

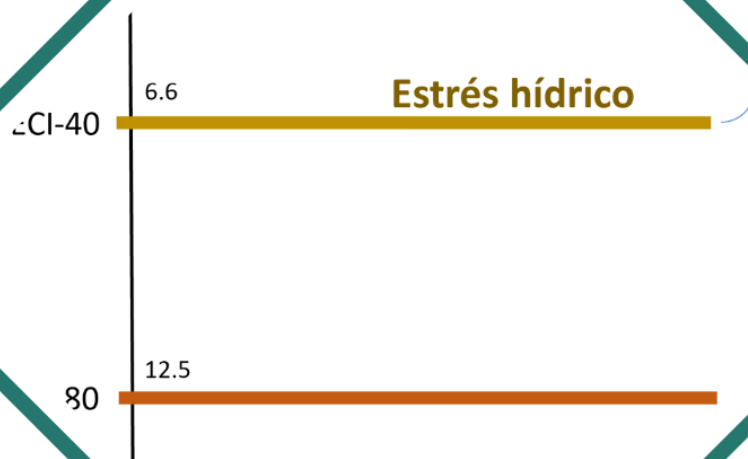
DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE SEQUÍA AGRÍCOLA PARA PEQUEÑOS CAFICULTORES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO PATÍA

Propuesta de trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Agrícola

Daniel Felipe Zorrilla Millán



Cc



FEBRERO 2024

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE SEQUÍA AGRÍCOLA PARA PEQUEÑOS
CAFICULTORES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO PATÍA**

Autor:

DANIEL FELIPE ZORRILLA MILLÁN

Propuesta de trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Agrícola

Directores:

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ing. Agrícola Ph.D

Doc. Titular escuela EIDENAR

TERESITA CANCHALA NASTAR

Ing. Sanitaria Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

SANTIAGO DE CALI

FEBRERO DE 2024

Si el labrador pensase en la sequía, no labraría

TABLA DE CONTENIDO

Lista de figuras	6
Lista de tablas	7
Lista de anexos	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. MARCO TEÓRICO	14
3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	14
3.1.1 Sequía	14
3.1.2 Tipos de sequía	14
3.1.2.1 Sequía meteorológica.	15
3.1.2.2 Sequía agrícola.	16
3.1.2.3 Sequía hidrológica	16
3.1.3 Teoría de Sistemas	16
3.1.3.1 Sistema de producción agrícola - Agroecosistema	17
3.1.3.2 Sistemas de producción de café	17
3.1.3.3 Sistemas de monitoreo de sequía	17
3.1.4 Cultivo de Café	17
3.1.5 Agroecología	18
3.1.6 Riesgo: amenaza, vulnerabilidad y exposición	20
Capacidad de respuesta	20
3.1.7 Resiliencia	20
3.2 MARCO DE CONTEXTO	21
3.2.1 Variabilidad climática-ENOS	21
3.2.2 Cambio climático	21
3.2.3 Caracterización climática de zona cafetera en Colombia	21
3.2.4 Caracterización climática de la zona cafetera en Nariño	23
3.2.5 El café como un sistema de producción agrícola	24
3.2.6 El café en Colombia, contexto geográfico y económico	24
3.3 ESTUDIOS ANTECEDENTES	25
3.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
3.4.1 Índices de Sequía	27
Sequía agrícola en café	27
3.4.2 Cenirrómero	28
3.4.3 LARA	29
3.4.4 Evapotranspiración	30
4. METODOLOGÍA	31
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	31
4.2 ESQUEMA METODOLÓGICO	32
4.2.1 Revisión bibliométrica sobre sistemas de monitoreo de sequía agrícola	33

Gestión de la información	33
4.2.2 Planteamiento de métodos idóneos para el monitoreo de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores	34
4.2.3 Estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante los efectos de la sequía agrícola	38
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1 REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA SOBRE SISTEMAS DE MONITOREO DE SEQUÍA AGRÍCOLA	42
5.2 MÉTODOS IDÓNEOS PARA EL MONITOREO DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA EN UN CONTEXTO DE PEQUEÑOS CAFICULTORES	47
5.2.1 Muestreo de suelos	47
5.2.2 Caferrómetro	49
5.2.2.1 Marcas de evaporación en el Caferrómetro	49
5.2.2.2 Sistema de monitoreo de sequía agrícola mediante Caferrómetro	50
5.3 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN, FORTALECIMIENTO DE RESILIENCIA Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE LOS EFECTOS DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA EN UN CONTEXTO DE PEQUEÑOS CAFICULTORES	52
5.3.1 Estudio técnico de las necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora de Buesaco	52
5.3.1.1 Organización comunitaria	52
5.3.1.2 Sistemas productivos agrícolas	54
5.3.1.3 Necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora	56
5.3.1.4 Potencial agrícola	60
5.3.2 Estrategias agroecológicas para la producción de café como estrategias de adaptación y mitigación a los efectos de sequía agrícola producto de la VC y CC	62
6. CONCLUSIONES	65
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	66
8. REFERENCIAS	67
9. ANEXOS	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Interrelaciones entre los tipos de sequía (meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica)	15
Figura 2. Épocas de siembra recomendada para el cultivo de café en la zona cafetera de Colombia.	23
Figura 3. Distribución intra-anual de la lluvia en la zona cafetera de Colombia.	24
Figura 4. <i>Ecotopos 220A y 2201A, áreas agroecológicas cafeteras de Nariño</i>	25
Figura 5. Esquema de la propagación de la sequía a través del ciclo hidrológico asociado a indicadores clave.	29
Figura 6. Esquema del Cenirrómetro.	30
Figura 7. Dinámica del agua en el suelo: Agua rápidamente aprovechable.	31
Figura 8. Ubicación geográfica zona de estudio.	33
Figura 9. Esquema metodológico.	34
Figura 10. Condiciones y características del territorio de Veracruz, Buesaco.	37
Figura 11. Cenirrómetro-Balance hídrico en sistema planta-suelo-clima.	37
Figura 12. Muestreo de suelos en finca de caficultor.	40
Figura 13. Condiciones caficultores Veracruz, Buesaco.	41
Figura 14. Curva THS suelo finca caficultora Veracruz-Buesaco.	50
Figura 15. Lecturas de nivel de humedad en el Caferrómetro.	52
Figura 16. Herramienta instructiva para lectura de nivel de humedad en el Caferrómetro.	53
Figura 17. Caferrómetro.	54
Figura 18. Actores identificados en la comunidad caficultora de Buesaco-Nariño.	55
Figura 19. Estructuración ideal de actores para caficultores de Buesaco-Nariño.	56
Figura 20. Localización de fincas agricultoras en Buesaco.	57
Figura 21. Hietograma (precipitación media mensual multianual) de Buesaco 1983-2017.	59
Figura 22. Evapotranspiración referencia (ET _o) y del café (ET _c) mensual multianual 1983-2017 Buesaco.	60
Figura 23. Oferta vs. demanda recurso hídrico 1983-2017 Buesaco.	60

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características ecológicas y culturales del café	18
Tabla 2. Cifras a nivel nacional del café	25
Tabla 3. Indicadores bibliométricos empleados.	34
Tabla 5. Coeficiente de cultivo Kc cultivo de café.	37
Tabla 6. Aspectos de coeficiente tanque evaporímetro (Ktan) para tanque Clase A.	37
Tabla 7. Factores de LARA del café.	38
Tabla 8. Tipos de estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante efectos de sequía agrícola.	40
Tabla 9. Resultados más destacados revisión bibliométrica sobre monitoreo de la sequía agrícola a nivel internacional.	43
Tabla 10. Densidad aparente y humedad gravimétrica a 0,3; 3; 8 y 15 bar.	48
Tabla 11. Distancia y marcas de evaporación Caferrómetro.	50
Tabla 12. Necesidad hídrica del Café en Buesaco.	59
Tabla 13. Necesidad hídrica del Café. Finca Guillermo Valencia.	60
Tabla 14. Principales componentes y minerales del suelo para la producción de café en zona cafetera colombiana vs caracterización química de suelos nativos de Nariño.	62
Tabla 15. Estrategias agroecológicas de adaptación y mitigación a la VC y CC para el cultivo de café asociadas a El Niño.	64

Lista de anexos

	Pág.
Anexo 1. Resultados de cartografía social: elementos del pasado del territorio de Buesaco, Nariño	84
Anexo 2. Resultados de cartografía social: elementos del presente del territorio de Buesaco, Nariño	84
Anexo 3. Equipo de membrana de humedad-LASA.	85
Anexo 4. Batidora de dispersión de suelos Hamilton -LASA.	85
Anexo 5. Balanza electrónica-LASA.	85
Anexo 6. Proceso para hallar la necesidad de riego neta (NRn) y el caudal de flujo continuo total (Qpfc)	86
Anexo 7. Proceso para hallar el caudal de flujo continuo total (Qpfc) para el caso de la finca de Guillermo Valencia	86
Anexo 8. Rúbrica de medición objetivo específico 3.	87
Anexo 9. Características ecológicas zona altiplanicie de Nariño.	87
Anexo 10. Resultados del análisis físico de las muestras disturbadas del suelo en Buesaco, Nariño	87

RESUMEN

La sequía es un fenómeno climático caracterizado por un déficit hídrico que supera determinados límites, su comportamiento y efectos son manifestaciones progresivas del mismo evento, con impactos más severos a medida que se desarrolle a través del ciclo hidrológico. La sequía agrícola se caracteriza por bajos niveles de precipitación y alta evapotranspiración los cuales conducen un déficit de humedad en el suelo afectando el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En el país la sequía se gesta gracias a manifestaciones de la variabilidad climática (VC) como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en su fase extrema cálida, El Niño. Éste propicia la reducción de las lluvias totales anuales, y el aumento de la temperatura media del aire, incrementando el número de días con déficit hídrico en los meses históricamente secos del año. La sequía agrícola afecta el cultivo de café, algunas investigaciones han mostrado que la actividad fotosintética y fenológica de las plantas de café se ven afectadas por la incidencia de El Niño. Estas problemáticas tienen una fuerte influencia en la disminución de la producción del cultivo. El departamento de Nariño presenta VC influenciada por El Niño, lo cual le confiere efectos nocivos en el sector agropecuario vinculado al cultivo de café, asociados a procesos de sequía magnificados por el cambio climático (CC), generando pérdidas económicas y aumento de la vulnerabilidad en la seguridad alimentaria de la población.

Este trabajo se llevó a cabo partiendo de condiciones de sequía frecuente, caficultura de pequeños productores y agricultura de secano, observadas en campo en la zona rural de Buesaco-Nariño, que junto con lo contrastado con la información institucional, sirvió para hacer un diagnóstico preliminar de las condiciones climáticas, económicas y socio-culturales del territorio. Posteriormente, se realizó una revisión de literatura actualizada de los efectos de la sequía en el cultivo de café y los sistemas de monitoreo de este fenómeno climático a nivel global, en base a lo cual se construyó una metodología con potencial para implementar un sistema de monitoreo de sequía para pequeños caficultores a partir de la metodología de la herramienta para la programación visual del riego para la caña de azúcar, el Cenirrómetro, teniendo en cuenta las características ecológicas del suelo, clima y café, y las prácticas agrícolas de los pequeños productores en la cuenca alta del río Patía, considerando a su vez estrategias para la mitigación y adaptación a la sequía agrícola. Con la propuesta del sistema de monitoreo para la sequía agrícola en el café (Caferrómetro) se buscó aumentar las capacidades para la acción temprana y anticipada, apoyados en el diálogo de saberes con la comunidad, brindando a la cultura caficultora de la zona rural de Buesaco aptitudes de contingencia y manejo oportuno, eficaz y apropiado ante los efectos de la sequía agrícola, como la reducción considerable del rendimiento o pérdida de los cultivos por estrés hídrico; reforzando así la resiliencia de la comunidad salvaguardando su medio de vida y reduciendo la dependencia de asistencia estatal.

Palabras clave: sequía agrícola, déficit hídrico, humedad del suelo, variabilidad climática (VC), El Niño Oscilación del Sur (ENOS), El Niño, cambio climático (CC), vulnerabilidad, sistema de monitoreo, café.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un período de clima caracterizado por un déficit hídrico que supera determinados límites (Gómez & Cadena, 2017), lo suficientemente largo como para causar un desequilibrio hidrológico (IPCC, 2012). Es un fenómeno recurrente de todos los estados del tiempo (condiciones atmosféricas) que se ha presentado a través de la historia (Organización Meteorológica Mundial, 2006) debido a la variabilidad climática (VC), agravado por la rápida evolución del cambio climático (CC) inducido por factores antropogénicos (Van Loon et al. 2016; Arteaga & Burbano, 2018; UNODRR, 2021).

Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación climática o períodos más largos, hace insuficiente la disponibilidad de los recursos hídricos para responder a las demandas de la sociedad y del medio ambiente (Heim, 2002; Organización Meteorológica Mundial, 2006; Dai, 2013). Por esta razón se sitúa entre las amenazas más complejas y severas relacionadas con factores climáticos que presenta un efecto dominó a gran escala en las sociedades, ecosistemas y economías, siendo la agricultura uno de los sectores de mayor vulnerabilidad ante este fenómeno, en particular en los países en desarrollo (Organización Meteorológica Mundial, 2006; UNODRR, 2021).

En Colombia la sequía se manifiesta en mayor medida debido a la ubicación geográfica del país en el Pacífico Tropical Central cercano a la zona ecuatorial, por lo que recibe la influencia directa de ciclos océano-atmosféricos que son manifestaciones de la VC como El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual cuenta con dos fases extremas: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría) (Poveda, 2004; Ávila et al., 2014) catalogadas según los cambios en la temperatura superficial y subsuperficial del océano. Debido a los efectos de El Niño, en el país se producen cambios en los patrones de precipitación (reducción de las lluvias totales anuales), y de temperatura (incremento de la temperatura media del aire) entre otros, los cuales se traducen en un incremento en el número de días con déficit hídrico en los meses históricamente secos del año (Ramírez et al., 2014; Serna & Farfán, 2018). Las alteraciones en el régimen de lluvias procedentes de El Niño han sido la causa principal de las sequías extremas en diferentes regiones del país, generando impactos negativos significativos a nivel social, económico y ambiental de grandes proporciones (UNODRR & IDEAM, 2018).

La susceptibilidad a fenómenos hidrometeorológicos extremos en el país ha crecido en aproximadamente un 330%, debido a procesos inadecuados de ordenamiento territorial, degradación ambiental y factores asociados con la VC, entre otros (Campos et al., 2012). La sequía se ha venido intensificando en las últimas décadas debido a eventos frecuentes, prolongados y severos con consecuencias perjudiciales a la economía, la sociedad y los ecosistemas naturales en ciertas regiones, con el riesgo de degradación de la tierra y desertificación (Cherlet et al., 2018). La incidencia del CC y los cambios vinculados a la VC aumentan la probabilidad de ocurrencia, frecuencia, gravedad y vulnerabilidad propia de este fenómeno en los años futuros (Gómez & Cadena, 2017; UNISDR, 2022). De acuerdo a estas condiciones, la sequía hoy día se ha convertido en uno de los fenómenos naturales de mayor preocupación en el mundo (Hurtado & Mayorga, 2006) y en el país se presenta en gran parte del territorio nacional cada año, dejando pérdidas económicas importantes principalmente en los sectores agrícola y energético (Gómez & Cadena, 2017).

