

4. Variabilidad climática en la fruticultura tropical: consideraciones para Colombia

LAURA ALEJANDRA VALBUENA GAONA*

MARÍA ISABEL MUNERA LÓPEZ**

GERHARD FISCHER***

STANISLAV MAGNITSKIY****

HELBER ENRIQUE BALAGUERA LÓPEZ*****

JOAQUIN GUILLERMO RAMÍREZ GIL*****



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.296.04>

Resumen

Colombia pertenece a la zona tropical con alta vocación agrícola y es una de las principales y potenciales despensas agrícolas del mundo, lo que la hace clave para garantizar la seguridad alimentaria a nivel mundial. La producción frutícola en Colombia participa con 17% del total de la producción agrícola nacional. Las líneas de producción frutícola que han presentado la mayor participación en los últimos años son: banano y plátano (44%), cítricos (10%), aguacate (8%), piña (4%), mango (3%) y pasifloras. Este país cuenta con ventajas competitivas, como (a) diversidad de climas y suelos, (b) capacidad productiva del sector agropecuario por presentar áreas con potencial de siembra, y (c) cumplimiento de exigencias en la calidad del producto. Sin embargo, su variabilidad climática, por ejemplo, la presencia de sequías periódicas, es una constante por efectos del fenómeno meteorológico.

* Ingeniera Agrónoma. Profesora, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5323-8760>

** MBA. Consultora independiente, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5440-3242>

*** Doctor en Ciencias Agrarias. Profesor jubilado, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-0507>

**** PhD en Horticultura. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3715-1932>

**** Doctor en Fisiología Vegetal. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3133-0355>

**** Doctor en Ciencias Agrarias. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0162-3598>

lógico El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que afectan el rendimiento y la calidad de los frutos tropicales e incrementa la incidencia de plagas y enfermedades, generando aumentos en los costos de insumos y precios del producto final, y afectando la infraestructura. Para mitigar o adaptar frutales a la condición de estrés por sequía se recomienda la selección de genotipos tolerantes, de épocas de siembra, de sistemas de riego, el manejo eficiente del agua, y la aplicación de bioestimulantes.

Palabras clave: *cambios en clima, producción frutícola, Colombia.*

Introducción

El sector de las frutas frescas y procesadas a nivel mundial es uno de los más dinámicos y de mayor crecimiento dentro del mercado de los alimentos (Zanetti et al., 2020). Este avance en importancia ha dado lugar a un aumento continuo en áreas sembradas y producción de frutas en múltiples regiones y zonas del planeta con vocación agrícola (Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas [FAO, por sus siglas en inglés], 2023). Tal situación es consecuencia directa de las nuevas tendencias por la alimentación saludable en las cuales las frutas son percibidas en el mercado como grandes aportadoras de compuestos nutricionales de alto valor, con múltiples beneficios sobre la salud humana, y competidores directos de productos comestibles tradicionales (Nguyen et al., 2021).

A nivel mundial, se destacan las zonas tropicales y subtropicales como las áreas de mayor importancia para la producción frutícola (FAO, 2023). La producción mundial de frutas se considera de alta importancia económica, superando a otros sistemas agrícolas, dado que es una industria de alto valor y generación de empleo (Nguyen et al., 2021). Igualmente, como gran parte de la agricultura mundial, presenta múltiples retos a nivel tecnológico, productivo y comercial. Dentro de estos desafíos se destacan aquellos que suscitan incertidumbre, tales como el efecto que producen el cambio y variabilidad climática sobre las zonas productivas y especies cultivadas, la escasez de agua, la disminución de área para siembra, las preferencias del consumidor, la variabilidad de precios, la disminución de

mano de obra rural, los bajos niveles de adopción tecnológica, entre otros (Cáceres-Zambrano et al., 2022).

Colombia es un país que pertenece a la zona tropical con alta vocación agrícola y posee extensas áreas con potencial productivo gracias a la congruencia de condiciones edáficas, climáticas y topográficas que la hacen apta para el desarrollo de múltiples cultivos en diferentes zonas agroecológicas (Universidad Politécnica de Ramos Arizpe [UPRA], 2023). La FAO ha señalado a Colombia como una de las principales y potenciales despensas agrícolas del mundo y un país clave para garantizar la seguridad alimentaria a nivel global (Procolombia, 2022). Durante los últimos años, el área sembrada con sistemas de producción hortofrutícola del país ha tenido un crecimiento sostenido, pasando de 862 000 hectáreas en el 2015 a 1 000 10 000 hectáreas en el 2021; en buena medida gracias a las políticas nacionales agropecuarias que han propuesto aumentar la oferta de productos agrícolas, promover el incremento de áreas sembradas y mejorar la productividad (Evaluaciones Agropecuarias Municipales [EVA], 2023).

A nivel nacional, se tiene una macro división de regiones en función de múltiples parámetros tanto ambientales como geopolíticos (figura 4.1).

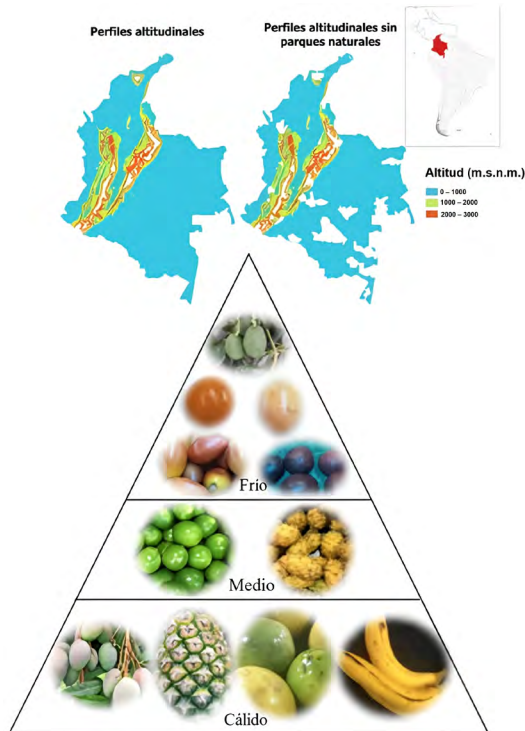
Figura 4.1. Participación y principales frutas tropicales producidas en las eco-regiones de Colombia



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural/Evaluaciones Agropecuarias Municipales (2021), para las líneas productivas sujetas de recaudo 2020. Proyecciones Unidad Técnica para 2021.

En este sentido, y con base en la vocación productiva a nivel agrícola, la región Andina se destaca como la de mayor producción frutícola del país, alcanzando las 5 900 000 toneladas con una amplia variedad de oferta de frutas; seguido de las regiones Caribe, Pacífica, Orinoquia y Amazónica, respectivamente (EVA, 2023) (figura 4.1). A partir de la información recopilada por las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en la figura 4.1 se reporta el comportamiento del área sembrada de las principales frutas que se producen en el país, según las regiones eco-geográficas, para consumo interno y como un renglón de importancia en la generación de divisas.

