivo de cebolla y su comportamiento en la Provincia de Ocaña. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 333–344. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5070>
- Verjel Manzano, L., Terán Chaves, C. A., Gómez de Enciso, C., Valenzuela Mahecha, M. A., Rengifo Estrada, G. A., & Conde Villamizar, P. J. (2003). *Manejo de riego en cebolla ocañera*. [Manual técnico]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13431>
- Verjel Sánchez, S. (2016). La cebolla ocañera, un producto ligado a la historia, tradición y cultura de un pueblo. *Revista Mundo Fesc*, 6(12), 74-85. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5856132.pdf>
- Verjel Sánchez, S. (2019). El comercio internacional en Ocaña desde el apogeo al abandono. *Mundo Fesc*, 9(17), 69-77. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7452563.pdf>
- Wang, B., Zheng, F., & Römkens, M. J. M. (2013). Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 63(1), 69-79. <https://doi.org/10.1080/09064710.2012.718358>
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning*. U. S. Department of Agriculture Handbook.
- Yohannes, H. (2016). A review on relationship between climate change and agriculture. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 7(2). <https://www.doi.org/10.4172/2157-7617.1000335>
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water. Concepts and methods*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203784112>
- Zárate Torres, É., Fernández Poulussen, A., & Kuiper, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <http://repositorio.iica.int/handle/11324/2996>







Terminó de diseñarse
en julio de 2024, Bogotá, D.C., Colombia

Indicadores de calidad de suelo, agua y oferta ambiental para el cultivo de cebolla ocañera

La cebolla de bulbo ocañera es un producto de alta tradición, identidad y arraigo, presente en la memoria histórica de la provincia de Ocaña (Norte de Santander). Sin embargo, las dificultades asociadas a malas prácticas culturales gestaron de forma progresiva el incremento de problemas fitosanitarios y de degradación de suelos ocasionados por la erosión. Sin embargo, la producción se mantuvo constante hasta inicios del siglo **XXI** cuando la variedad denominada “común”, redujo notablemente el rendimiento, lo que dio paso al uso de semilla originaria del Perú y se produjo la desaparición de la cebolla ocañera tradicional. Esta situación, aunado al indudable impacto del cambio climático que ha ejercido una fuerte presión sobre las áreas cultivables, siendo evidente el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, deforestación, erosión, entre otros, ha puesto en evidencia la baja sostenibilidad a mediano y largo plazo de la actividad agrícola en la provincia de Ocaña. Conscientes de estos retos, se presenta este libro con el objetivo de dar a conocer los resultados de un análisis territorial realizado como información contextual para dar soluciones a una mayor escala. Los indicadores (tiempo térmico, huella hídrica y degradación de suelos) pueden ser consultados con mayor detalle en el Módulo E - Cebolla Ocañera, del Sistema Experto **MAPA** (véase: <https://semapa.agrosavia.co/Cebolla>).



BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

CORREO: **bac@agrosavia.co**

TELÉFONO: **(57 1) 422 73 00 EXT. 1257 o 1274**

AGROSAVIA
EDITORIAL

www.agrosavia.co

Distribución gratuita
Prohibida su venta