En el ámbito nacional, la caracterización de la sequía ha estado liderada por el IDEAM (Hurtado & Mayorga, 2006; Hurtado, 2012; Gómez & Cadena, 2017), y otros autores como Montealegre (2009), Sedano et al. (2011), Quintero et al. (2012), Ávila et al. (2014), Ayala & Carvajal (2017), Canchala et al. (2020a) y Mera (2023) que han estudiado la variabilidad de la oferta hídrica en el país debido a fenómenos climatológicos extremos cálidos asociados a las anomalías del ENOS como parte de la VC en el territorio.

La cantidad de estudios sobre la sequía agrícola y su incidencia en el café es menor y menos específica (Poveda et al., 2011; Turbay et al., 2015). Diversas investigaciones han mostrado que la actividad fotosintética y fenológica de las plantas de café se ven afectadas por la incidencia de El Niño asociado a la VC (Ramírez et al., 2014; Serna & Farfán, 2018); además de percibir otros efectos asociados nocivos, como el incremento en la distribución de plagas y enfermedades (broca y roya del cafeto), aumento de la dinámica poblacional de arvenses agresivas con afectación de la formación del grano y el desarrollo de la planta. Estas problemáticas tienen una fuerte influencia en la disminución de la producción del cultivo (Federación Nacional de Cafeteros et al., 2017).

La caficultura colombiana, se basa en su gran mayoría en productores de menos de una hectárea y media de plantación (pequeños productores) que generalmente viven en la misma finca donde cultivan el café y utilizan agricultura de secano (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020). Es un sector que también es afectado ante la sequía, como lo ocurrido en 2013 cuando los caficultores se vieron gravemente damnificados por los efectos acumulados de la sequía de inicios del 2010 (Turbay et al., 2015). Estos factores impactan a la producción de café afectando el ingreso y rentabilidad de los caficultores (Cenicafé, 2016; Federación Nacional de Cafeteros et al., 2017). No obstante el sector cafetero, es un actor relevante en la economía nacional, presente en 23 departamentos, cuenta con cerca de 540 mil familias caficultoras que representan alrededor de 1,5 millones de personas, y su participación en el PIB nacional en 2020 fue de 0,9%, mientras que en el PIB agropecuario aportó el 11% (Dane, 2020).

El café es el cultivo más importante en la región Andina colombiana (Federación Nacional de Cafeteros et al., 2017). Por otra parte, la zona del Alto Patía, ubicada en la cordillera de los Andes, presenta unos ecosistemas frágiles y únicos actualmente amenazados por la deforestación de sus bosques y sustitución de vegetación nativa por cultivos y pastizales para ganadería (Vergara, 2015) lo cual deteriora en gran medida la cubierta natural (Corponariño, 2017), y repercute en una pérdida progresiva de la productividad de bienes y servicios este territorio. Nariño como una de las regiones insignias de esta zona, es uno de los departamentos con un aporte importante en la escena productiva del café a nivel nacional con 4% del total de hectáreas sembradas en la zona cafetera, además comprende el 7,3% del número de caficultores a nivel nacional (Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales, 2020). Sin embargo, este departamento que presenta VC representada por anomalías en la precipitación influenciadas por las fases extremas del ENOS en el suroccidente del país (Canchala et al., 2020a, 2020b), también percibe efectos nocivos en el sector agropecuario asociados a procesos de extremos climáticos como desertificación y sequía (Corponariño, 2012) magnificados por el CC, generando pérdidas económicas y aumento de la vulnerabilidad en la seguridad alimentaria de la población (Arteaga &

Burbano, 2018). En su territorio se evidencian también condiciones de pobreza, falencias en la organización comercial de los campesinos, realidades agravadas durante muchos años por la situación histórica del conflicto armado (Gobernación de Nariño, 2020).

Debido a las características sigilosa y perjudicial de la sequía para las comunidades (UNODRR, 2021), la frecuencia del fenómeno y las graves repercusiones como las ocurridas en el último El Niño del año 2015 -catalogado como uno de los más intensos de la historia (tuvo gran afectación en la disponibilidad de agua en el territorio nacional) (Gómez & Cadena, 2017)-, en el país se despertó el interés nacional por la reducción de los riesgos asociados a eventos extremos y se pone mayor atención a desarrollar estrategias o políticas nacionales (como los Sistemas de Alerta Temprana-SAT) como una medida de adaptación al CC mediante la cual se haga un seguimiento continuo del desarrollo y comportamiento de la sequía (López et al., 2017; Pérez et al., 2017), a través del monitoreo de condiciones climáticas como herramienta fundamental para la gestión de las amenazas que se puedan generar para la población (UNISDR, 2009; Gómez & Cadena, 2017; López et al., 2017)

Pese a la importancia de las predicciones del tiempo para salvar vidas y medios de subsistencia (la cantidad de vidas perdidas se reduce casi tres veces durante el periodo de ocurrencia de un evento desastroso gracias a las alertas y pronósticos de eventos climáticos), un tercio de la población mundial principalmente en los países menos desarrollados aún no cuenta con estas capacidades, (United Nations, 2022). En Colombia, existen iniciativas (como los SAT) institucionales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, la Dirección General Marítima y Portuaria -DIMAR, etc.) para abordar fenómenos de escala nacional, SAT regionales y algunos pocos municipales para fenómenos locales (SIATA, 2010). Sin embargo estos programas están orientados hacia el monitoreo de eventos de riesgo derivados de condiciones climáticas adversas como inundaciones (Domínguez & Lozano, 2014; SIRE, 2016) o movimientos en masa inducidos por lluvia (deslizamientos y avalanchas) (Aristizábal et al., 2010; SIATA, 2010), o en su defecto usan informes de instituciones gubernamentales para el monitoreo de las condiciones ambientales asociadas a la variación climática (IDEAM) que obtienen de portales web (Fundación Pro Cuencas Río Las Piedras, 2013; Domínguez & Lozano, 2014; Pérez et al., 2017) con los que elaboran informes que finalmente divulgan a los tomadores de decisión y comunidad en general sobre la ocurrencia actual o futura de estos eventos.

Estas iniciativas indican por un lado que en el país se viene prestando atención hacia la gestión de riesgos mediante la implementación de sistemas de monitoreo complejos; pero también evidencian una dificultad para el pequeño productor que no cuenta con acceso a internet ni acceso a servicios técnicos especializados como una estación pluviográfica para hacer la medición constante de las condiciones climáticas. Debido a la diversidad y complejidad del país, los fenómenos climáticos extremos tienen características muy variadas que no se reflejan en los enfoques de los sistemas nacionales de monitoreo y pronóstico, por lo que es necesario buscar medidas alternativas de alerta complementarias para el monitoreo de amenazas de origen natural (UNODRR & IDEAM, 2018), con un enfoque integral orientado a la integración y participación activa de las comunidades (López et al., 2017).

Como una medida de adaptación climática debido a la VC, es conveniente que el pequeño caficultor modifique su sistema de producción de café (Turbay et al., 2015) implementando

estrategias de monitoreo de las condiciones climáticas, de tal forma que le proporcione alertas tempranas de la existencia (inicio y finalización) de eventos climatológicos extremos como la sequía, determinando su gravedad y extensión, y le confiera capacidades preventivas y de mitigación ante sus efectos adversos para así minimizar los riesgos asociados a este fenómeno (Organización Meteorológica Mundial, 2006), fortaleciendo su resiliencia para evitar el deterioro de su seguridad alimentaria (Ramírez et al., 2014; Serna & Farfán, 2018) y salvaguardar su rentabilidad como caficultor (Cenicafé, 2016; Fuganti et al., 2020).

Con este panorama y teniendo en cuenta la vulnerabilidad histórica de los caficultores nacionales agravada por los efectos perjudiciales de ENOS en la zona andina colombiana, nace la necesidad de un sistema de monitoreo de la sequía para caficultores de la Cuenca Alta del Río Patía, que tenga en cuenta las características ecológicas de la zona, y las condiciones económicas y culturales de los pequeños caficultores para proponer un sistema con una metodología participativa y comunitaria de vigilancia de la sequía agrícola.

Considerando esta necesidad, se realizó esta investigación en el marco del proyecto de investigación *ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN EN SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS DE NARIÑO*.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de monitoreo de la sequía agrícola para pequeños caficultores de la cuenca alta del Río Patía, Colombia

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una revisión bibliométrica sobre sistemas de monitoreo de sequía agrícola.
- Plantear métodos idóneos para el monitoreo de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores.
- Proponer estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante los efectos de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

3.1.1 Sequía

La sequía es una característica normal, recurrente del clima. Se produce en prácticamente todos los regímenes climáticos, incluidas las zonas de alta y baja precipitación, sin embargo está restringida a las áreas de baja precipitación; es un fenómeno temporal, en contraste con la aridez que es una característica permanente del clima (Wilhite, 2000; Heim, 2002; Dai, 2013).

Se entiende como un déficit acumulativo de precipitación durante un período prolongado de tiempo, en otras palabras, cuando se producen niveles de precipitación inferiores a los valores climatológicos promedio de una región particular (Organización Meteorológica Mundial, 2006; European Drought Observatory, 2022).

Esta característica climática se asocia con altas temperaturas, baja humedad relativa, mayores cantidades de insolación y menor nubosidad, que producen un incremento de la evaporación del suelo y de la transpiración de las plantas (Ramírez et al., 2014). Estos factores que aportan a la sequía pueden tener un mayor impacto por vientos fuertes, patrones de bloqueo atmosférico y condiciones previas en la humedad del suelo, embalses y acuíferos, entre otros (European Drought Observatory, 2022).

3.1.2 Tipos de sequía

Las sequías se pueden clasificar teniendo en cuenta factores claves como la intensidad, magnitud, duración, extensión y frecuencia (Organización Meteorológica Mundial, 2006; UNODRR, 2021).

- La frecuencia especifica el número de eventos en un intervalo de tiempo.
- La magnitud describe el déficit acumulado durante la duración de un evento.
- La intensidad describe el grado de déficit de precipitación, humedad del suelo o almacenamiento de agua durante una sequía.
- La duración y extensión de una sequía están vinculadas a la propagación del déficit hídrico en el tiempo y espacio.

Tomando en cuenta en primer lugar la incidencia específica del fenómeno, las sequías se clasifican en meteorológica y agrícola, mientras que al analizar su impacto en el tiempo se tiene la sequía hidrológica (Gómez & Cadena, 2017). Cabe destacar que en tiempos recientes ha surgido otro tipo en la clasificación de sequía, la cual se conoce como “sequía socioeconómica” y su ocurrencia depende de la oferta y demanda del recurso hídrico. Cuando la demanda es mayor a la oferta se dice que es un evento de sequía socioeconómica (Hurtado & Mayorga, 2006). Las implicaciones de ésta última son transversales a la sequía agrícola e hidrológica debido a su estrecha relación con los estilos de subsistencia de las poblaciones en las regiones afectadas.

La oferta y demanda de bienes y servicios como el agua, forraje para animales, cereales, pescado, energía hidroeléctrica varía en función de la precipitación y/o disponibilidad de

agua. La demanda en particular, suele tender al alza debido que durante una sequía no sólo disminuye la tasa de reposición hídrica en la superficie y en el subsuelo, sino que aumenta también considerablemente la demanda de estos recursos por el aumento de la población y desarrollo de la misma (Organización Meteorológica Mundial, 2006; European Drought Observatory, 2022).

Aunque la sequía se diferencie en diferentes tipos según su comportamiento y efectos en el tiempo, éstos son manifestaciones progresivas (etapas) del mismo evento, el cual tendrá impactos más severos a medida que los avances en el ciclo hidrológico se propagan (UNODRR, 2021) (Ver Figura 1).

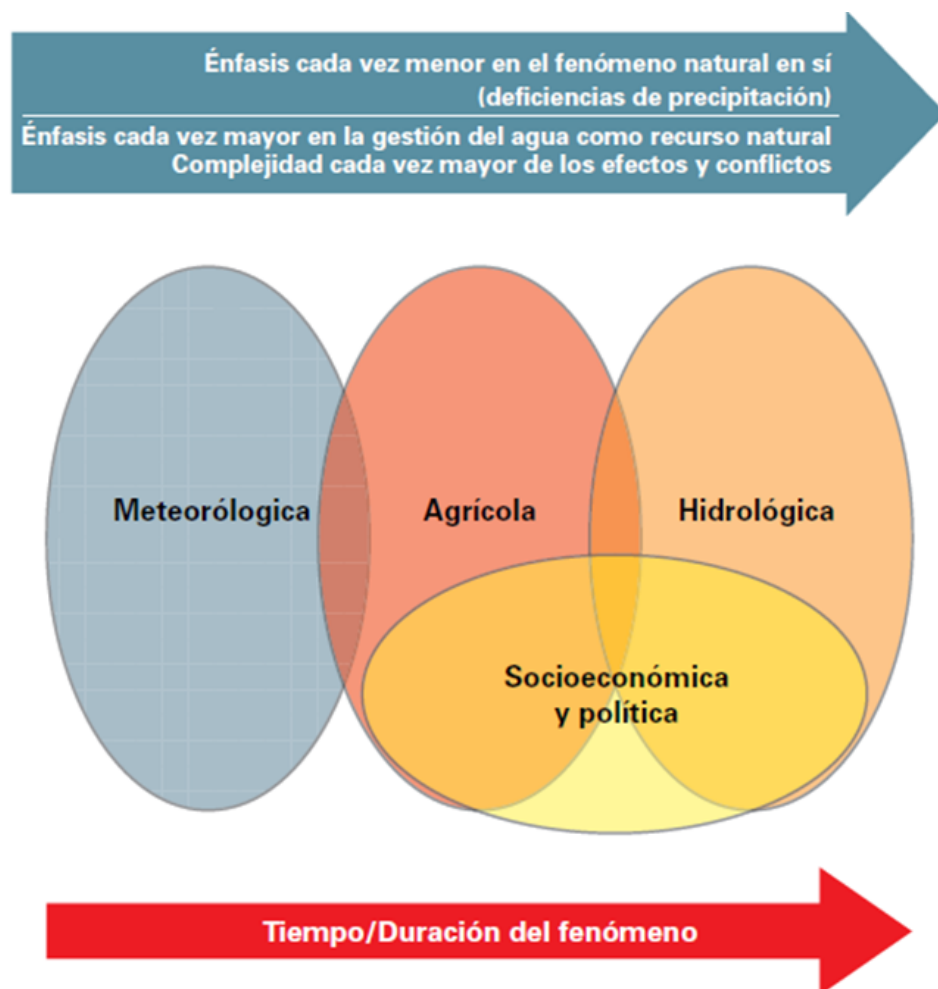


Figura 1. Interrelaciones entre los tipos de sequía (meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica). Fuente: adaptado de Organización Meteorológica Mundial (2006)

3.1.2.1 Sequía meteorológica.

Una sequía meteorológica se define generalmente como un período con un déficit de precipitación anormal (Hurtado & Cadena, 2002), en relación con las condiciones promedio a largo plazo para una región (Gómez Blanco & Cadena, 2017). Es un fenómeno que responde a causas diversas según la región (Organización Meteorológica Mundial, 2006; European Drought Observatory, 2022).