Figura 4.2. Perfil altitudinal de macrorregiones con potencial de producción agrícola en Colombia. (a) zona cálida: 0-1000 m; (b) zona media: 1001-2000 m, y (c) zona fría: 2001-3000 m



Fuente: Elaboración a partir de un mapa de elevación digital con una resolución de 30 m descargado de EARTHDATA-Open Access For Open Science (<https://www.earthdata.nasa.gov/>) y para determinar áreas con potencial agrícola se eliminaron las zonas de parques y zonas de reserva natural, centros poblados, área hidrográfica, e infraestructura vial obtenidas de la información geográfica de datos abiertos del mismo (<http://www.ideam.gov.co/capas-geo>).

En términos generales, y con algunas restricciones asociadas a zonas de reserva natural, centros poblados, área hidrográfica e infraestructura vial, entre otras, la frontera agrícola de Colombia se ubica entre los 0 y los 3 000 msnm, con algunas excepciones en distintos departamentos (Nariño, Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, entre otros), donde se puede realizar agricultura de forma sostenible por encima de los 3 000 msnm sin afectar las zonas de páramos y reservas naturales. Así, una agrupación macro en este perfil geográfico da lugar a tres zonas altitudinales con una amplia diferenciación climática: (a) zona cálida, de 0 a 1 000 m; (b) zona media, de 1 001 a 2 000 m; y (c) zona fría, de 2 001 a 3 000 (figura 4.2). En estas macrorregiones se puede encontrar una amplia diversidad de especies frutícolas con un alto potencial en su producción para consumo local y para exportación. En la figura 4.1 se reportan las frutas de mayor relevancia por área sembrada, producción e importancia económica.

La producción frutícola en Colombia participa con 17 % del total de la producción agrícola nacional, ubicando al subsector como uno de los más relevantes y de mayor crecimiento en el agro colombiano (Procolombia, 2022). Las líneas de producción frutícola que han presentado la mayor participación en los últimos años son: banano y plátano (44 %), cítricos (10 %), aguacate (8 %), piña (4 %), mango (3 %), pasifloras (2 %), entre otros (Sociedad de Agricultores de Colombia [SAC], 2021). Estos productos concentran 71 % del total de la cosecha del subsector (figura 4.2).

En las zonas agrícolas de los trópicos se observa una gran amenaza para los sistemas frutícolas que se asocia a la variabilidad climática, relacionada especialmente a los fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur-ENSO (La Niña y El Niño) (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2022). Adicionalmente, se encuentra el potencial efecto del cambio climático (CC), donde se espera un mayor impacto negativo por incrementos en la temperatura y variaciones en la precipitación, que en muchos casos es más reducida y con proyecciones más devastadoras a nivel tropical (Yohannes, 2015).

Los cambios en la precipitación y temperatura asociados a los fenómenos de variabilidad y cambio climático pueden presentar una alta influencia en la agricultura, alterando múltiples procesos con implicaciones en toda la cadena de valor de la producción de alimentos (Kurukulasuriya y Rosenthal,

2013). Con base en lo anterior, y dado el alto potencial en área, crecimiento, producción e importancia de los frutales en Colombia, en el presente capítulo se exporá en cuatro apartados lo siguiente: (a) área sembrada, producción y rendimiento de las principales frutas producidas en Colombia cuya finalidad es la exportación; (b) dinámica temporal de los fenómenos ENSO (La Niña y El Niño) en Colombia; (c) potencial efecto de los fenómenos ENSO sobre la fruticultura en Colombia; y (d) herramientas de mitigación y adaptación a los ENSO en la fruticultura.

El objetivo principal del presente trabajo es mostrar una aproximación macro de los fenómenos ENSO bajo condiciones tropicales y cómo afectan a los sistemas de producción frutícola con mayor dinamismo en Colombia por su potencial comercial, como en el caso de los frutales de exportación, y presentar elementos básicos asociados a estrategias de adaptación y mitigación de los efectos adversos promovidos por el fenómeno ENSO. Dentro de estos sistemas se seleccionaron aquellos relacionados con la producción de aguacate (*Persea americana* Mill, cultivar Hass), banano (*Musa acuminata* Colla × *Musa balbisiana* Colla cultivar Cavendish, clones Valery, Gran Enano y Williams), mango (*Mangifera Indica* L. cultivar Kent, Keitt, Tommy Atkins, y criollo: azúcar), cítricos lima Tahití (*Citrus* × *latifolia*), piñas (*Ananas comosus* L. cultivar Cayena Lisa, Perolera, Manzana, y Gold MD2.), uchuva (*Physalis peruviana* L.), tomate de árbol (*Solanum betaceum* L.), granadilla (*Passiflora ligularis* f. *lobata* [Mast.] Killip), gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims), maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* O. Deg.), y pitahaya (Haw. Britton & Ros) (figura 4.2).

Área sembrada, producción y rendimiento de las principales frutas con potencial de exportación en Colombia

Una de las múltiples causas asociadas a la gran variedad de condiciones edafoclimáticas en las condiciones tropicales, y específicamente en Colombia, es la presencia de un perfil altitudinal que cubre desde los 0 hasta los 5 776 m de elevación. Tal característica hace que en este rango de alturas se presente la congruencia de factores locales, regionales y continentales que alteran y condicionan las variables de clima como lo son la temperatura, la

precipitación, la radiación, la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad del viento, entre otras. Igualmente, a nivel edáfico, las variaciones se dan como una congruencia entre el clima y los factores formadores de suelo, esto es, material parental, relieve y biota existente. Esta multiplicidad de factores y condiciones hacen de Colombia un país megadiverso, lo que incluye una extensa variedad de especies de frutas silvestres y domesticadas con alto potencial para la alimentación humana y potencial comercial (Gori et al., 2022).

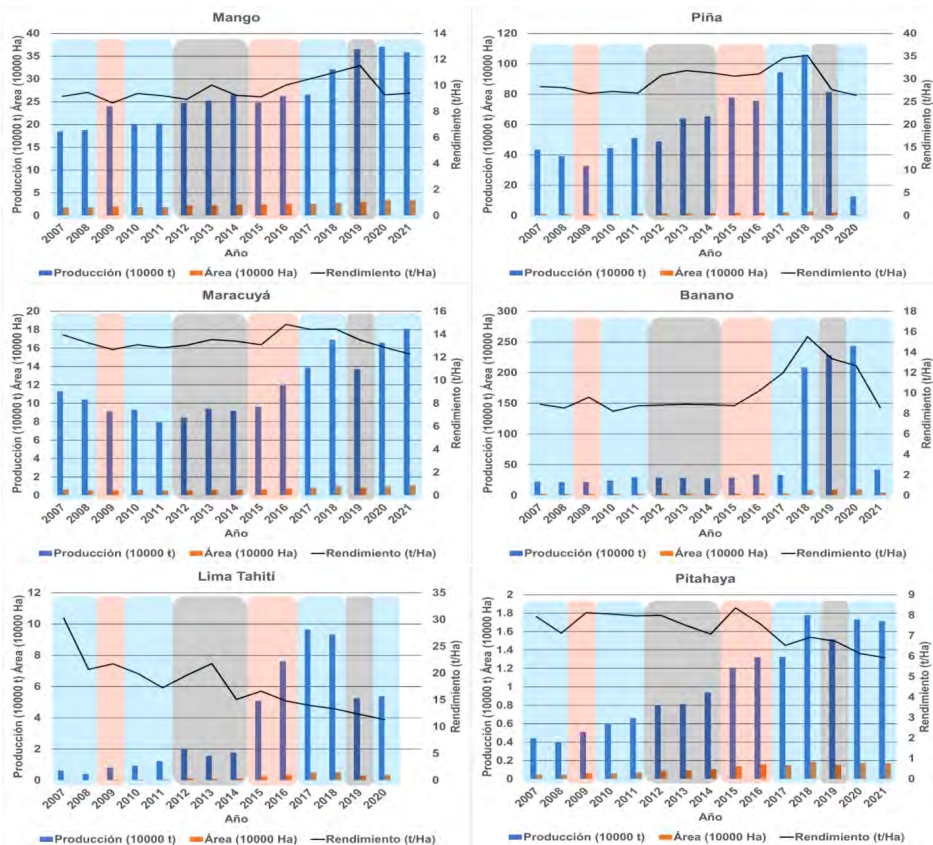
Debido a estas características, Colombia se ha convertido en uno de los países más dinámicos a nivel mundial en cuanto a su perfil y diversidad exportadora de frutas tropicales como el banano, el aguacate, el limón, la piña, el mango, entre otras; además se producen frutas exóticas, dentro de las cuales se destacan la uchuva, la gulupa, la pitahaya, la granadilla, el feijoa y el tomate de árbol; estas frutas presentan gran aceptación en el mercado internacional. Actualmente, Colombia es el principal exportador de frutas exóticas en América, el segundo exportador de banano, el cuarto de aguacate y el sexto de limón en el continente (Procolombia, 2022). Es también el segundo mayor exportador de frutas a la Unión Europea. Los productos más relevantes a nivel de exportación en volumen son los bananos-plátanos (38 %, con 147 500 t), aguacate (21 %, con 83 500 t), lima Tahití (8 %, con 32 500 t), naranjas frescas o secas (7 %, 25 200 t), y otras frutas tropicales y exóticas como la pasifloras, la uchuva, la pitahaya, los berries, entre otras (6 %, con 22 400 t) (SAC, 2021).

El país cuenta con una serie de ventajas competitivas que respaldan la expansión y el crecimiento de sus exportaciones (Procolombia, 2022); dentro de ellas se pueden enunciar como las de mayor relevancia las siguientes: (a) la diversidad de climas y suelos; (b) la capacidad productiva del sector agropecuario por presentar áreas con potencial de siembra; y (c) el cumplimiento de exigencias en la calidad del producto. En los últimos 5 años, el sector hortofrutícola ha registrado un crecimiento anual continuo de 19 % (Procolombia, 2022) (gráficas 4.1 y 4.2).

En términos generales, los volúmenes exportados de frutas que se enuncian en la gráfica 4.1 han presentado dos tendencias del 2007 al 2021 (último año con datos disponibles; véanse las gráficas 4.1 y 4.2). Por un lado, están aquellos de comportamiento estable, como el tomate de árbol, la gra-

nadilla, la uchuva, el mango y la piña, los cuales han presentado valores medios similares de área sembrada y toneladas producidas durante el tiempo evaluado. En estos periodos se destacan leves incrementos en volúmenes totales, posiblemente asociado a mejores prácticas agronómicas, la selección de nichos edafoclimáticos específicos donde se maximiza la cantidad de producción, y, por supuesto, como una consecuencia directa del aumento del área plantada (gráficas 4.1 y 4.2).

Gráfica 4.1. Dinámica de área sembrada, producción, rendimiento y efecto macro del ENSO en frutales de importancia para la exportación en Colombia plantados bajo clima cálido

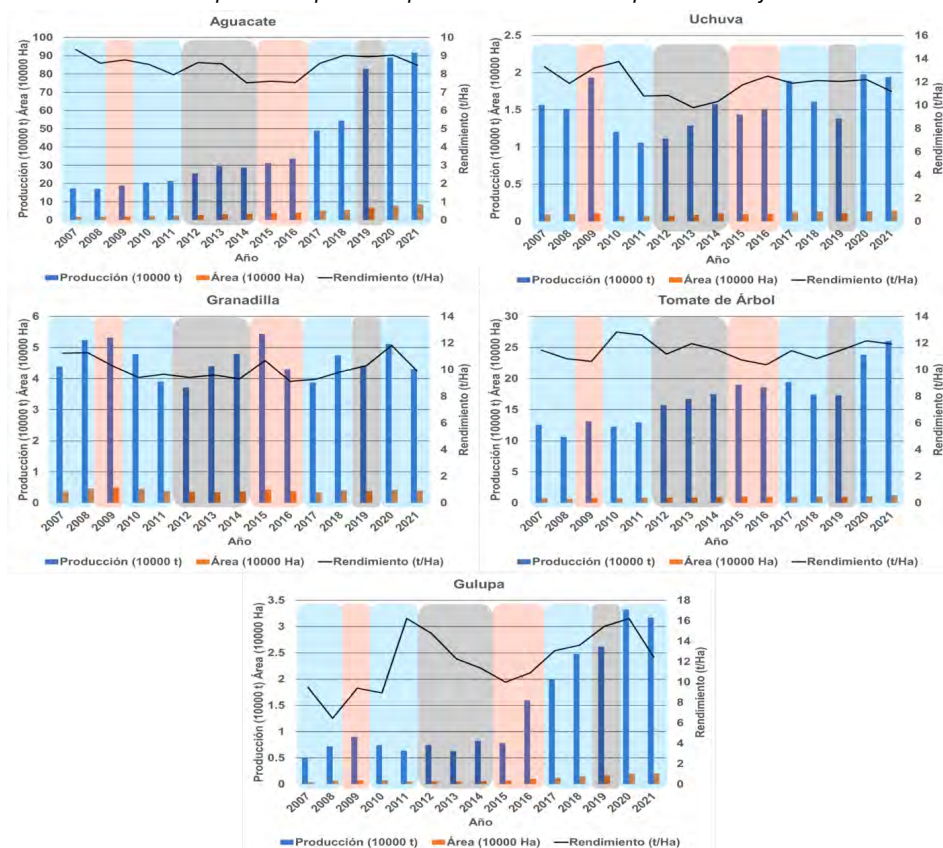


Nota: El área negra representa la variación natural del clima asociado a condiciones intra-anales y fenómenos micro-climáticos de Colombia. Áreas rojas: Fenómeno ENSO-El Niño. Áreas azules: Fenómeno ENSO-La Niña.

Fuente: Elaboración propia.

En el segundo grupo se encuentran las frutas cuya importancia en área sembrada y volúmenes de producción han presentado un fuerte crecimiento en los últimos 5 años; dentro de estas se destacan el maracuyá, los bananos, la lima Tahití, la pitahaya, el aguacate, y la gulupa (gráficas 4.1 y 4.2). Un caso particular que demuestra la importancia del crecimiento del sector frutícola es el del aguacate cultivar Hass de origen colombiano, que en un periodo de 10 años (2010-2020) se posicionó a nivel mundial y continúa ocupando los primeros lugares en las exportaciones del país.