Esta medida es apropiada solamente para regiones de clima tropical, subtropical o clima húmedo, en donde se presentan regímenes de lluvia monomodal o bimodal como la selva tropical (Hurtado & Mayorga., 2006).

3.1.2.2 Sequía agrícola.

La sequía agrícola se presenta cuando el agua disponible, ya sea por precipitación o por almacenamiento en el suelo o en los diferentes cuerpos de agua, no es suficiente para que los cultivos puedan crecer y desarrollarse de manera adecuada. Este fenómeno tiene lugar cuando hay periodos de baja precipitación, evapotranspiración actual y potencial altas, déficit de agua en el suelo, reducción del nivel de agua en los ríos y acuíferos, entre otros (Hurtado & Mayorga, 2006).

Cuando una sequía meteorológica conduce a un déficit de humedad del suelo limitando la disponibilidad de agua para la vegetación natural y los cultivos, el resultado es una sequía agrícola (Gómez & Cadena, 2017; European Drought Observatory, 2022). Tiene en cuenta factores como la intensidad de precipitación, velocidad de infiltración, nivel de humedad, pendiente y de tipo de suelo (Organización Meteorológica Mundial, 2006).

Sus impactos se limitan al estado de los cultivos y no tienen en cuenta ninguna otra consecuencia que pueda originar una sequía (Hurtado & Mayorga, 2006).

3.1.2.3 Sequía hidrológica

La sequía hidrológica está asociada con los efectos de los periodos de baja precipitación sobre el abastecimiento de aguas superficiales o subterráneas. Su frecuencia y severidad se definen principalmente por el nivel de los ríos. Esta sequía está usualmente desfasada de la ocurrencia de sequías meteorológicas o agrícolas, debido a que las deficiencias de precipitación en los componentes del sistema hídrico como son humedad del suelo, niveles de los ríos, lagos, embalses y aguas freáticas tardan en evidenciarse. El clima es el principal contribuyente a la sequía hidrológica, sin embargo, otros factores como cambios en el uso del suelo, degradación del suelo y construcción de presas entre otros afectan las características hidrológicas de una zona (Hurtado & Mayorga, 2006).

Toma en consideración factores como agua superficial (corrientes fluviales) y subterránea, lagos, embalses y acuíferos (Organización Meteorológica Mundial, 2006; Gómez Blanco & Cadena, 2017; European Drought Observatory, 2022).

3.1.3 Teoría de Sistemas

Un sistema es un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas. Está conformado por componentes con estructura y funciones determinadas con entradas (insumos), salidas (productos), interacción entre ellos y frontera, todos estos definidos hacia un fin establecido (Bertalanffy, 1976 en Arcila et al., 2007).

Los problemas que se enfrentan en la realidad, son complejos, por lo que exigen soluciones complejas, multidisciplinarias, es decir que integren y consideren varios factores. La Teoría General de Sistemas se encarga de analizar un sistema de forma general buscando semejanzas para aplicar leyes idénticas a fenómenos diferentes, que permitan encontrar

características comunes en sistemas diversos. También analiza de la misma manera los subsistemas que componen un sistema y las interrelaciones que ocurren entre sí para cumplir un propósito (Arcila et al., 2007).

3.1.3.1 Sistema de producción agrícola - Agroecosistema

Un sistema de producción agrícola o agroecosistema es un ecosistema que cambia, maneja y administra el hombre utilizando factores de producción (suelo, mano de obra, capital, semillas, etc.) con prácticas adecuadas de manejo, arreglos espaciales y cronológicos, con el fin de producir bienes de importancia económica. Es un conjunto de actividades donde participan productores (pequeños y grandes), quienes organizan, dirigen y administran los sistemas orientados a unos objetivos propuestos; empleando prácticas y tecnologías, de acuerdo a su medio físico, para obtener diferentes producciones agrícolas (Duarte et al., 1996; Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020). Por ejemplo, el agricultor mediante la planta de café que transforma CO₂, agua, energía solar y minerales, en la producción de las cerezas de café (Arcila et al., 2007).

3.1.3.2 Sistemas de producción de café

Un sistema de producción de café se define como el conjunto de factores (características edafológicas, climáticas y socioeconómicas) que al interactuar junto con opciones tecnológicas permiten obtener la máxima productividad desde el punto de vista biológico, económico y social (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020). La disponibilidad de energía y agua son factores ambientales importantes en la producción del sistema, dado su importancia en los procesos físicos y bioquímicos necesarios para el crecimiento y el desarrollo de la planta (Ritchie, 1991).

En la región cafetera colombiana se han identificado áreas homogéneas en ciertas características (suelo, relieve y clima) que definen el entorno o el ambiente principal de los sistemas de producción de café (Figura 3) (Arcila et al., 2007).

3.1.3.3 Sistemas de monitoreo de sequía

Un sistema de monitoreo de sequía es un conjunto de metodologías lógicas y secuenciales que se implementan para la detección, seguimiento y evaluación de las sequías (Ravelo et al., 2016). Éstas se han impulsado como estrategias de respuesta y mitigación al fenómeno climático de las sequías por instituciones a nivel global como la ONU (EIRD/ONU, 2009, en Ravelo et al., 2016) y la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Rojas, 2020).

3.1.4 Cultivo de Café

El cultivo de café está constituido por la planta del cafeto, un arbusto perenne (planta que vive durante más de dos años) y arbustiva con un ciclo de vida en condiciones comerciales hasta 20-25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo. El cafeto empieza a producir frutos en ramas de un año de edad, continúa su producción en el tiempo pero alcanza su máxima productividad a los 6-8 años de edad. A partir de la etapa de mayor producción, la planta continúa teniendo niveles de producción menores durante su vida (Arcila et al., 2007). A nivel metabólico, el café es una planta C3 (como el arroz, trigo, soya y todas las especies arbóreas), es decir sin adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorrespiración, a diferencia de las plantas C4 o CAM (Khan Academy, 2023).

Tabla 1. Características ecológicas y culturales del café

Planta de Café	Cafeto, arbustivo, perenne
Especie	Coffea arábica L.
Variedad	Castillo Zonal (zona cafetera centro sur) Castillo Zonal Tabi (zona cafetera sur)
Densidad de siembra plantas/ha	6.500 - 7.500 (Castillo Zonal - zona cafetera centro sur) 5.000 (Tabi-zona cafetera sur)
Precipitación para máxima producción	1800 - 2000 mm anual
Temperatura óptima de crecimiento (suelo de origen volcánico)	15-35°C (primeros 50 cm)
Temperatura media del aire	18 - 22 °C
Suelos zona cafetera	Fertilidad natural media a baja. Contenidos medios a altos de materia orgánica, tendencia a la acidez, bajos contenidos de fósforo, responden bien a la fertilización nitrogenada, al potasio y al magnesio.
Evapotranspiración en el café	35% evaporación - 65% transpiración.
Evapotranspiración media: zona cafetera entre 1000 y 2000 msnm	3,74 - 3,06 mm/día
Consumo agua del cafeto	125 mm/mes
Insolación promedio zona cafetera (radiación directa)	1600 - 1800 h/año
Viento	< 5,0 km/h (valores extremos esporádicos de ráfagas de 70 km/h)

Fuente: *adaptado del* Centro Nacional de Investigaciones de Café (2020); Arcila et al. (2007); Federación Nacional de Cafeteros et al. (2017)

En el ciclo del café se pueden identificar 5 etapas, siembra, desarrollo vegetativo, producción, cosecha y poscosecha (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021). Durante el desarrollo vegetativo y producción, más específicamente la floración y desarrollo del fruto son las fases fenológicas dentro del desarrollo del cultivo de café que presentan una mayor sensibilidad al déficit hídrico, lo que se evidencia con una disminución del rendimiento del café en estas fases (González et al., 2017).

3.1.5 Agroecología

La agroecología se puede definir como el conjunto de saberes que proporciona los principios ecológicos básicos para estudiar, diseñar y gestionar agroecosistemas productivos, que conserven los recursos naturales (sostenible), con menos impactos ambientales, culturalmente sensibles, socialmente justos y económicamente viables

(autosuficiente) (Altieri, 1995; Gliessman, 1998, en Altieri, 2002). Mediante ella se evoluciona la visión unidimensional de los agroecosistemas (aspectos de genética, agronomía, edafología, etc.) con una comprensión de la interrelación de todos sus componentes y la complejas dinámicas de los procesos ecológicos incluyendo el aspecto social en su estructura y función (Vandermeer, 1995, en Altieri, 2002).

Permite el estudio holístico de los agroecosistemas (elementos ambientales y humanos). A través de esta filosofía el campo (área utilizada para la producción agrícola), es visto como un sistema complejo en el que también ocurren procesos ecológicos que se dan en condiciones naturales, como el ciclo de nutrientes, interacciones depredador/presa, competencia, simbiosis, entre otros (Gliessman, 1998, en Altieri, 2002).

Según el enfoque en la necesidad de aprender a vivir en o con sistemas cambiantes, más que en “controlarlos” (Altieri y Nicholls, 2013), en tiempos de crisis o desastres el manejo debe enfocarse hacia la construcción de la resiliencia tomando en cuenta los principios de diseño agroecológico (Altieri 2002, Martin et al. 2010, en Altieri y Nicholls, 2013):

- Los procesos ecológicos en los agroecosistemas exhiben dimensiones espaciales y temporales, las cuales se deben tomar en cuenta para los planes de manejo ambiental
- La estructura y la función del agroecosistema están determinadas por los componentes de biodiversidad y sus interacciones.
- La estabilidad no está relacionada sólo al número de especies presentes, sino también con las conexiones funcionales entre estas.
- En general, mientras más diversos los agroecosistemas, estos tienden a ser más estables y resilientes. La biodiversidad se debe mantener o promover para mantener la capacidad de autorregulación de los agroecosistemas. Los agroecosistemas diversos exhiben capacidades homeostáticas que “suavizan” los efectos de variables externas cambiantes.
- Todos los componentes bióticos y abióticos del agroecosistema están conectados y forman una red. Dado que los procesos físicos y biológicos son interactivos, es importante determinar las interacciones en el agroecosistema y saber interpretarlas para su optimización.
- La energía solar es el motor del ecosistema a través del proceso fotosintético de las plantas. Todos los niveles tróficos del agroecosistema (herbívoros, depredadores y descomponedores) se organizan y dependen del nivel trófico primario y mientras más compleja la vegetación, más complejos son los niveles tróficos asociados.
- Los ecosistemas tienden hacia la complejidad y la entropía, por lo que los diseños agroecológicos deberían acompañar a la naturaleza en su tendencia hacia la complejidad.
- Todo agroecosistema tiene una historia de desarrollo ecológico que influencia su estado actual. Mientras más degradado y artificializado esté el sistema, más difícil y largo será el proceso de transición agroecológica.
- Los agroecosistemas son parte de un paisaje más amplio. Los agroecosistemas introducidos en una matriz ambiental más compleja son más resilientes. Los ecotonos son zonas tampón y de transición, y son tan importantes para los ecosistemas como lo son las membranas para las células.

Dado que los agroecosistemas son el producto de una coevolución social-ecológica, estos principios agroecológicos se complementan con otros tres principios sociales claves para reforzar esa mirada integral y holística (Adger 2000, en Altieri y Nicholls, 2013):

- La capacidad de construir resiliencia en un agroecosistema depende del contexto sociocultural (nivel de organización, gobernanza, conocimiento tradicional, etc.) que lo nutre y de la capacidad de reaccionar, movilizarse y de adaptarse a los cambios de los grupos humanos que los manejan.
- Un sistema socio-ecológico vulnerable ha perdido su resiliencia, lo que a su vez implica una pérdida de la capacidad de responder y adaptarse. Los agroecosistemas son más vulnerables en sus límites geográficos y cuando los grupos humanos carecen de armonía social y su identidad cultural se ha erosionado.
- La adaptabilidad es la capacidad de las comunidades de construir resiliencia a través de acciones colectivas.

3.1.6 Riesgo: amenaza, vulnerabilidad y exposición

Puede definirse el riesgo como la probabilidad potencial que tiene un sistema para sufrir consecuencias adversas (UNODRR, 2021). El riesgo de los impactos por la sequía depende de la interacción compleja (no lineal) de la amenaza de sequía, y la vulnerabilidad socioeconómica y ecosistémica de los sistemas expuestos (Altieri y Nicholls, 2013; IPCC, 2014; UNODRR, 2021).

$$\text{Riesgo} = f(\text{amenaza}, \text{exposición}, \text{vulnerabilidad}) \quad (1)$$

La vulnerabilidad se asocia con las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que incrementan la susceptibilidad de un individuo, comunidad o sistema a la amenaza de la sequía. La exposición por su parte se define como los elementos (individuos, comunidades, infraestructura o ecosistemas) de un sistema localizado en áreas que pueden verse afectados de manera perjudicial por la amenaza de la sequía (IPCC, 2014). La amenaza comprende características fundamentales como la frecuencia, intensidad, duración y extensión (Altieri y Nicholls, 2013; IPCC, 2014).

Un evento de sequía se vuelve amenaza cuando la demanda del recurso hídrico sobrepasa la oferta, y se convierte en riesgo cuando disminuye la capacidad de enfrentar la falta de agua (UNODRR, 2021).

Capacidad de adaptación

La capacidad se refiere a la combinación de las fortalezas, atributos y recursos disponibles para un individuo, comunidad u organización que pueden ser usados para alcanzar objetivos propuestos, como el uso y acceso sostenible a recursos sociales, económicos, culturales y naturales. Son las características (positivas) de las personas que les permiten como sociedad reducir el riesgo que plantea una amenaza (IPCC, 2012).

La capacidad de adaptación hace alusión a la habilidad de un individuo o sistema de anticipar, transformar la estructura (organización) y funcionamiento para sobrevivir con la menor afectación posible a las amenazas (Saldaña, 2007 en IPCC, 2012). Mediante una adecuada capacidad de respuesta se puede reducir la vulnerabilidad (Altieri y Nicholls, 2013).

3.1.7 Resiliencia

Habilidad de un sistema (y componentes) para afrontar, responder, anticipar, absorber, acomodarse (reorganizándose y adaptándose) o recuperarse a tiempo y de manera eficiente de los efectos de una amenaza potencial, gestionando la incertidumbre y generando aprendizajes (generación de experiencia), buscando la preservación, mejoramiento o restauración de sus funciones y estructuras básicas esenciales (IPCC, 2012). Un agroecosistema es “resiliente” si es capaz de seguir produciendo alimentos, a pesar del gran desafío de una severa sequía o una tormenta (Altieri y Nicholls, 2013).

3.2 MARCO DE CONTEXTO

3.2.1 Variabilidad climática-ENOS

La VC, se refiere a fluctuaciones observadas en las condiciones atmosféricas medias medidas mediante estadísticas (desviaciones típicas), en todas las escalas temporales (relativamente cortas como la estacional, anual, etc.) y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular (Montealegre & Pabón, 2002; Carvajal et al., 2007; Montealegre, 2009; Sedano et al., 2011).

El fenómeno de VC más importante que afecta el clima del país es el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es (Poveda et al., 2011; Canchala et al., 2020a, 2022), y se refiere a una condición anómala en la presión atmosférica y la temperatura de la superficie oceánica que registra el Pacífico tropical del Este (Puertas & Carvajal, 2008; Núñez, 2013). El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre dos fases extremas, una cálida (El Niño) y una fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Océano (TSM) en el Océano Pacífico ecuatorial central y oriental (Ayala & Carvajal, 2017)

ENOS como fenómeno océano-atmosférico de gran escala, tiene impactos asociados que alteran el clima del planeta, y es una de las principales manifestaciones de la VC interanual a nivel mundial. En Colombia éste fenómeno produce alteraciones en el régimen de lluvias y temperatura media del aire, lo cual ha repercutido en sequías extremas (El Niño) y eventos intensos de precipitación estrechamente asociados al aumento de caudales (La Niña) (Carvajal et al., 2007; Montealegre, 2009; Sedano et al., 2011).

3.2.2 Cambio climático

El CC, se define como la modificación del estado del tiempo a grandes escalas de tiempo, usualmente décadas, y en relación a períodos históricos comparables, debido a causas naturales (externas o internas a La Tierra), o como resultado de la actividad humana (antrópicas), y con ocurrencias en el pasado geológico (Quintero et al., 2012) que tiene un efecto directo desde el punto de vista social, económico y político (Sedano et al., 2011). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) reconoce el CC, como las modificaciones al clima debido a actividades humanas (IPCC, 2014).

3.2.3 Caracterización climática de zona cafetera en Colombia

Colombia está caracterizada por sus tres cordilleras y áreas de planicie inundable. Tiene un ciclo hidrológico dinámico ya que está ubicada en el trópico, y debido a la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), de los procesos que ocurren en los océanos Atlántico Tropical, el mar Caribe y el Pacífico Tropical, lo que ocasiona variaciones en la distribución espacio-temporal de la precipitación, de la temperatura y de otras variables climatológicas (Poveda, 2004; Sedano et al., 2011).

En las zonas cafeteras la precipitación alcanza valores anuales entre 2.000 y 2.500 mm. Ocurren generalmente dos períodos secos y dos lluviosos en el año, con volúmenes anuales de evaporación inferiores a 1.200 mm. Sin embargo, existen zonas con limitaciones hídricas por una inadecuada distribución de lluvias o por la alta evaporación (Jaramillo, 2005, 2005a). Las características climáticas de cada región como la distribución de lluvias determinan los volúmenes, la floración semestral y los patrones de distribución de la cosecha (Jaramillo, 2000, 2005) (Figura 2).



Figura 2. Épocas de siembra recomendada para el cultivo de café en la zona cafetera de Colombia.

Fuente: Centro Nacional de Investigaciones de Café (2020)

La distribución intra-anual de la lluvia en Colombia puede ser de tipo unimodal, con un pico máximo de lluvia en el año, o bimodal con dos picos máximos de lluvia en el año. Las características de tipo unimodal predominan en la región Oriental del país, en los Llanos Orientales, en la vertiente del Amazonas y en la región Atlántica. Patrones de distribución bimodal se presentan en la región Andina, en las cuencas de los ríos Patía, Cauca y Magdalena, para latitudes entre los 4 y 7°N (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020).

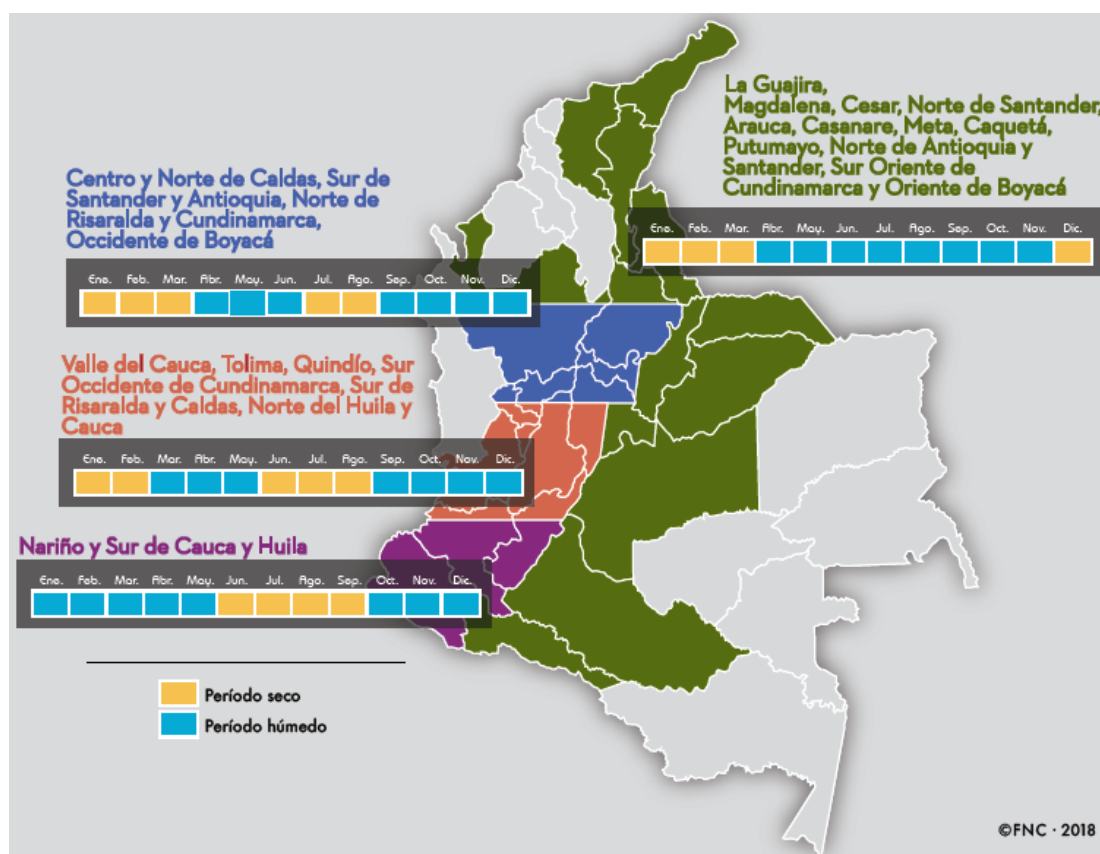


Figura 3. Distribución intra-anual de la lluvia en la zona cafetera de Colombia. Fuente: Centro Nacional de Investigaciones de Café (2020)

La región Sur (1° latitud Norte) presenta un periodo marcadamente seco entre junio y septiembre y una estación lluviosa entre octubre y junio. En la región central (3 a 6 latitud Norte) hay dos periodos lluviosos, de marzo a junio y septiembre a diciembre, y dos periodos menos lluviosos entre enero-febrero y julio agosto. La región Norte (10 latitud Norte) presenta una estación seca pronunciada de diciembre a marzo y una lluviosa de mayo a noviembre (Jaramillo, 2005).

En Colombia, la VC y el CC ocasionan frecuentes anomalías en la precipitación que impactan fuertemente la sociedad y los sectores productivos (Sedano, 2012; Carvajal, 2012), debido principalmente a sus efectos en eventos extremos como las sequías (El Niño) e inundaciones (La Niña) (Ramírez y Jaramillo, 2009; Quintero et al., 2012). La caficultura colombiana, en particular, es considerablemente afectada por la VC debido a los cambios en los patrones de precipitación y temperatura, los cuales tienen un impacto en la producción de café, propician la presencia y distribución de plagas y enfermedades, específicamente la broca y roya del cafeto, e influyen en el incremento de arvenses agresivas que afectan la formación del grano y el desarrollo de la planta, lo cual afecta la producción, el ingreso y rentabilidad de los caficultores (Cenicafé, 2016).

3.2.4 Caracterización climática de la zona cafetera en Nariño

Nariño ha sido clasificado en tres subregiones climáticas, pacífico, andina y amazónica, con ciclos anuales, monomodal (pacífico y amazónica) y bimodal (andina) (Canchala et al.,

2020a), donde estas subregiones muestran una influencia en sus patrones de lluvias por la orografía de la región, mecanismos (ZCIT) y fenómenos (ENOS) de VC (Canchala et al., 2020b, 2022). Se ha identificado por ejemplo, que durante eventos El Niño se registra disminución en la lluvia mensual (condición precursora de eventos de sequía) en la subregión andina, y aumento de la misma en la subregión pacífico, lo contrario ocurre durante eventos La Niña (Canchala et al., 2020a).

De acuerdo a la delimitación de áreas potenciales para la zona cafetera (ecotopos cafeteros), se han identificado dos zonas agroecológicas en Nariño: ecotopos 220A, ubicado en el norte del departamento, que comprende las regiones de la cuenca del río Patía, subcuencas de los ríos Juanambú y Mayo, altitudes de 1300 a 1800 msnm y una precipitación anual de 1700 a 1900 mm, así como el ecotopo 221A ubicado al sur occidente del departamento y comprende las regiones de la cuenca del río Guaitara, con altitudes entre 1400 y 2100 m y con una precipitación anual de 1400 a 1700 mm (Figura 4) (Gómez et al., 1991 en Lagos Burbano et al., 2019).

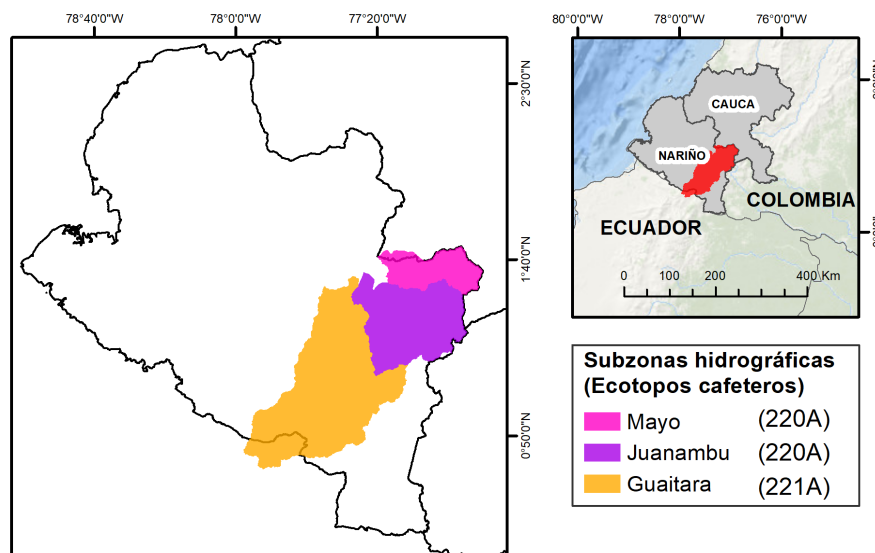


Figura 4. Ecotopos 220A y 221A, áreas agroecológicas cafeteras de Nariño. Fuente: Mapa realizado por autor en ArcMap 10.8.

3.2.5 El café como un sistema de producción agrícola

Al mirar lo que ocurre en la finca cafetera como un problema del “mundo real”, es muy útil adoptar la mirada multidisciplinaria al problema que aporta la Teoría de Sistemas, pues toma en cuenta el conjunto de factores que intervienen en el proceso de producción de la finca como los componentes de un sistema complejo y dinámico, un sistema de producción agrícola (Moreno, 2007). Este sistema está enfocado hacia la productividad y rentabilidad bajo unos objetivos propuestos que adaptan y modifican los tomadores de decisiones (Arcila et al., 2007).

Al entender la estructura y función de la serie de conceptos que componen el sistema de producción agrícola (sistema, ecosistema, agroecosistema y sistema de producción) y describir las relaciones de sus componentes, se garantizará su efectividad y sostenibilidad (Arcila et al., 2007).

3.2.6 El café en Colombia, contexto geográfico y económico

La zona cafetera colombiana, se extiende desde la Sierra Nevada de Santa Marta en el Norte del país, hasta Nariño en el Sur y se encuentra ubicada entre 1° y 11° de latitud Norte, sobre la cordillera de los Andes, presenta variaciones de altitud de los 1.000 hasta los 2.200 msnm. Debido a sus características físicas, esta zona presenta combinaciones de pendientes, características predominantes de los suelos, horas de brillo solar, períodos húmedos, períodos secos y temperaturas, algunos factores que inciden en el crecimiento y desarrollo de los cafetales (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020).

En el territorio nacional se pueden clasificar zonas productoras con base a las áreas para producción del café que guardan homogeneidad en cuanto a características de suelos, clima y relieve, las cuales se conocen como ecotopos (Arcila et al., 2007), y se pueden enunciar como: zonas productoras Norte y Oriente (ubicada por encima de los 7° de latitud Norte), Centro Norte y Centro Sur (entre los 3° y 7° de latitud Norte) y zona cafetera Sur de Colombia (en latitudes inferiores a los 3° de latitud Norte) (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020).

El cultivo de café está presente en 23 departamentos del territorio nacional y cuenta con más de 540 mil familias caficultoras que representan alrededor de 1,5 millones de personas. Además, la participación en el PIB nacional en 2020 fue de 0,9%, mientras que en el PIB agropecuario fue del 11%. En 2019 la producción llegó a 14,8 millones de sacos de café (la más alta en los últimos 25 años) y se evidenció un incremento del 78% en la producción (2009-2019) (tabla 2) (Dane, 2020).

La caficultura está basada en su gran mayoría en productores pequeños de menos de dos hectáreas de plantación (1,68 ha promedio) (Federación Nacional de Cafeteros et al., 2017), que generalmente viven en la misma finca donde cultivan el café (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020)

Tabla 2. Cifras a nivel nacional del café

Departamentos cafeteros (2019)	23
Número de caficultores (2019)	547.295
Producción (millones de sacos 60 kg) (2019)*	14,8
Incremento de rendimiento últimos 10 años (2020) (%)	78
Exportaciones (2019) (ton)	790.753
Crecimiento exportaciones últimos 10 años (2020) (%)	82,2
PIB nacional / agropecuario (2020) (%)	0,9/11

Fuente: adaptado de *Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales (2020)*

3.3 ESTUDIOS ANTECEDENTES

A nivel nacional, los estudios relacionados con la sequía inician con lo realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), analizando espacio-temporalmente la sequía (meteorológica) desde 1971, con la evaluación de su intensidad y recurrencia (Hurtado & Mayorga, 2006), donde se diferencia además la sequía meteorológica (lluvias inferiores a las climatológicas normales) -usando el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)- de la agrícola (deficiencias de agua en la capa agrícola de suelo, usando índice de PALMER), estudiando el área de incidencia por regiones geográficas (Hurtado, 2012; Gómez & Cadena, 2017). En el uso de índices, Loaiza et al. (2015, 2016) emplearon el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para cuantificar el déficit de precipitación en una amplia variedad de escalas de tiempo entre 1982-2011 para la cuenca del Río Dagua, así como Vega (2019) con el SPI y el Índice de agua per-cápita (WCI) para la macrocuenca del Río Magdalena (1980-2010), o Triana (2021) usando además del SPI el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) y su correlación e interpolación de sus resultados para determinar las zonas más secas del departamento de Nariño. Por su parte, Ocampo (2022) estudió la sequía (meteorológica) en el suroccidente colombiano analizando la sequía a través del SPI utilizando información de estaciones in situ y satelital-CHIRPS, regionalizando espacialmente los resultados por características homogéneas y analizando la correlación entre SPI y variables macroclimáticas en Nariño (Ocampo, 2022). Mera (2023) por su parte estudió la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río Patía mediante análisis de variabilidad de precipitación mensual y caudal medio mensual, utilizando el SPI e Índice de Sequía de Caudales Fluviales SDI.