Gráfica 4.2. Dinámica de área sembrada, producción, rendimiento y efecto macro del ENSO en frutales de importancia para la exportación en Colombia plantados bajo clima frío



Nota: El área negra representa la variación natural del clima asociado a condiciones intra-anales, y fenómenos micro-climáticos de Colombia. Áreas rojas: Fenómeno ENSO-EI Niño. Áreas azules: Fenómeno ENSO-La Niña.

Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2021, el aguacate tuvo un crecimiento de 41 % en términos de valor, y de 27 % en términos de volumen (Procolombia, 2022). Los productores de aguacate han entendido las necesidades de trazabilidad e inocuidad que exigen las ventanas comerciales con el fin de cumplir protocolos de admisibilidad de los diferentes destinos. Así mismo, el país ha apostado por posicionarse cada vez con más fuerza en diferentes mercados, no sólo ocupando nichos de mercado altamente competitivo como el europeo, sino que ha visto como potenciales los mercados asiáticos, el norteamericano, el sur del continente americano y el medio oriente (Procolombia, 2022) (véase gráfica 4.2).

Para todos los sistemas de producción frutícola analizados (gráficas 4.1 y 4.2) se encontró a nivel macro poco o nulo aumento en los rendimientos a través del tiempo. Por el contrario, esta variante ha presentado una gran variabilidad altamente influenciada por los años en los cuales se ha producido algún fenómeno de fluctuación climática interanual asociado al ENSO (La Niña y El Niño). En apartados posteriores se realizará una descripción general del comportamiento específico de este fenómeno y su impacto en la fruticultura tropical, caso Colombia.

Dinámica temporal de los fenómenos ENSO (La Niña y El Niño) en Colombia

Los eventos climáticos denominados El Niño y La Niña se asocian a los niveles de temperatura de la superficie del mar (TSM, por sus siglas en inglés) en el Pacífico tropical, que suelen ser más cálidas y frías que las medias históricas respectivamente (McPhaden et al., 2006). Estos dos eventos climáticos se conocen como El Niño-Oscilación del Sur-ENSO asociados a las interacciones acopladas atmósfera-océano que en casi su totalidad se vincula a la base del Pacífico (NOAA, 2022). Bajo las condiciones climáticas de ENSO, la precipitación y la temperatura presentan una relación inversa; puesto que, mientras que El Niño se asocia, por un lado, a la sequía en la Amazonía y el noreste sudamericano, y las inundaciones en la costa occidental tropical y el sureste de Sudamérica; por su parte, La Niña actúa en un sentido inverso (Cai et al., 2020).

Para este caso particular, y con las series de tiempo de datos existentes de producción, área sembrada y rendimiento de los principales frutales tropicales con potenciales de exportación (figura 4.2) y anomalías reportadas durante ENSO (La Niña y El Niño) (NOAA, 2022), analizamos la dinámica de este fenómeno en la serie de tiempo entre el 2007 y el 2021 (gráfica 4.3). A partir de la información que se observa en la gráfica 4.3 se puede observar que la condición de variabilidad climática en Colombia es una constante, lo que indica la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación para la búsqueda de sistemas agrícolas sostenibles y resilientes a este tipo de fenómenos, en especial el subsector frutícola.

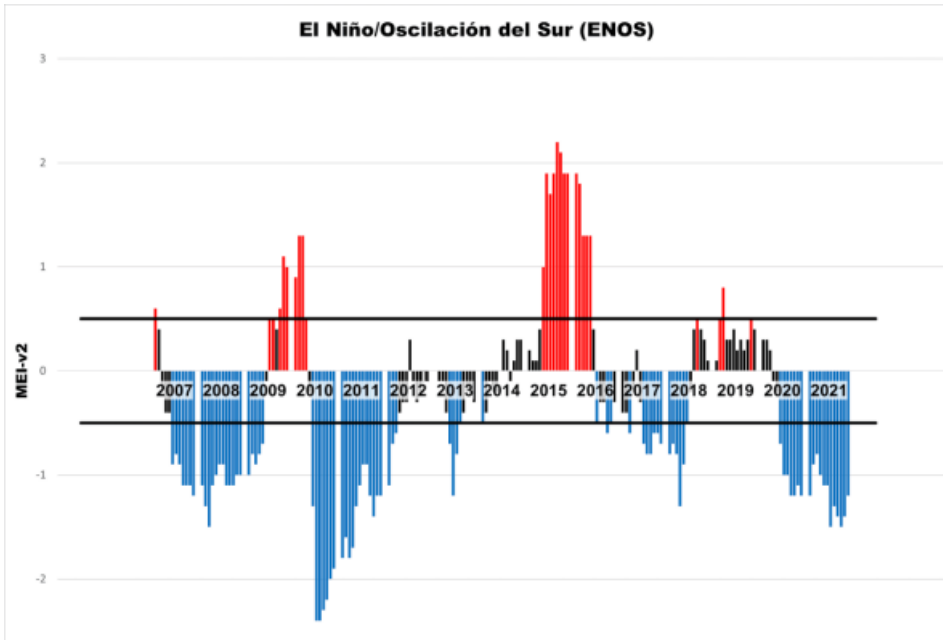
En Colombia, entre el 2007 y el 2021 se reportaron anomalías climáticas asociadas a ENOS, las cuales presentaron cinco periodos marcados del fenómeno de La Niña, alternados con tres del fenómeno de El Niño, y varios ciclos de variabilidad climática interanual con algunos meses atípicos con temporadas húmedas o secas en comparación con los promedios multianuales (gráfica 4.3).

Durante junio del 2007 y marzo del 2012 se presentaron dos temporadas marcadas por La Niña, separadas por un evento de El Niño entre julio del 2009 y abril del 2010. En este periodo se presentó un Niño débil. Por su parte, los eventos de La Niña durante este periodo (del 2007 al 2009) se catalogaron como fuertes; no obstante, los presentados entre mayo del 2010 y marzo del 2012 fueron fuertes y de mayor intensidad (Cai et al., 2020). Bajo estos escenarios, se incrementaron las precipitaciones en las regiones de Sudamérica (Cai et al., 2020), con grandes implicaciones en los sectores productivos, incluyendo la agricultura y el subsector frutícola, como se observan en las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3.

Posterior al año 2012, y hasta el primer trimestre del 2015, se presentaron variaciones climáticas dentro de los límites esperados, con algunas excepciones entre los meses de mayo y agosto del 2013 y enero del 2014, donde el clima mostró una tendencia mayor al fenómeno de La Niña (gráfica 4.3). Posteriormente, y a partir de la primera parte del 2015 volvieron a aparecer condiciones del fenómeno de El Niño, hasta la primera mitad del 2016, siendo este El Niño de mayor magnitud en el periodo de tiempo analizado, llegando incluso a considerarse el tercer fenómeno de El Niño más fuerte del que se tienen registro a nivel mundial (NOAA, 2022).

Por último, desde la segunda mitad del 2016 y hasta el 2021 se presentaron condiciones de La Niña en el país separadas por un periodo comprendido entre el segundo semestre del año 2017 y hasta finales del 2018. Posteriormente, entre el segundo semestre del 2018 y comienzos del 2020, las condiciones del clima fueron caracterizadas como “dentro de las normales climatológicas”, con meses atípicos asociados a fenómenos de El Niño en septiembre del 2018, febrero, marzo y noviembre del 2019; mientras que los años 2020 y 2021 se asociaron a La Niña (gráfica 4.3).

Gráfica 4.3. Dinámica e intensidad de fenómenos de variabilidad climática asociadas a ENSO (La Niña y El Niño) en Colombia



Nota: Las líneas negras horizontales representan la variación natural del clima asociado a condiciones intra-anales y fenómenos micro-climáticos de Colombia. Barras negras: condición de clima natural. Barras rojas: Fenómenos ENSO-El Niño. Barras azules: fenómenos ENSO-La Niña.

MEIv2: índice Multivariado del Ciclo El Niño-Oscilación del Sur, basado en: (a) presión del nivel del mar, (b) temperatura superficial del mar, (c) componente zonal de viento (este-oeste), (d) componente meridional del viento (norte-sur), y (v) radiación de onda larga (Zhang et al., 2019). Los datos del MEIv2 fueron obtenidos de la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés). Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

Fuente: Elaboración propia.

Potencial efecto de los fenómenos ENSO (La Niña y El Niño) sobre la fruticultura en Colombia

Para las regiones agrícolas, una de las anomalías climáticas de mayor impacto económico está relacionada con el ENSO (La Niña y El Niño) (Botero y Barnes, 2022). EL ENSO, en cualquiera de sus fases, ya sea La Niña o El Niño, afecta de forma directa los sistemas agrícolas en parámetros de productividad como lo es el de rendimiento (Botero y Barnes, 2022; Wang et al., 2020); variable ésta que se puede observar claramente de forma macro en las gráficas 4.1 y 4.2 para los frutales de mayor potencial de exportación en Colombia, donde se observan las reducciones de producción especialmente bajo fenómenos ENSO-La Niña. También se sugiere un alto impacto en parámetros de calidad en diferentes frutas de origen tropical (Ramírez-Gil et al., 2020).

Por su parte, como consecuencias indirectas se considera que el ENSO (La Niña y El Niño) afecta múltiples partes dentro de la cadena de valor, como su relación con incrementos en la incidencia de plagas y enfermedades, reducción de la calidad en poscosecha, aumentos en los costos de insumos y precios del producto final, y afectación en infraestructura, entre otros (Botero y Barnes, 2022).

Las cifras a nivel mundial sugieren que el fenómeno ENSO puede provocar pérdidas en el rendimiento de los principales cultivos cercanos en 10 % (Lunt et al., 2016). Específicamente para el sector agro en Colombia, se reporta que los fenómenos ENOS han dejado cuantiosas pérdidas. En este sentido, la ola invernal del 2010 al 2012 generó inundaciones en aproximadamente 3 500 000 hectáreas, con daños cuantificados en más de \$11 100 millones de pesos colombianos (COP). Por su parte, el fenómeno de El Niño que se presentó durante los años 2014 al 2016, presentó afectaciones agrícolas por los déficits hídricos generados y tuvo un impacto potencial sobre la productividad, reportando un incrementos en costos por la necesidad de uso de riego, entre otros muchos efectos negativos (Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres [UNGRD], 2016).

Para el caso específico de nuestro enfoque, y en función de los sistemas agrícolas seleccionados (gráficas 4.1 y 4.2), desde una aproximación macro

se puede identificar de forma visual la relación directa entre las variaciones en el rendimiento y la ocurrencia de distintas fases del fenómeno ENSO durante la serie de tiempo 2007-2021. Las variaciones y el efecto diferencial específico sobre la variable rendimiento se podrían asociar a que se presenten características particulares dentro de cada sistema productivo; de este modo, las variaciones son producto del el impacto diferencial que estos fenómenos climáticos regionales tienen sobre zonas agroecológicas donde se siembran estos frutales, la respuesta que la especie tenga con respecto al evento climático y los mecanismos de adaptación y mitigación que sean implementados a nivel local por los productores.

Por otra parte, este análisis regional enmascara características específicas del sistema de producción y micro-climáticas de alta influencia en una variable como el rendimiento y su posible relación con fenómenos de variabilidad climática. En términos generales, las implicaciones específicas del fenómeno ENSO (El Niño y la Niña) se deben evaluar de forma detallada en cada agroecosistema, dado que los reportes existentes plantean que estos fenómenos pueden tener un efecto positivo o negativo en sistemas agrícolas (Ramírez-Gil et al., 2020).

En este sentido, y buscando una aproximación a las relaciones entre la productividad y el ENSO, se puede observar en las gráficas 4.1 y 4.2 que el resultado a nivel macro puede ser variable en función del cultivo, la intensidad y la duración del fenómeno, así como la relación con el evento climático anterior, entre otros. Específicamente, y para un potencial escenario, se podría tener una zona seca que, dada por sus normales climatológicas, presente un balance hídrico negativo (mayor evapotranspiración que precipitación), situación que implicaría la necesidad de aplicación de riego. Si en esta área se presenta un ENSO-La Niña moderado, posiblemente se obtenga un incremento en la productividad de una especie moderadamente tolerable a los excesos de humedad como el mango, lo cual podría explicar las variaciones en las gráficas 4.1 y 4.2, donde, por ejemplo, el mango baja los rendimientos dentro de una condición de ENSO e incrementa con ENSO-La Niña, especialmente después de un ENSO-El Niño.

Mitigación y adaptación hacia los efectos negativos de los fenómenos ENSO (La Niña y el Niño) en la fruticultura en Colombia

ENSO-El Niño (sequía)

El fenómeno ENSO-El Niño genera una disminución notable en las precipitaciones con períodos secos más prolongados, pero también con aumento de la temperatura, lo que conlleva a incrementar los requerimientos de riego u otras estrategias de mitigación o adaptación. Por esto es necesario planear con anterioridad las diferentes estrategias para mitigar los impactos sobre la producción de los frutales, lo que implica el uso de una estrategia o la combinación de varias de ellas, cuya ejecución debe hacerse de manera oportuna. A continuación, se plantean diferentes estrategias comunes a varios sistemas de producción frutícola que buscan mitigar o adaptar la especie vegetal a la condición de estrés por sequía.

1. Selección de genotipos tolerantes: en zonas con alto impacto de la sequía es muy importante seleccionar frutales con adaptaciones a nivel morfológico, bioquímico y fisiológico de esta fuente de estrés. En tal caso, la elección más apropiada según la zona es sembrar especies como piña en climas cálidos o pitaya en clima medio (figura 4.2). Estas especies, bajo déficit hídrico, disminuyen su productividad, pero tienen la posibilidad de tolerar condiciones más extremas que la mayoría de los frutales, principalmente por sus cambios anatómicos y la presencia del metabolismo fotosintético de tipo CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas) que les permite ser muy eficientes con el uso del agua (Taiz et al., 2018). La gran mayoría de los frutales se propagan mediante injertación, parte del éxito de esta técnica es la utilización de patrones o portainjertos con tolerancia o resistencia a condiciones difíciles de suelos, enfermedades, clima (incluida la condición de sequía), entre otros. Está demostrado que el portainjerto induce tolerancia al déficit hídrico en varias especies, incluso generando cambios a nivel postranscripcional en la copa, como ha sido reportado para el

manzano (He et al., 2022). La obtención de portainjertos con tolerancia a la sequía sigue siendo una prioridad en especies de gran interés económico en el mundo, como los cítricos, los frutales caducifolios, los mangos y el aguacate, entre otros; esto empieza a ser una prioridad en otros frutales, como aquellos de la familia de las pasifloras (maracuyá, gulupa, granadilla, entre otras) y solanáceas (uchuva, tomate de árbol, lulo y más), donde este tipo de estrés está generando graves pérdidas económicas. Cabe aclarar que la investigación y desarrollo en portainjertos resistentes o tolerantes es aún incipiente.