En cuanto a la gestión de la sequía (Tabla 3), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2006) aborda la gestión de riesgos enfocada a la sequía mediante índices y sistemas de alerta temprana (SAT). La United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNODRR) & IDEAM (2018) y Fuganti et al. (2020) por su parte, abordan la gestión desde un enfoque institucional estableciendo estrategias y guías a nivel gubernamental para la gestión integral de riesgo desarrollando planes de alerta y acción temprana ante sequía agrícola en el territorio nacional (UNODRR & IDEAM, 2018) y a escala global (Fuganti et al., 2020).

También se han realizado investigaciones para indagar sobre el grado de afectación del café debido a la sequía agrícola impulsada por la variabilidad climática (eventos extremos ENOS) usando registros de lluvia, descargas de ríos, humedad del suelo e índices asociados (Tabla 3). Domínguez & Lozano (2014) estudiaron las anomalías de humedad del suelo dependiendo del tipo de cobertura (Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada - NDVI), magnificadas por ENOS, mostrando muy bajos valores durante El Niño (principalmente durante las estaciones secas), y valores de saturación durante La Niña. Poveda et al. (2001) estudiaron la variabilidad temporal de la humedad volumétrica promedio del suelo de 10 días en los Andes tropicales del centro de Colombia en profundidades de 20 y 40 cm en áreas cafeteras caracterizadas por vegetación de sombra, bosque y café soleado con análisis espectrales y de correlación cruzada entre índices climáticos del Océano Pacífico tropical, el ciclo anual de la hidrología colombiana

(precipitación, caudales fluviales, la humedad del suelo) y el NDVI. Camayo et al. (2003) determinaron la frecuencia relativa del cambio semanal de un estado a otro durante el desarrollo de nudos y botones florales para relacionar las diferentes etapas del desarrollo floral de *Coffea arabica* y algunas variables climáticas como el índice de humedad en el suelo, temperatura mínima y el brillo solar, en Chinchiná, Caldas, zona cafetera central de Colombia. Cisneros et al. (2015) investigaron la evapotranspiración (ETc) y los coeficientes únicos de cultivo (Kc) por fases de desarrollo del cafeto Caturra Rojo de 12 años de edad, regado con un sistema de riego localizado superficial, encontrando que la mayor demanda de agua se produce en la fase floración-fructificación. Conclusión similar a la de González et al. (2017), quienes estudiaron el factor de sensibilidad (Ky) del cafeto sometido a déficit hídrico en diferentes estadios fenológicos, utilizando el concepto del balance hídrico, hallando que la reducción relativa del rendimiento fue más acentuada también en la fase de fructificación-desarrollo del fruto.

Finalmente se cuenta con la evaluación de la metodología del Cenirrómetro (desarrollada por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia-Cenicaña) como una alternativa de programación del riego en el cultivo de cacao desarrollada por Gavilánez & Farias (2019). La cual se comparó con una programación a partir del tanque de evaporación clase A y tensiómetros, y se tiene como una metodología con potencial para monitoreo artesanal de sequía agrícola para el cultivo de plantas C3 como el café.

3.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.4.1 Índices de Sequía

Las sequías se monitorean mediante indicadores específicos (Beguería et al., 2014), normalmente derivados de variables hidroclimáticas como la precipitación, balance hídrico climático, humedad del suelo, caudal de los arroyos y nivel de aguas subterráneas, o de impactos, como el estrés hídrico en las plantas (European Drought Observatory, 2022). Éstos índices permiten estimar la magnitud de la sequía, la cual suele determinarse en términos de la desviación respecto de las pautas normales de los parámetros climáticos anteriormente mencionados durante un período definido (Organización Meteorológica Mundial, 2006; UNODRR, 2021) No obstante, estos índices también son útiles para el pronóstico del clima (Dutra et al., 2014; Sheffield et al., 2014), estudio de CC (Trenberth et al., 2014; Dai et al., 2018) y como datos para el modelado del impacto (Zampieri et al., 2017) y evaluaciones de riesgo (Svoboda et al., 2015) asociado a la sequía.

Debido a las diferentes etapas de sequía, se emplean diferentes índices e indicadores para su caracterización. Algunos de ellos se presentan en la Figura 5.

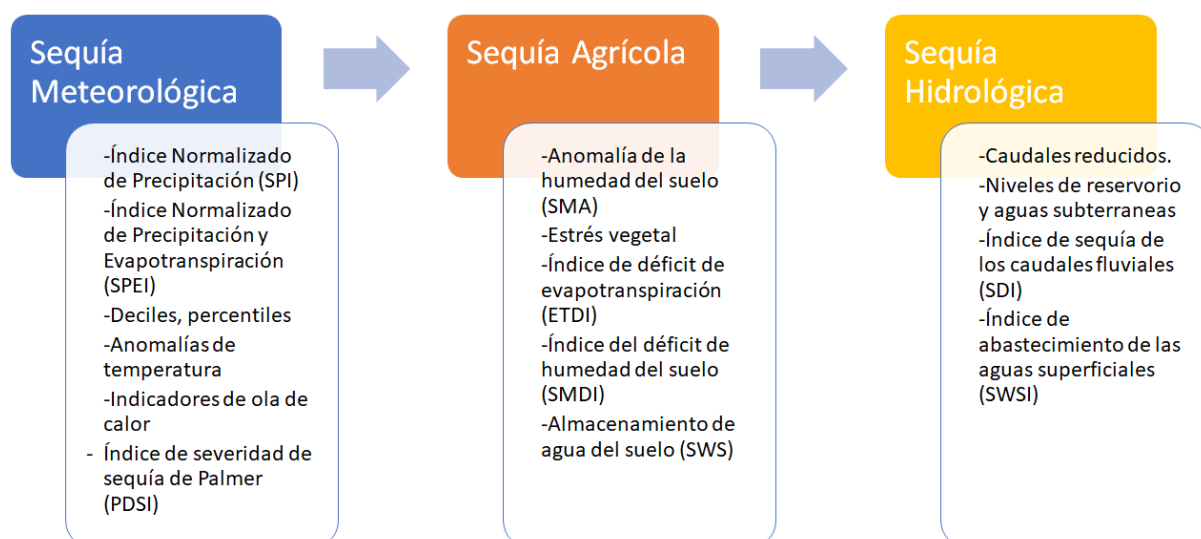


Figura 5. Esquema de la propagación de la sequía a través del ciclo hidrológico asociado a indicadores clave. Fuente: adaptado de Organización Meteorológica Mundial (2006); Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua (2016); JRC Global Drought Observatory, (2021); UNODRR (2021)

Sequía agrícola en café

Para analizar la sequía agrícola en el cultivo de café a libre exposición solar, algunos autores como Pereira et al. (2007) han empleado un enfoque de modelo micro-agrometeorológico para estimar las variaciones de humedad del suelo integrando una serie de factores hidrológicos como el movimiento del agua en el suelo, la hidrología dentro del cultivo, edáficos como las características fisiológicas del cultivo y atmosféricos como la lluvia y evapotranspiración (Ramírez et al., 2010b). Se han desarrollado así índices hídricos como el índice de evaporación relativa o de déficit hídrico (IDH), el cual mide la magnitud del estrés hídrico en un cultivo, y el índice de humedad del suelo (IHS), que determina los niveles críticos de déficit y exceso hídrico para el cultivo de café (Ramírez et al., 2010a).

3.4.2 Cenirrómetro

En la búsqueda de información que sirva de insumo para el estudio de la sequía en el cultivo de café, cabe resaltar la metodología propuesta por Torres et al. (2004), quienes desarrollaron el Cenirrómetro, una herramienta artesanal que funciona como indicador visual para la programación de riego en la caña de azúcar. Aunque inicialmente desarrollada para el estudio de las necesidades hídricas de la caña de los ingenios en el Valle del Cauca, Gavilánez & Farias (2019) lograron adaptar la metodología del estudio de las necesidades hídricas de la caña por medio del Cenirrómetro como alternativa de programación de riego por aspersión en el cultivo de cacao, una planta C3 como el café. Por esta razón se seleccionó éste método como un precedente a tener en cuenta en el sistema de monitoreo de la sequía agrícola.

El tanque Cenirrómetro, es una herramienta diseñada por CENICAÑA para programar los riegos en el cultivo de la caña de azúcar que funciona simultáneamente como pluviómetro y evaporímetro mediante el cual se simula los cambios de humedad ocurridos en el suelo. Éste sistema integra visualmente diferentes parámetros del balance hídrico y se fundamenta en la idea del suelo como un reservorio de agua para las plantas (Torres & Cruz, 1995).

Este método involucra también el consumo de agua de la caña por medio de un factor K y la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo. El factor K se usa para convertir la evaporación medida en un tanque Clase A en evapotranspiración actual (cantidad de agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo más la transpiración desde las hojas de las plantas) (Torres & Cruz, 1995).

El Cenirrómetro tiene definida una capacidad de almacenamiento de agua rápidamente aprovechable (LARA), por medio de un orificio (vertedero) que drena el exceso de agua que en condiciones naturales no sería almacenada por el suelo, y dos marcas de referencia (EVC1 y EVC2) que se establecen de acuerdo a la tasa de consumo de agua de la planta según su ciclo fenológico. El riego se programa cuando el nivel del agua se aproxima a una de las marcas de referencia (Figura 6). Cuando la planta de caña se encuentra en una etapa fenológica de mayor consumo de agua, el agua aprovechable por la planta se agota más rápido y no se debe permitir que la marca del nivel de agua del Cenirrómetro descienda de la marca superior (EVC2). El caso contrario sucede con la marca inferior EVC1, en la que el agua aprovechable por la planta tiene una mayor tasa de aprovechamiento (Torres & Cruz, 1995).

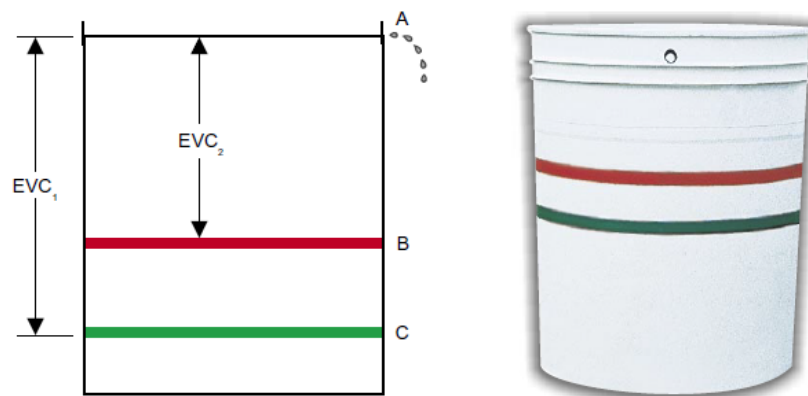


Figura 6. Esquema del Cenirrómetro. Fuente: Torres et al. (2004)

3.4.3 LARA

El concepto de lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) propone un manejo del suelo como un depósito temporal de agua que posteriormente utilizan las plantas (Figura 7) (Torres et al., 2004). Después de una precipitación significativa, todos los poros (macro y micro) en el suelo están llenos de agua, momento en que el suelo se encuentra en estado de saturación, donde las fuerzas de retención son nulas y el valor de potencial mátrico es igual a cero. Acto seguido por medio de las fuerzas de gravedad el agua comienza a drenarse, saliendo de los macroporos alcanzando el valor de humedad conocido como capacidad de campo (Cc) a los dos días después de la precipitación que llevó a saturación del suelo, donde ha cesado el flujo de agua gravitacional. En este punto se tiene un potencial mátrico que oscila entre -10 y -33 kilopascales (-0,10 a -0,33 bar) dependiendo de la textura del suelo. El valor de capacidad de campo es considerado como el límite superior de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (Torres et al., 2004).

A medida que las plantas consumen la humedad del suelo, el agua se va confinando en los poros más pequeños. Sin embargo existe un límite inferior de almacenamiento conocido con el nombre de punto de marchitamiento permanente (PMP) donde las plantas no pueden tomar suficiente humedad y se marchitan, este contenido de humedad está asociado con un potencial mátrico de -1500 kPa (-15 bars). El contenido de humedad del suelo es un valor muy útil para determinar el estado de déficit hídrico en el suelo que afecta directamente el desarrollo fenológico de las plantas (Torres et al., 2004). Con contenidos de humedad cercanos a la Cc el agua es tomada fácilmente y la planta puede transpirar a su capacidad potencial; mientras que en la medida que el agua aprovechable en el suelo se reduce, el agua es retenida con mayor fuerza y las plantas deben realizar un esfuerzo mayor para extraerla.

La disponibilidad de humedad para las plantas se puede asociar con el concepto de agua aprovechable (AA), el cual define la cantidad de agua retenida por el suelo en un rango entre Cc y PMP. Dentro de este rango de disponibilidad de humedad existe un punto crítico a partir del cual la tasa de crecimiento de los tallos se afecta por estrés hídrico (Allen et al., 2006), identificado como el nivel crítico de humedad (NH). Se debe definir el punto de referencia o porcentaje de agua aprovechable consumida para establecer el NCH. El agua almacenada por el suelo entre la Cc y el NH se conoce como el agua rápidamente aprovechable (ARA), que en términos de lámina de agua se conoce como LARA (Torres et al., 2004).

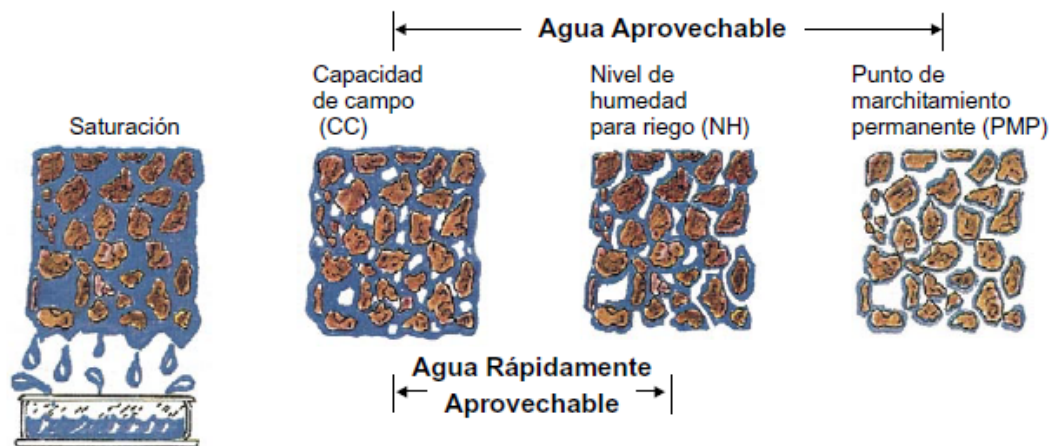


Figura 7. Dinámica del agua en el suelo: Agua rápidamente aprovechable. Fuente: Torres et al. (2004)

3.4.4 Evapotranspiración

El consumo diario de agua de una planta es conocido también como evapotranspiración o uso consuntivo y corresponde al proceso combinado del agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo y la absorbida por las raíces, que posteriormente se pierde casi en su totalidad por transpiración a través de la superficie de las hojas (Torres et al., 2004).

La evapotranspiración es afectada por factores del suelo, la planta y el clima. Cuando el contenido de humedad del suelo es alto, las plantas pueden transpirar a su máxima capacidad, en ese momento la evapotranspiración obtenida se conoce como

evapotranspiración potencial o de referencia (Eto). Se han registrado valores máximos de Etp de 3.7 mm/día en Colombia (Torres et al., 2004). En las condiciones de campo de los cultivos comerciales la humedad del suelo es variable y puede bajar hasta niveles intermedios entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. En esos casos la planta evapotranspira a una tasa inferior a la potencial, la cual es conocida como evapotranspiración actual (ETc) y se utiliza para asignar los requerimientos de agua de las plantas (Torres et al., 2004).

En los suelos de textura fina y en condiciones húmedas la evaporación desde la superficie del suelo puede ser alta antes del cierre del cultivo. Posteriormente, cuando hay 100% de cobertura vegetal la evaporación desde el suelo es mínima y el cultivo pierde agua esencialmente por transpiración (Torres et al., 2004).

4. METODOLOGÍA

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

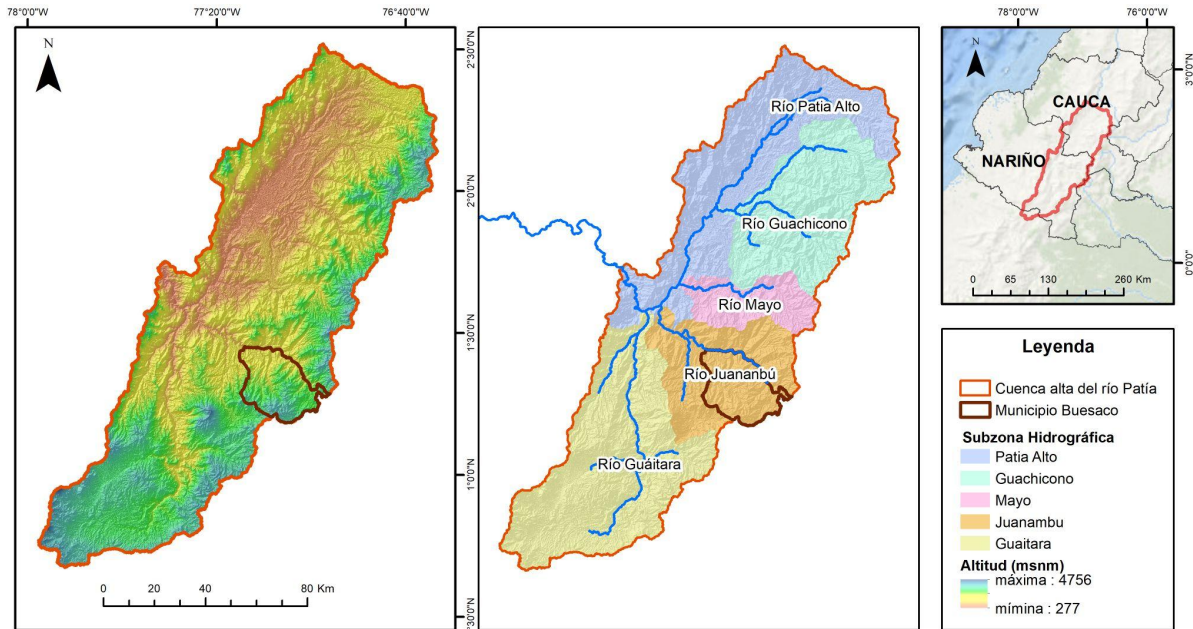


Figura 8. Ubicación geográfica zona de estudio. Fuente: Mapa realizado por autor en ArcMap 10.8

La zona de estudio se localiza en Colombia, en la región Andina del departamento de Nariño. La región Andina del departamento de Nariño abarca el 40% de la superficie departamental, caracterizada por un relieve accidentado con variedad de pisos térmicos y microclimas (Gobernación de Nariño, 2020). El 90% de la región Andina Nariñense drena las aguas al río Patía, un río con un caudal promedio de 1.453 m³/s (Velasquez & Poveda, 2019), posicionándolo como uno de los ríos más caudalosos de Colombia. La región Andina del departamento de Nariño fue identificada como región climática (Canchala et al., 2020a, 2020b).

Situado al noreste de San Juan de Pasto, capital del departamento de Nariño, el municipio de Buesaco limita por el norte con los municipios de San Lorenzo, Arboleda, y San José de Albán y El Tablón, por el oriente con el municipio de El Tablón de Gómez y el departamento de Putumayo (San Francisco), por el sur con los municipios de Pasto, Colón y Sibundoy (estos dos últimos municipios de Putumayo)- serranía del Bordoncillo, y al occidente con los municipios de Chachagüí y Pasto (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015). Este municipio tiene una extensión total de 682 km² (aproximadamente 62.320 ha) distribuidas en siete (7) corregimientos y setenta y tres (73) veredas, lo cual le da una característica eminentemente rural (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018). Posee una altitud en la cabecera municipal de 1.959 m.s.n.m. y una temperatura promedio de 20°C (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015).

El municipio de Buesaco (Figura 8) por su parte se encuentra en un lugar ecológicamente estratégico pues cuenta con uno de los más importantes páramos del Macizo Colombiano, el “Páramo de Bordoncillo”, el cual forma parte del corredor Andino- Amazónico donde nace

entre otros, el río Juanambú, que cumple la función natural de límite fronterizo norte del municipio (Alcaldía municipal de Buesaco, 2015). Se caracteriza por una riqueza de la red hídrica dispuesta a lo largo y ancho del territorio, cuyas corrientes como los ríos Buesaquillo, Juanambú, Liagar y Pajajoy tributan sus aguas a cuatro redes principales de drenaje que conforman las subcuencas de los ríos Alto Juanambú, Ijagúí, Buesaquito y Bajo Juanambú, lo que permite una alta variedad de ecosistemas y por lo tanto, diversidad de especies biológicas, representadas en la fauna y flora silvestre (Alcaldía Municipal de Buesaco, 2015). La mayoría de su territorio es montañoso con algunas zonas planas. Los principales accidentes orográficos son los cerros de Bordoncillo y Morasurco; donde se encuentran pisos térmicos templados, fríos y de páramo (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018; Arteaga & Burbano, 2018).

4.2 ESQUEMA METODOLÓGICO

A continuación se presenta el esquema metodológico (Figura 9) que resume la estructura lógica de los resultados obtenidos en esta investigación partiendo de los objetivos específicos de la misma, los cuales se detallan de manera individual (apartados 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3) en esta sección.

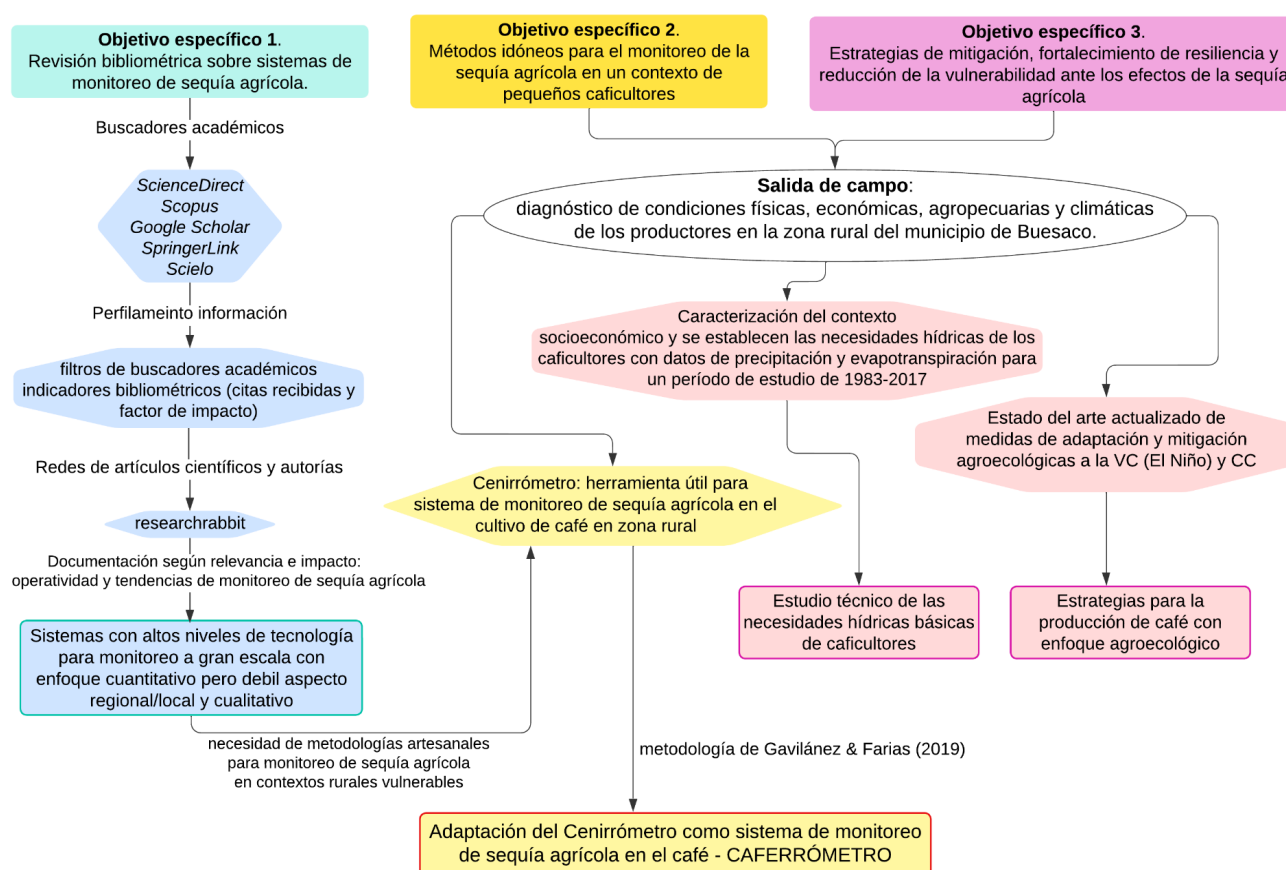


Figura 9. Esquema metodológico. Fuente: Mapa realizado por autor.

Se plantea la metodología dividida y especificada de acuerdo a cada uno de los objetivos específicos de este trabajo anteriormente especificados.

4.2.1 Revisión bibliométrica sobre sistemas de monitoreo de sequía agrícola

Se evaluó la información obtenida en la búsqueda bibliográfica para objetivizar, comparar y medir la calidad de la documentación disponible (Gauthier, 1998; Dávila et al., 2009).

Gestión de la información

En un inicio, haciendo uso de buscadores académicos especializados como ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, SpringerLink y Scielo se recopiló información empleando el motor de búsqueda de Google. El algoritmo de búsqueda consistió en funciones booleanas de combinaciones de palabras clave como: “monitoreo”, “sequía agrícola”, “riego”, “suelo”, “nivel de humedad”, “humedad del suelo”, “estrés hídrico”, “deficiencia hídrica”, “lámina de agua”, “evapotranspiración”, “precipitación”, “índices” en español e inglés. Una vez realizada la búsqueda general, se perfiló parcialmente la documentación obtenida modificando la serie de filtros que disponen los portales académicos mencionados como el área temática (ciencia: ambiental, de la Tierra, agrícola y biológica, de toma de decisión, ingenieril, computacional, social y multidisciplinaria), tipo de documento (artículo, revisión, libro, capítulo de libro, artículo de conferencia), y tipo de fuente (revistas indexadas asociadas) con el objetivo de reducir y especificar la cantidad de información encontrada.

Teniendo en cuenta indicadores bibliométricos como las citas recibidas y factor de impacto (Tabla 3) (FWCI por sus siglas en inglés) (Dávila et al., 2009; Ardanuy, 2012; Biblioteca Universitaria Universidad de Málaga, 2023) se continuó filtrando la documentación obtenida en las bases de datos académicas, completando la búsqueda de información usando plataformas de investigación como researchrabbit (Research Rabbit, 2023), que permite la visualización de redes de artículos científicos y autorías. Con estos indicadores y herramientas se exploró la documentación relacionada relevante con rigor científico y académico de forma eficiente, revisando el impacto de la información y los niveles de participación de la comunidad en torno a la misma.

Tabla 3. Indicadores bibliométricos empleados.

Indicador	Descripción
Citas recibidas	Número de veces que el documento ha sido citado por otros autores
Factor de impacto	Detalla la relación entre las citas del documento y el número promedio de citas recibidas por todos los documentos similares durante un período de tres años.

Fuente: ELSEVIER (2023)

Para la selección de la información se empleó un enfoque de lo general a lo particular, empezando por los sistemas de vigilancia de la sequía más representativos a nivel internacional hasta llegar al nivel local, depurando los datos usando como criterio la aplicabilidad de los sistemas de monitoreo de la sequía encontrados en el cultivo de café en zona andina. Se tuvo en cuenta aspectos clave como la escala de los estudios: macro (estudio de la producción científica de un país o ciudad), meso (instituciones o grupos investigativos) o micro (investigadores o revistas específicas); y la localización de los estudios, pues se buscó que los países en los que se desarrollaron las investigaciones tuvieran similitudes con la zona andina en donde se realiza la investigación de este proyecto (Dávila et al., 2009).

4.2.2 Planteamiento de métodos idóneos para el monitoreo de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores

En el marco de la *CONVOCATORIA JÓVENES INVESTIGADORES 907 de 2021 desde el* Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA) perteneciente a la Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle se estableció el proyecto *ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN EN SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS DE NARIÑO*. En éste se trazó un plan de trabajo para 2 Jóvenes Investigadores del grupo IREHISA, 2 profesores y 3 estudiantes de pregrado junto con investigadores de la Universidad de Nariño, quienes cuentan con antecedentes de investigación en la zona de estudio en las que establecieron un relacionamiento con la comunidad campesina de Buesaco. En el plan de trabajo establecido se realizaron 2 visitas a la zona de estudio, zona rural de Buesaco-Nariño, cada una de 3 días en campo con todo el equipo de trabajo, en octubre de 2022 y junio de 2023 respectivamente.

En cada una de las salidas de campo en el plan de trabajo anteriormente indicado, se recolectó información de tipo cualitativo mediante la observación participativa (actitud de alerta o vigilancia durante una investigación con comunidad, donde se busca captar datos al participar en conjunto de las actividades con la misma) (CIMAS, 2009; Acevedo et al., 2022), indagando y dialogando con la comunidad, donde se propendió por un lenguaje sencillo y dinámico que permitiera una comunicación horizontal eficaz y eficiente (CIMAS, 2009). En estas salidas se realizó un diagnóstico de las condiciones físicas, económicas y culturales del territorio con estrategias como la cartografía social (construcción grupal de mapas donde se detalló la mayor cantidad de elementos de referencia espacial del entorno de la comunidad), entrevistas individuales (a 5 productores) y grupal (aprox. a 30 productores) a un grupo focal (entrevista grupal dirigida por un moderador a través de una entrevista) (Anexo 1, Anexo 2) (Prieto & March, 2002; Acevedo et al., 2022) de campesinos de veredas aledañas como Veracruz, Pajajoy y Berjemal, lideradas por los integrantes del grupo de trabajo (Anexo 1, Anexo 2) (Acevedo et al., 2022).