2. Selección de épocas de siembra: es una importante estrategia que mitiga el impacto del déficit hídrico y se basa en los pronósticos del clima y el conocimiento de la fenología de la especie, tiene la finalidad de que las etapas fenológicas más sensibles a la sequía coincidan con las épocas de lluvia. Por ejemplo, la siembra en el caso del banano debe realizarse en función de la disponibilidad de agua, las precipitaciones, el momento adecuado para la floración y el desarrollo del racimo (Ravi y Mustaffa, 2013). Estos mismos autores mencionan que cuando no hay presencia de lluvias pueden implementar riegos con frecuencia de 15 a 20 días. Lo anterior indica también la necesidad de contar con modelos de predicción del clima armonizados con el conocimiento de las fases fenológicas del cultivo, de tal forma que se pueden identificar las fases del desarrollo menos sensibles al déficit hídrico para que coincidan con los periodos en los que se cuenta con una menor disponibilidad hídrica, buscando el menor impacto sobre la productividad y la calidad de las cosechas.
3. Sistema de riego: cualquier sistema de riego se considera una alternativa favorable para suplir los requerimientos hídricos del frutal en las épocas de sequía. Sin embargo, la baja capacidad de almacenamiento de grandes volúmenes de agua y los pocos distritos de riego existentes en las regiones frutícolas obligan a que resulte necesario disponer de sistemas de riego localizados (riego por goteo), que son más eficientes (mayor a 80 %) y presentan bajo consumo de agua y de energía, entre otras ventajas; hay que señalar, no obstante, que los costos iniciales de inversión son altos (Vélez-Sánchez et al., 2021).

4. Manejo eficiente del agua: en las últimas décadas se han evaluado e implementado diferentes técnicas enfocadas a lograr un manejo eficiente del riego, dentro de los que se destacan el riego deficitario controlado (RDC) y el riego de secado parcial de la raíz, entre otros. En el RDC se disminuye el suministro hídrico en las etapas de desarrollo menos sensibles al estrés hídrico de la planta, esto lo convierte en una estrategia que induce regulaciones fisiológicas en las plantas y también mejora el rendimiento y la calidad de los frutos (Du et al., 2015). El riego de secado parcial sólo moja una parte de la zona de la raíz en cada evento de riego, mientras que el resto se deja secar de forma controlada. Regularmente, el riego se cambia entre las diferentes partes de la zona radicular, esto permite que las señales de secado del suelo, como la hormona ABA (ácido abscísico), se transmitan de raíz a brote para regular el crecimiento y el consumo de agua (Wang et al., 2012). Esta técnica tiene la ventaja de que puede ahorrar agua, aumentar la productividad, e incluso la calidad (Iqbal et al., 2020). Sin embargo, aún falta investigar estas técnicas en detalle en los frutales del trópico.
5. Aplicación de bioestimulantes: Los bioestimulantes se clasifican en las siguientes siete categorías: ácidos húmicos / fúlvicos, algas marinas / extractos botánicos, hidrolizados de proteínas, biopolímeros, minerales benéficos, bacterias y hongos benéficos (Jardin, 2015). Los bioestimulantes pueden ser aplicados para mitigar el efecto del estrés hídrico, principalmente porque inducen respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares en la planta que pueden generar tolerancia o evasión a este fenómeno. Se han aplicado bioestimulantes de diferentes fuentes a árboles frutales, vides y otros cultivos de bayas contra el estrés abiótico, incluida la sequía (Basile et al., 2020). Para Basile et al. (2020) los principales mecanismos que se mejoran son: aumento de la toma y asimilación de nutrientes por un sistema de raíces más vigoroso, aumento de la eficiencia fotosintética y las relaciones hídricas, incremento en la acumulación de osmolitos, un sistema antioxidante más eficaz, aumento en el uso eficiente del agua intrínseco, expresión diferencial de genes relacionados con detoxificación de especies reactivas de oxígeno y síntesis de osmolitos, y finalmente

poblaciones microbianas epífitas moduladas que mejoran el crecimiento de las plantas. Los bioestimulantes generan osmoprotección, y con esto disminuyen los daños que puede generar el déficit hídrico. En el mercado se pueden conseguir algunos bioestimulantes de interés como las poliaminas, silicio, melatonina, bisulfito sódico de menadiona (vitamina K3), bioestimulantes basados en extractos de algas, microorganismos y sustancias húmicas y fúlvicas (Jiménez-Arias et al., 2021).

6. Medidas para disminuir la transpiración: se recomiendan estrategias de fácil ejecución en campo: (a) eliminación de hojas basales y muy maduras de las ramas que transpiran y gastan compuestos energéticos en mayor cantidad; (b) poda de ramas improductivas del interior del árbol; y (c) raleo de frutos de baja calidad que pueden estimular la transpiración foliar. Igualmente, se debe implementar un eficiente sistema de riego y un manejo adecuado del suelo enfocado en la disminución de evaporación de agua del suelo; por ejemplo, con la siembra de coberturas vegetales o mediante la aplicación de materia orgánica o conservación de una capa de hojarasca. Dentro de otros aspectos se debe considerar el uso de una adecuada densidad de siembra durante el establecimiento de cultivos en campo, y así conocer los cultivos que requieran (cacao) o toleran (banano, plátano) un cierto grado de sombrío, lo cual puede disminuir la tasa de transpiración.

ENSO-La Niña (incrementos en precipitación)

En términos generales, y bajo el principio de que los fenómenos de variabilidad climática afectan de manera diferencial a los sistemas de producción agrícola como una función de la vulnerabilidad de la región donde se encuentra plantado el cultivo y del grado de respuesta del genotipo, se reporta que los frutales perennes no van a ser tan afectados por el cambio y la variabilidad climática comparado con los cultivos anuales y semestrales (Sthapit et al., 2012). Desde el punto de vista de las consecuencias adversas del ENSO-La Niña, éstas se expresan en incremento en la ocurrencia de los suelos saturados por anegamiento e inundaciones, aumen-

tando la incertidumbre en vista de que dichos fenómenos se han vuelto impredecibles en la temporalidad de su ocurrencia y magnitud (Zhang et al., 2021). Con el uso de predicciones del calentamiento global, especialmente para el norte de la región Andina, se reporta que aumentarán las inundaciones, al contrario de Suramérica, donde estos eventos se reducirán (Hirabayashi et al., 2013).