De acuerdo al diagnóstico realizado (Figura 10), se confirmó la descripción encontrada en la literatura de las mismas, entre las cuales predomina la agricultura culturalmente tradicional y artesanal con limitada tecnología y escasa asistencia técnica (Alcaldía municipal municipio de Buesaco, 2015; Alcaldía municipal de Buesaco en Nariño, 2018). Con estas condiciones se buscó una metodología a pequeña escala, *in situ*, con rigurosidad en su aspecto cuantitativo, que se ajustara a las características del territorio y tuviera en cuenta la participación comunitaria en un sistema de monitoreo (López et al., 2017), que permitiera hacer un seguimiento en tiempo real del estado de humedad en el suelo para prevenir los efectos nocivos de la sequía en los cultivos de café en esta zona (Gobernación de Nariño, 2016, en Arteaga & Burbano, 2018).



Figura 10. Condiciones y características del territorio de Veracruz, Buesaco. Fuente: Imágenes captadas por autor.

Tales características se reúnen en el Cenirrómetro (Figura 11), recipiente plástico de 26 a 30 cm de diámetro y 35 a 40 cm de altura que sirve como herramienta artesanal tipo pluviómetro y evaporímetro, creado inicialmente como herramienta práctica y visual para la programación de riego en la caña de azúcar de los ingenios en el Valle del Cauca (Torres et al., 2004). Esta herramienta donde se integra la relación suelo-planta-atmósfera (Torres y Cruz, 1995), utiliza un principio en base al balance hídrico (entradas - salidas) (Figura 11) asumiendo el suelo como un reservorio de agua para las plantas, y permite estimar la necesidad hídrica de un cultivo (NHC) con la que se halla el nivel crítico de humedad (NCH), etapa o factor de agotamiento a partir del cual se verá afectado el desarrollo de la planta mediante un seguimiento diario o semanal de la condición del estado hídrico del suelo (Torres et al., 2004).



Figura 11. Cenirrómetro-Balance hídrico en sistema planta-suelo-clima.

Este método de medición del nivel de humedad en el suelo debió ser adaptado al cultivo de café (Caferrómetro), pues se diseñó e implementó inicialmente para la caña de azúcar. Gavilánez & Farias (2019) lograron adaptar la metodología del estudio de las necesidades hídricas de la caña por medio del Cenirrómetro como alternativa de programación del riego por aspersión en el cultivo de cacao, marcando un precedente en cuanto al proceso de calibración del Cenirrómetro como herramienta de estimación de la NHC para otros cultivos de tasa fotosintética C3 como el cacao y el café.

Siguiendo la hoja metodológica que Gaviláñez & Farias (2019) detallaron en el proceso de calibración del Cenirrómetro al cultivo de cacao, se desarrolló el Caferrómetro. Inicialmente se relacionan los conceptos de evapotranspiración del cultivo (referencia y real), convirtiendo la evapotranspiración del caferrómetro (EC) en evapotranspiración de referencia (ET_o) según el método del tanque evaporímetro Clase A (EA) (Ecuación 2-4) (el valor de 0,91 de la Ecuación 2 es un factor que convierte la evaporación del caferrómetro en evaporación equivalente del tanque Clase A) involucrando el coeficiente del tanque (K_{tan}) (Torres et al., 2004) (Ecuación 3), el cual se determinó con valores asumidos de acuerdo a los parámetros observados en campo: velocidad del viento, humedad relativa, tipo de cubierta alrededor del tanque y de la distancia del cultivo a barlovento (Tabla 6) propuestos por Allen et al. (2006). Mediante este método se convierte la evapotranspiración de referencia (ET_o) en evapotranspiración real (ET_c) involucrando las etapas fenológicas del café mediante el valor del coeficiente de cultivo “K_c” (Tabla 5 y Ecuación 4).

Tabla 5. *Coeficiente de cultivo K_c cultivo de café.*

Suelo sin cobertura	K _c inicial	0,90
	K _c medio	0,95
	K _c final	

Fuente: Allen et al. (2006)

Tabla 6. *Aspectos de coeficiente tanque evaporímetro (K_{tan}) para tanque Clase A.*

Velocidad media del viento (m/s)	2,2
Humedad relativa (%)	70,0
Distancia de cultivo a barlovento (m)	1,0
K_{tan}	0,6

Fuente: Allen et al. (2006)

$$EA = EC * 0,91 \quad (2)$$

$$ET_o = EA * K_{tan} \quad (3)$$

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (4)$$

Se realizó un análisis de suelo requerido para la elaboración del Caferrómetro, en el cual se tomaron 2 (dos) muestras en cilindros no disturbadas, destinadas para el cálculo de la Da y la humedad del suelo a Cc (0,3 bar), y 3 (tres) muestras disturbadas para determinar la humedad del suelo hasta el PMP (3, 8 y finalmente a 15 bar). Estas muestras se tomaron de la finca del líder caficultor Guillermo Valencia en la vereda Veracruz-Buesaco, Nariño. Las 3 muestras disturbadas se usaron posteriormente para determinar la textura del suelo en la finca para la elaboración del *Estudio técnico de las necesidades hídricas básicas de*

caficultores (Tabla 8). Considerando los contenidos de humedad gravimétrica (W) (Ecuación 5) para diferentes estados de las muestras de suelo, esto es la capacidad de almacenamiento de agua definida por sus constantes hídricas Cc^1 y PMP^2 , se determinó la LARA (Ecuación 6), incorporando además factores como el NCH del cultivo (factor de agotamiento por la evapotranspiración) de café, sistema radicular de las plantas (Zr-profundidad radicular) del café (Tabla 7) (Monzoli et al., 2015) y las características físicas del suelo de la zona como la densidad aparente (Da) (Gavilánez & Farias, 2019). Una vez se estableció la LARA, ésta se relacionó con la evapotranspiración del cultivo (igualando las ecuaciones 4 y 6 y despejando en función de EC), con lo que se definió las marcas de referencia en el recipiente plástico (Caferrómetro) (Ecuación 7), a partir de las cuales se establecen los volúmenes de agua asociados al monitoreo del estado de humedad del suelo del cultivo representados por las distancias entre el orificio vertedero de excesos y las marcas anteriormente mencionadas.

$$W = \frac{\text{masa del agua de la muestra}}{\text{masa de los sólidos de la muestra}} \quad (5)$$

Tabla 7. Factores de LARA del café.

Profundidad radicular café (cm)	30
NCH café (%)	40

Fuente: Allen et al. (2006), Monzoli et al. (2015)

$$LARA = \frac{NCH*(CC-PMP)*Da*Zr}{100} \quad (6)$$

$$EC = \frac{NCH*(CC-PMP)*Da*Zr}{91*Ktan*Kc} \quad (7)$$

Las constantes hídricas y propiedades físicas del suelo se midieron de forma directa en las instalaciones del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Universidad del Valle-sede Melendez a partir de datos recolectados en campo (muestreo de suelos) (Figura 12) con 2 cilindros de aluminio de 5cm de alto por 5cm de diámetro. A partir de las muestras de suelo (sin disturbar) tomadas hasta una profundidad de 30cm, se determinó la curva de retención de humedad del suelo (THS) haciendo uso del equipo de membrana de humedad (Anexo 3), la textura (muestras de suelo disturbado) usando el método de Bouyoucos (LASA, 2015) (Anexo 4) y la densidad aparente (Ecuación 9) teniendo en cuenta el volumen del cilindro (Ecuación 8) usando el horno y una balanza electrónica para obtener los valores de cada peso (Anexo 5).

¹ Se determinó la Cc usando las mismas dos muestras no disturbadas para el análisis de la Da, las cuales se tomaron en dos puntos del cafetal de la finca. Esto debido a que la Cc es el contenido de humedad del suelo bien drenado luego de estar en saturación (Torres et al., 2004)

² Se determinó el PMP del promedio de tres muestras iniciales diferentes a las de Cc disturbadas tomadas en campo.



Figura 12. Muestreo de suelos en finca de caficultor. Fuente: Imágenes captadas por autor.

$$V_{cilindro} = base * altura$$

$$V_{cilindro} = \left(\pi * \left(\frac{diámetro}{2} \right)^2 \right) * altura \quad (8)$$

$$D_{aparente} = \frac{peso\ suelo\ seco}{V_{cilindro}} \quad (9)$$

Como insumo adicional para la adaptación del Cenirrómetro al cultivo de café, se cuenta con el estudio del factor de sensibilidad (K_y) del cafeto sometido a déficit hídrico en diferentes estadios fenológicos realizado por González et al. (2017). En sus resultados hallaron que la reducción relativa del rendimiento del café es más acentuada en la fase de fructificación-desarrollo del fruto ($K_y=0,58$, en contraste con $K_y=0,52$ de las otras fases) comprobando una relación entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración de la planta. Se consideró estas etapas fenológicas para establecer las marcas del sistema de monitoreo a diseñar.

4.2.3 Estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante los efectos de la sequía agrícola

Con base al diagnóstico realizado en la zona rural de Buesaco, Nariño (Acevedo et al., 2022, 2023), se tuvo un panorama real sobre las condiciones de los caficultores en la zona (Figura 13), donde se evidenció una vulnerabilidad de los caficultores de la zona debido a la dependencia de la agricultura tradicional de las condiciones climáticas (agricultura de secano) sujetas a su vez a los eventos extremos asociados al CC, que agravan las condiciones climáticas de aridez de la zona (Gobernación de Nariño, 2016, en Arteaga & Burbano, 2018).



Figura 13. Condiciones caficultores Veracruz, Buesaco. Fuente: Imágenes captadas por autor.

En este contexto se propusieron dos tipos de estrategias (Tabla 8), estudio técnico para la reducción de la vulnerabilidad y fortalecimiento de la resiliencia ante efectos de la sequía agrícola para los caficultores de la zona, donde se caracterizó el contexto agrícola y socioeconómico y se establecieron las necesidades hídricas de los caficultores de la zona rural de Buesaco, a partir de datos de precipitación y evapotranspiración mensual multianual de la estación meteorológica de Buesaco tomados del portal web dhime del IDEAM para un período de estudio de 1983-2017 (35 años); y unas prácticas para la producción de café con enfoque agroecológico para la mitigación y adaptación ante efectos adversos asociados a la fase climática extrema El Niño (evento precursor de la sequía agrícola), debido al potencial de la agroecología para responder a los impactos de la VC y CC fortaleciendo la sostenibilidad y resiliencia de los cultivos (Altieri & Nicholls, 2017).

Tabla 8. Tipos de estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante efectos de sequía agrícola

Estrategia	Enfoque
Estudio técnico de las necesidades hídricas básicas de caficultores	Reducción de la vulnerabilidad y fortalecimiento de la resiliencia ante efectos de la sequía agrícola
Prácticas para la producción de café con enfoque agroecológico	Mitigación y adaptación ante efectos adversos asociados a la fase climática extrema cálida de ENOS.

En el estudio técnico se caracterizaron y se resaltaron las potencialidades del contexto agrícola y socioeconómico de acuerdo a lo evidenciado en las salidas de campo e información institucional y se estableció las necesidades hídricas básicas de los caficultores (NHBC) de la zona rural de Buesaco para un período de estudio de 1983-2017. Brindando a esta comunidad información específica sobre la demanda y oferta del recurso hídrico para el cultivo de café en el municipio de Buesaco, llegando al cálculo del caudal total bruto necesario para un cultivo en un predio de 1,7 ha de un líder caficultor (donde se tomaron las muestras de suelo para el caferrómetro) de la vereda Veracruz.

Las NHBC se estimaron considerando que las condiciones tropicales de la región cafetera de Colombia, los ciclos de crecimiento, floración y cosecha del café están enlazados por la disponibilidad de agua en el suelo, la cual se determinó mediante un sistema de contabilidad de entradas y salidas (balance hídrico). Éste sistema tiene en cuenta factores como la lluvia (precipitación y precipitación efectiva al 50% de probabilidad de excedencia), la evapotranspiración (ETo y ETc al 75% de excedencia), las características del suelo y el tipo de cultivo (coeficiente de cultivo " Kc ") y en base a los mismos permitió determinar los excesos y las deficiencias de agua de la región (Pulgarín & Robledo, 2003). Según el Kc de café (0,90 para las fases iniciales de crecimiento vegetativo, floración y desarrollo normal y 0,95 para el crecimiento y desarrollo del fruto) (Tabla 5), el cual incorpora los efectos de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, y tomando en cuenta las características físicas de la zona (cultivo sin cobertura) se estimó la ETc mensual multianual de café (Allen et al., 2006) para la zona rural de Buesaco (Anexo 6).

Con esta información y con una modificación de la metodología del balance hídrico (egresos-ingresos) se halló la necesidad de riego neta (NRn) (Anexo 6), la cual es la diferencia entre la evapotranspiración real del café (demanda hídrica) y la precipitación efectiva (oferta hídrica) por lo que los valores negativos indican una mayor oferta hídrica, en este caso representada por la precipitación efectiva. Finalmente se calculó el caudal de flujo continuo neto ($Qnfc$) y total ($Qpfc$) (sin tener en cuenta las eficiencias del posible sistema de riego y considerando las eficiencias respectivamente) para la zona rural de Buesaco (Anexo 6).

Para la zona también se realiza un caso de estudio puntual de las necesidades hídricas de café en la finca de Guillermo Valencia, líder caficultor reconocido por la comunidad, de 1,7 ha de café ubicada en la vereda Veracruz. Se consideró para este caso la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), la cual representa la cantidad de agua retenida en el suelo en el rango entre CC y PMP (anteriormente descritos) (Torres et al., 2004), para éste cálculo se usó también la información de densidad aparente del suelo (Da) de la finca, la profundidad efectiva de raíces (P) (Monzoli et al. 2015) y el factor de agotamiento de la LARA (f) para el café (Allen et al., 2006) (Figura 7). Con éste dato se calculó además la frecuencia necesaria del posible sistema de riego en días (FR). El valor de la frecuencia se redondeó por defecto (si es 8,4 días quedó en 8,0 días) y se calculó dividiendo la LARA entre la ETc , con lo cual corrigió también el valor de la LARA teniendo en cuenta los valores redondeados de la FR .

Las prácticas para la producción de café con enfoque agroecológico propuestas se consolidaron a partir de una revisión bibliográfica académica e institucional detallada y específica, teniendo en cuenta como temáticas clave en la búsqueda de información la prevención y mitigación como medidas de reducción del riesgo asociado a los perjuicios y pérdidas en agricultura y los principios agroecológicos (FAO, 2018), que permitieran construir un compendio de estrategias prácticas ante los efectos de la VC y CC asociados a la sequía agrícola en el cultivo de café en zona andina.

Se evaluó la información usando criterios secuenciales que consideran aspectos técnicos, socio-culturales y ambientales de la zona de estudio con los que se compuso una rúbrica de

evaluación³ (Anexo 8) (Turbay et al., 2015), la cual se usó como guía para escudriñar las propuestas a nivel nacional hasta llegar a un nivel local. Las estrategias encontradas fueron entonces sometidas a un filtro ordenado según la rúbrica, en el que se estimaba si la metodología del documento cumplía cada criterio en orden descendente. Cuando la estrategia encontrada incumplía con algún criterio se descartó.

³ Herramienta construida con base en las estrategias sociales y económicas para afrontar la VC de caficultores colombianos según los hallazgos de Turbay et al. (2015)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de acuerdo a cada objetivo específico.