En Colombia, la influencia del fenómeno de ENSO-La Niña se asocia a abundantes precipitaciones en gran parte del país con un alto impacto en los sistemas agrícolas (Ramírez-Gil et al., 2020). Por ejemplo, en muchos suelos de las zonas de cultivos tropicales como el aguacate, especie altamente sensible a las condiciones de bajos contenidos de oxígeno (hipoxia-anoxia) sufren por un drenaje deficiente debido a que su fisiografía, origen y estructura física favorecen la inundación, propiciando niveles freáticos altos o el estancamiento del agua en las capas superficiales (Ramírez-Gil et al., 2021).

La inundación de los suelos es considerada como un estrés de tipo abiótico de los más perjudiciales para la producción de los cultivos por la poca disponibilidad de oxígeno (Kreuzwieser y Rennenberg, 2014). De igual manera, las temperaturas elevadas asociadas al cambio climático pueden agravar los impactos del anegamiento, incrementando la mortalidad de los frutales por la menor solubilidad de O_2 y CO_2 en aguas inundadas y calientes (Panda y Barik, 2021).

En general, la disponibilidad del O_2 para el sistema radicular de las plantas inundadas se reduce debido a que el agua contiene menos gas que el que se encuentra en la atmósfera por la altamente reducida difusión de los gases disueltos en el agua; es decir, es diez mil veces más lenta comparada con la que hay en el aire (Parent et al., 2008); lo que puede inducir a una crisis energética en los tejidos anóxicos que lleve a la posible muerte del frutal. Por la deficiencia de O_2 en suelos saturados de agua, las raíces son el primer órgano de la planta que es afectada, muriendo primero las raíces finas y fibrosas (Fischer y Orduz, 2012). Además, por las condiciones anaeróbicas del suelo se incrementan las incidencias por fitotoxicidad debido a la creciente acumulación de iones reducidos y de productos de organismos anaeróbicos, por lo que se limitan los microorganismos edáficos aeróbicos y se incrementa la aparición de patógenos del suelo (Ramírez-Gil et al., 2021). En general, para los frutales leñosos un nivel freático de 1.5 m es el

más recomendado en muchos cultivos (Fischer y Orduz, 2012). Debido a que los procesos fisiológicos de las raíces como la absorción de nutrientes y agua, la síntesis de citoquininas y giberelinas están altamente afectados por condiciones de hipoxia y anoxia, ahí es donde ocurre un cierre estomático (Taiz et al., 2018). Igualmente, se presenta una disminución de la transpiración, lo que conlleva el marchitamiento y senescencia prematura de las hojas (Restrepo-Díaz y Sánchez-Reinoso, 2020). Estas situaciones causan una reducción de la conductancia estomática, fotosíntesis, crecimiento del tallo y foliar, y de la producción del frutal en general.

Diferentes mecanismos de adaptación y tolerancia permiten a las plantas desarrollar cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos para superar la deficiencia de oxígeno. En este sentido, se destacan la aclimatación metabólica y las redes de señalización, lo que posibilita a las plantas resistir o escapar de entornos con bajo oxígeno que perturban su crecimiento y metabolismo (Xie et al., 2021). Generalmente, las especies que son más tolerantes al anegamiento se adaptan a través de la fermentación en las partes inundadas para continuar con su estado energético (Parent et al., 2008). Así mismo, a corto plazo la planta puede incrementar la cantidad de enzimas antioxidantes como respuesta al aumento de ROS, lo que proporciona un criterio para la tolerancia al estrés por anegamiento (Pérez-Jiménez y Pérez-Tornero, 2021).

Dentro de los cambios morfológicos se presenta la formación de aerénquima para resistir los periodos largos de inundación (Pérez-Jiménez y Pérez-Tornero, 2021), que, inducida por el anegamiento, comprende espacios intercelulares e interconectados propiciados por la muerte programada de las células corticales que puede incrementar el intercambio gaseoso con la parte aérea de la planta (Rankenberg et al., 2021); así, de esta manera, se promueve el ajuste a las condiciones hipóxicas. Otra adaptación morfológica para mejorar la tolerancia al anegamiento es la inducción de raíces adventicias que por su formación de aerénquima facilitan la difusión de O₂ suministrado por las partes aéreas de la planta (Jackson y Colmer, 2005).

En cuanto al mango, se reporta que varios genotipos reaccionan al anegamiento con la formación de lenticelas hipertrofiadas que contribuyen a la difusión de oxígeno (Schaffer et al., 2009) y, al mismo tiempo, sirven para liberar sustancias tóxicas como resultantes del metabolismo anaeróbico

(Parent et al., 2008). Otra posibilidad de reducir el estrés por hipoxia es la selección de patrones más tolerantes, como es el caso de los cítricos, dentro de los cuales *C. macrophylla* tolera mejor el anegamiento que ‘Cleopatra’ (Pérez-Jiménez y Pérez-Tornero, 2021); conducta que también se ha observado en aguacate con el patrón ‘Dusa TM’, que es más tolerante al anegamiento que ‘Duke 7’ (Reeksting et al., 2014), y en genotipos de la raza guatemalteca evaluados bajo las condiciones tropicales en Colombia (Ramírez-Gil et al., 2020). Por otra parte, una poda de las ramas terminado el anegamiento contribuye al restablecimiento del equilibrio en la relación tallo / raíz, sobre todo en frutales con raíces lesionadas. Se encontró que los aguacates podados se recuperaron más rápidamente del estrés hipóxico que los no podados (Sanclemente et al., 2014).

Una forma para reducir el estrés es mejorar el potencial *redox* de un suelo inundado aplicando “fertilizantes de oxígeno sólidos” como el CaO_2 o el MgO_2 , con un efecto sobre el crecimiento (área foliar y peso seco total) de plantas de papaya anegadas (Thani et al., 2016). También, la tolerancia al anegamiento puede ser promovida por la colonización micorrícica de las raíces y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Glick et al., 2007).

Referencias

- Basile, B., Roupheal, Y., Colla, G., Soppelsa, S., y Andreotti, C. (2020). Appraisal of emerging crop management opportunities in fruit trees, grapevines and berry crops facilitated by the application of biostimulants. *Scientia Horticulturae*, 267.
- Botero, H., y Barnes, A. P. (2022). The effect of ENSO on common bean production in Colombia: a time series approach. *Food Security*, 14, 1417-1430.
- Cáceres-Zambrano, J., Ramírez-Gil, J. G., y Barrios, D. (2022). Validating Technologies and Evaluating the Technological Level in Avocado Production Systems: A Value Chain Approach. *Agronomy*, 12.
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S.,... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 215-231.
- Du, T., Kang, S., Zhang, J., y Davies, W. J. (2015). Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2253-2269.

- Evaluaciones Agropecuarias Municipales (2023). *Datos Abiertos*. Instituto Nacional de Meteorología de Colombia. EVA.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023). *FAOSTAT: Food and agriculture data*. FAO.
- Fischer, G., y Orduz, J. (2012). Ecofisiología en frutales. En *Manual Para El Cultivo de Frutales En El Trópico* (pp. 54-72). Produmedios.
- Glick, B. R., Todorovic, B., Czarny, J., Cheng, Z., Duan, J., y McConkey, B. (2007). Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26, 227-242.
- Gori, B., Ulian, T., Bernal, H. Y., y Diazgranados, M. (2022). Understanding the diversity and biogeography of Colombian edible plants. *Scientific Reports*, 12, 7835.
- He, J., Guo, J., Jiang, L., An, W., Ma, F., Guan, Q., y Niu, C. (2022). Transcriptional Effects of Rootstock on Scion after Drought: A Case Study of Using MdGH3 RNAi as the Rootstock. *Horticulturae*, 8, 1212.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., y Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Clim Change*, 3, 816-821.
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Toleikiene, M., Ayaz, M., Hashemi, F., Habib-ur-Rahman, M., Zaheer, M. S., Ahmad, S., Riaz, U., Ali, M., Aslam, M. U., y Haider, I. (2020). Partial root-zone drying (PRD), its effects and agricultural significance: a review. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 159.
- Jackson, M. B., y Colmer, T. D. (2005). Response and Adaptation by Plants to Flooding Stress. *Annals of Botany*, 96, 501-505.
- Jardin, P. du (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14.
- Jiménez-Arias, D., García-Machado, F. J., Morales-Sierra, S., García-García, A. L., Herrera, A. J., Valdés, F., Luis, J. C., y Borges, A. A. (2021). A Beginner's Guide to Osmoprotection by Biostimulants. *Plants*, 10(2).
- Kreuzwieser, J., y Rennenberg, H. (2014). Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. *Plant, Cell & Environment*, 37, 2245-2259.
- Kurukulasuriya, P., y Rosenthal, S. (2013). *Climate Change and Agriculture : A Review of Impacts and Adaptations*. World Bank.
- Lunt, T., Jones, A. W., Mulhern, W. S., Lezaks, D. P. M., y Jahn, M. M. (2016). Vulnerabilities to agricultural production shocks: An extreme, plausible scenario for assessment of risk for the insurance sector. *Climate Risk Management*, 13, 1-9.
- Nguyen, T.-D., Nguyen-Quang, T., Venkatadri, U., Diallo, C., y Adams, M. (2021). Mathematical Programming Models for Fresh Fruit Supply Chain Optimization: A Review of the Literature and Emerging Trends. *AgriEngineering*, 3, 519-541.
- National Oceanic and Atmospheric Administration / Climate Prediction Center (2022). *Climate Prediction Center-ENSO*. NOAA / CPC.
- Panda, D., y Barik, J. (2021). Flooding Tolerance in Rice: Focus on Mechanisms and Approaches. *Rice Science*, 28, 43-57.

- Parent, C., Nicolas, C., Audrey, B., Crevècoeur, M., y Dat, J. (2008). An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant stress*, 20.
- Pérez-Jiménez, M., y Pérez-Tornero, O. (2021). Short-Term Waterlogging in Citrus Rootstocks. *Plants*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/plants10122772>
- Procolombia. (2022). *Cadena de Agroalimentos 2021*. Procolombia.
- Ramírez-Gil, J. G., Castañeda-Sánchez, D., y Morales-Osorio, J. G. (2021). Edaphic factors associated with the development of avocado wilt complex and implementation of a GIS tool for risk visualization. *Scientia Horticulturae*, 288.
- Ramírez-Gil, J. G., Henao-Rojas, J. C., y Morales-Osorio, J. G. (2020). Mitigation of the Adverse Effects of the El Niño (El Niño, La Niña) Southern Oscillation (ENSO) Phenomenon and the Most Important Diseases in Avocado cv. Hass Crops. *Plants*, 9(6).
- Rankenberg, T., Geldhof, B., Veen, H. van, Holsteens, K., Van de Poel, B., y Sasidharan, R. (2021). Age-Dependent Abiotic Stress Resilience in Plants. *Trends in Plant Science*, 26(7), 692-705. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.12.016>
- Ravi, I., y Mustaffa, M. M. (2013). Impact, Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Resilient Banana Production. En H. C. P. Singh, N. K. S. Rao y K. S. Shivashankar (Eds.), *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies* (45-52). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-0974-4_5
- Reeksting, B. J., Taylor, N. J., y Berg, N. van den (2014). Flooding and Phytophthora cinnamomi: Effects on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in shoots of non-grafted Persea americana (Mill.) rootstocks differing in tolerance to Phytophthora root rot. *South African Journal of Botany*, 95, 40-53.
- Restrepo-Díaz, H., y Sánchez-Reinoso, A. D. (2020). Chapter 5: Ecophysiology of fruit crops: A glance at its impact on fruit crop productivity. En A. K. Srivastava y C. Hu (Eds.), *Fruit Crops* (59-66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00005-8>
- Sociedad de Agricultores de Colombia (2021). Así es la hortofruticultura nacional. *Sociedad de Agricultores de Colombia-Revista Nacional de Agricultura*, 1018, 1-10.
- Sanclémente, M. A., Schaffer, B., Gil, P. M., Vargas, A. I., y Davies, F. S. (2014). Pruning after flooding hastens recovery of flood-stressed avocado (*Persea americana* Mill.) trees. *Scientia Horticulturae*, 169, 27-35.
- Schaffer, B., Urban, L., Lu, P., y Whiley, A. W. (2009). Ecophysiology. En *The mango: botany, production and uses* (170-209). CAB International.
- Sthapit, B. R., Ramanatha Rao, V., Sthapit, S.R., y International, B. (2012). *Tropical fruit tree species and climate change*. Bioversity International.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., y Murphy, A. (2018). *Fundamentals of Plant Physiology*. Sinauer Associates.
- Thani, Q. A., Vargas, A. I., Schaffer, B., GuoDong, L., y Crane, J. H. (2016). Responses of papaya plants in a potting medium in containers to flooding and solid oxygen fertilization. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 129, 27-34.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2016). *Fenómeno El Niño. Análisis comparativo 1997-1998 // 2014-2016*. UNGRD.

- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (2018). Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional. UPRA.
- Vélez-Sánchez, J. E., Balaguera-López, H. E., y Alvarez-Herrera, J. G. (2021). Effect of regulated deficit irrigation (RDI) on the production and quality of pear Triunfo de Viena variety under tropical conditions. *Scientia Horticulturae*, 278.
- Wang, B., Feng, P., Waters, C., Cleverly, J., Liu, D. L., y Yu, Q. (2020). Quantifying the impacts of pre-occurred ENSO signals on wheat yield variation using machine learning in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291.
- Wang, Z., Liu, F., Kang, S., y Jensen, C. R. (2012). Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 36-40.
- Xie, L.-J., Zhou, Y., Chen, Q.-F., y Xiao, S. (2021). New insights into the role of lipids in plant hypoxia responses. *Progress in Lipid Research*, 81.
- Yohannes, H. (2015). A Review on Relationship between Climate Change and Agriculture. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 07(2).
- Zhang, T., Hoell, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Murray, D., Hoerling, M., y Hamill, T. M. (2019). Towards Probabilistic Multivariate ENSO Monitoring. *Geophysical Research Letters*, 46, 10532-10540.