5.1 REVISIÓN BIBLIOMÉTRICA SOBRE SISTEMAS DE MONITOREO DE SEQUÍA AGRÍCOLA

Uno de los primeros resultados que resaltan en la realización de búsqueda de información es la abundante información que se encuentra disponible sobre el monitoreo de la sequía a nivel nacional (Hurtado & Mayorga, 2006; Hurtado, 2012; Domínguez & Lozano, 2014; Gómez & Cadena, 2017; López et al., 2017; UNGRD, 2017; UNODRR & IDEAM, 2018) e internacional (Organización Meteorológica Mundial, 2006; United Nations, 2022; Domínguez & Lozano, 2014; Fuganti et al., 2020; Li et al., 2020) en contraste con la poca información de los estudios de la evaluación de estado hídrico de los suelos, específicamente con el cultivo de café en Colombia (Ramírez et al., 2010a; Ramírez et al., 2010b). Sin embargo, estudios a nivel nacional sobre monitoreo de sequía agrícola no se encontraron.

Así pues se evaluó la documentación encontrada haciendo una búsqueda bibliométrica, valorando los productos de la actividad científica recopilada (López, 1972; Spinak, 1996; Solano et al., 2009) a nivel internacional sobre monitoreo de sequía agrícola (38 artículos). Se presentan los resultados (Tabla 9) primero destacando documentos relevantes que sentaron las bases y sirvieron de insumo (Documentación insumos) a estudios posteriores sobre el monitoreo o seguimiento de la sequía agrícola (Documentación productos).

Tabla 9. Resultados más destacados en la revisión bibliométrica sobre monitoreo de la sequía agrícola a nivel internacional.

Documentación insumos			
Artículo	Autor (año)	Citas recibidas (buscador académico)	Factor de impacto
<i>KEEPING TRACK OF CROP MOISTURE CONDITIONS, NATIONWIDE: THE NEW CROP MOISTURE INDEX</i>	Palmer (1968)	567 (Taylor & Francis)	_____
<i>UNDERSTANDING: THE DROUGHT PHENOMENON: THE ROLE OF DEFINITIONS</i>	Wilhite & Glantz (1985)	1854 (Scopus)	28,42
<i>REMOTE SENSING OF WEATHER IMPACTS ON VEGETATION IN NON-HOMOGENEOUS AREAS</i>	Kogan (1990)	609 (Scopus)	_____
<i>THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES</i>	McKee et al. (1993)	12057 (Google scholar)	_____
<i>APPLICATION OF VEGETATION INDEX AND BRIGHTNESS TEMPERATURE FOR DROUGHT DETECTION</i>	Kogan (1995)	940 (ScienceDirect)	_____
<i>NDWI - A NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX FOR REMOTE SENSING</i>	Gao (1996)	4150 (ScienceDirect)	2,76

OF VEGETATION LIQUID WATER FROM SPACE			
GLOBAL DROUGHT WATCH FROM SPACE	Kogan (1997)	731 (Scopus)	2,82
COMPARING THE PALMER DROUGHT INDEX AND THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX	Guttman (1998)	890 (Scopus)	2,1
OPERATIONAL SPACE TECHNOLOGY FOR GLOBAL VEGETATION ASSESSMENT	Kogan (2001)	187 (Scopus)	1,34
A SIMPLE INTERPRETATION OF THE SURFACE TEMPERATURE/VEGETATION INDEX SPACE FOR ASSESSMENT OF SURFACE MOISTURE STATUS	Sandholt et al. (2002)	1474 (ScienceDirect)	6,77
A REVIEW OF TWENTIETH-CENTURY DROUGHT INDICES USED IN THE UNITED STATES	Heim & Richard (2002)	1658 (Scopus)	4,64
ASSESSING VEGETATION RESPONSE TO DROUGHT IN THE NORTHERN GREAT PLAINS USING VEGETATION AND DROUGHT INDICES	Ji & Peters (2003)	669 (ScienceDirect)	4,04
USING MODIS LAND SURFACE TEMPERATURE AND NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX PRODUCTS FOR MONITORING DROUGHT IN THE SOUTHERN GREAT PLAINS, USA	Wan et al. (2004)	511 (Scopus)	5,11
USE OF NDVI AND LAND SURFACE TEMPERATURE FOR DROUGHT ASSESSMENT: MERITS AND LIMITATIONS	Karnieli et al., (2010)	597 (Scopus)	3,56
PERFORMANCE OF DROUGHT INDICES FOR ECOLOGICAL, AGRICULTURAL, AND HYDROLOGICAL APPLICATIONS	Vicente et al. (2012)	606 (Scopus)	10,44
Documentación productos			
Artículo	Autor (año)	Citas recibidas (buscador académico)	Factor de impacto
EVALUATING THE UTILITY OF REMOTELY SENSED SOIL MOISTURE RETRIEVALS FOR OPERATIONAL AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING	Bolten et al. (2010)	288 (Scopus)	3,72
MONITORING AGRICULTURAL DROUGHT FOR ARID AND HUMID REGIONS USING MULTI-SENSOR REMOTE SENSING DATA	Rhee et al. (2010)	495 (ScienceDirect)	4,06
TOWARDS AN INTEGRATED SOIL MOISTURE DROUGHT MONITOR FOR EAST AFRICA	Anderson et al. (2012)	111 (Scopus)	3,24

<i>ON THE UTILITY OF LAND SURFACE MODELS FOR AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING</i>	Crow et al. (2012)	69 (Scopus)	1,69
<i>MONITORING AGRICULTURAL DROUGHT IN THE LOWER MEKONG BASIN USING MODIS NDVI AND LAND SURFACE TEMPERATURE DATA</i>	Son et al. (2012)	232 (ScienceDirect)	3,46
<i>STATE OF THE ART IN LARGE-SCALE SOIL MOISTURE MONITORING</i>	Ochsner et al. (2013)	335 (Scopus)	3,1
<i>AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING: PROGRESS, CHALLENGES, AND PROSPECTS</i>	Liu et al. (2016)	137 (Scopus)	3,79
<i>SATELLITE SOIL MOISTURE FOR AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING: ASSESSMENT OF THE SMOS DERIVED SOIL WATER DEFICIT INDEX</i>	Martínez et al. (2016)	226 (ScienceDirect)	8,45
<i>MULTI-SENSOR INTEGRATED FRAMEWORK AND INDEX FOR AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING</i>	Zhang et al. (2017)	116 (ScienceDirect)	4,21
<i>EVALUATION OF SIX INDICES FOR MONITORING AGRICULTURAL DROUGHT IN THE SOUTH-CENTRAL UNITED STATES</i>	Tian et al. (2018)	127 (ScienceDirect)	7,27
<i>AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING USING EUROPEAN SPACE AGENCY SENTINEL 3A LAND SURFACE TEMPERATURE AND NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX IMAGERIES</i>	Hu et al. (2019)	71 (ScienceDirect)	5,2
<i>AGRICULTURAL EXTREME DROUGHT ASSESSMENT AT GLOBAL LEVEL USING THE FAO AGRICULTURAL STRESS INDEX SYSTEM (ASIS)</i>	Rojas (2020)	38 (Scopus)	3,07
<i>NEXT GENERATION AGRICULTURAL STRESS INDEX SYSTEM (ASIS) FOR AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING</i>	Rojas (2021)	6 (Scopus)	0,75

El monitoreo de la sequía agrícola históricamente se ha centrado en evaluaciones de la condición de humedad de los cultivos y el suelo asociado a ellos, desarrollando índices (índice de sequía de Palmer-PDI, índice de severidad de sequía de Palmer-PDSI e índice de la humedad de cultivos-CMI) (Palmer, 1965, 1968) para abordar esta temática desde una perspectiva a gran escala (Ochsner et al., 2013; Liu et al., 2016), incorporando el concepto de evapotranspiración (índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado-SPEI) como medida de la demanda de agua en un balance hídrico (Vicente et al., 2012) usando información meteorológica (reportes de temperatura y precipitación semanal) (Palmer, 1968; Guttman, 1998) o índices que solamente necesiten una variable meteorológica

(precipitación) en forma de serie temporal de al menos 30 años de datos recientes para el monitoreo y análisis de la sequía (índice estandarizado de precipitación-SPI) (McKee et al., 1993; Guttman, 1998; Ji & Peters, 2003).

Eventualmente se empezó a usar la teledetección espacial (sensores satelitales climáticos como el Advanced Very High Resolution Radiometer-AVHRR) mediante radiaciones emitidas por satélites de instituciones y agencias como la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA) (Kogan, 2001) que perciben los impactos climáticos en la vegetación (clorofila foliar, contenido de humedad y condiciones térmicas) (Gates 1970; Myers 1970; Tucker and Sellers 1986; Kogan, 1990, 2001; Gitelson & Merzlyak 1997), implementando y mejorando nuevos índices como el índice de estrés hídrico de los cultivos-CWSI, índice de diferencia en la vegetación normalizada-NDVI, índice de la condición vegetal-VCI, índice de la condición de temperatura-TCI, índice de diferencia normalizada en el agua NDWI, índice de déficit de agua en el suelo-SWDI, índice de la aridez de vegetación-temperatura-TVDI, índice de condición de la temperatura vegetal-VTCI, índice de la salud vegetal-VHI, índice escalar de la condición de sequía-SDCI, índice sistemático de estrés agrícola-ASIS, entre otros derivados, para determinar el inicio, intensidad, duración e impacto de la sequía en la agricultura (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981; Kogan, 1995, 1997; Gao, 1996, Guttman, 1998; Liu and Kogan, 1996; Unganai and Kogan, 1998; Sandholt et al., 2002; Wan et al., 2004; Karnieli et al., 2010; Rhee et al., 2010; Martínez et al., 2016; Rojas, 2020, 2021)

La investigación sobre el monitoreo de la sequía agrícola se ha convertido en un tema de interés académico global (Martínez et al., 2016; Hu et al., 2019), y ha tenido una tendencia significativa después del año 2000, donde el número de artículos y citas en el tema se ha incrementado exponencialmente (Liu et al., 2016). Muestra de esto es la cantidad de países que vienen investigando este fenómeno, como China (Zhang et al., 2016, 2017; Hu et al., 2019), Estados Unidos (Rhee et al., 2010; Ochsner et al., 2013; Tian et al., 2018), países del este de África (Anderson et al., 2012), Taiwan y Vietnam (Son et al., 2012), España (Martínez et al., 2016), República Checa (Mozny et al., 2012), México (Ortega et al., 2021) y Argentina (Araneda et al., 2021) por mencionar algunos recientes.

Actualmente, el monitoreo de la sequía agrícola se ha orientado al estudio y análisis de una combinación de datos de estaciones climáticas, así como datos de imágenes satelitales emitidas por sensores remotos (Liu et al., 2016; Ortega et al., 2021), incorporando nuevos satélites y agencias interesadas en la temática, como el radiómetro escaner microondas avanzado de la NASA (AMSR-E) (Bolten et al., 2010; Anderson et al., 2012; Son et al., 2012), el sensor espectroradiómetro de moderación de resolución de imagen-MODIS del satélite de la misión de medición de lluvia tropical-TRMM (Rhee et al., 2010; Son et al., 2012; Zhang et al., 2016), el satélite humedad del suelo y salinidad oceánica-SMOS (Martínez et al., 2016), el satélite sistema de asimilación de datos de terreno global-GLDAS (Zhang et al., 2017), el radiómetro de temperatura de superficie marina y terrestre Sentinel-3A SLSTR lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) (Hu et al., 2019). Con la consecuente actualización en la metodología del monitoreo donde en un inicio se empleaba los tradicionales índices de monitoreo de variables meteorológicas, y ahora se

complementa con la evaluación de índices de monitoreo compuestos que capturan información de variables meteorológicas y de teledetección, así como nuevos métodos de extracción de datos, como el árbol de regresión y clasificación, ponderación lineal y red de Bayes (Liu et al., 2016).

Los resultados de la búsqueda bibliométrica también arrojaron indicadores acerca de la falencia de las investigaciones actuales. La documentación actualizada sobre monitoreo de la sequía agrícola permite inferir que, en general, ningún índice de sequía por sí solo puede capturar todos los aspectos de la sequía agrícola, por lo que se necesita evaluar múltiples índices de sequía según el ecosistema (factor suelo, fenología del cultivo, clima, movimiento del agua en el suelo y planta, geología) de cada zona de estudio para realizar un monitoreo integral según la zona y cultivo de interés (Liu et al., 2016; Tian et al., 2018). También se constata el débil (inexistente) aspecto zonal (*in situ*), local o regional en contraposición con los grandes avances técnicos y tecnológicos aplicados al estudio de la sequía agrícola a gran escala (Ochsner et al., 2013; Liu et al., 2016; Zhang et al., 2016), debido en parte al incremento de diferentes tipos de sensores, el mejoramiento de la resolución espacial y temporal de imágenes satelitales (Dalezios et al., 2012; Liu et al., 2016), cantidad considerable de información satelital de acceso libre y diversidad de productos (Celis et al., 2017). A pesar del reciente interés mundial por la sequía, los estudios se han centrado en la causa de este fenómeno asociado al análisis climático y la distribución espaciotemporal de los desastres, resaltando los estudios en sequía meteorológica (Dai, 2013 en Van Loon et al., 2014) e hidrológica (Fleig et al., 2010; Nalbantis & Tsakiris, 2009; Tallaksen and Van Lanen, 2004 en Makokha et al., 2016); sin embargo no son tan abundantes los estudios sobre el monitoreo de la sequía agrícola específicamente (Liu et al., 2016). Así mismo se ha encontrado que el modelo de monitoreo de la sequía agrícola actual a diferencia de la orientación cuantitativa y teórica carece de un enfoque de evaluación cualitativa, factor influyente de los resultados que junto a la evaluación de alertas facilita la evaluación práctica de pérdidas en los cultivos (Liu et al., 2016).

A nivel nacional, se han desarrollado algunos modelos agrometeorológicos orientados a conocer el comportamiento del agua en el suelo. Lhomme et al. (1984) desarrolló un modelo de balance hídrico integrando las componentes atmosférica y edáfica a partir del cual se puede determinar el almacenamiento de agua en el suelo, drenaje y déficit de agua. Posteriormente, se realizaron estudios sobre la dinámica de agua dentro de cafetales (Jaramillo y Cháves, 1999; Giraldo y Jaramillo, 2004; Ramírez y Jaramillo, 2007; Velásquez y Jaramillo, 2009), llegando a modelos más aproximados en la estimación de la humedad del suelo como los estadísticos desarrollados por Poveda et al. (2002) y Rueda et al. (2009). No obstante, la metodología propuesta hasta la fecha no se ajusta al monitoreo de la sequía agrícola en contextos rurales vulnerables, donde una tecnología que requiera el uso de imágenes satelitales o modelos de balance hídrico que demande el empleo de herramientas y software estadísticos y de sistemas de información geográfico no útil ni efectivo para la comunidad campesina de zonas rurales como Buesaco.

Con estos hallazgos cobra relevancia entonces la propuesta de un sistema de monitoreo de sequía agrícola con enfoque comunitario, participativo e integrador, como una herramienta para la gestión del riesgo, que fortalezca las capacidades de adaptación y mitigación ante eventos de VC y reducción de desastres adyacente a estos (Du et al., 2013; Mishra and

Desai, 2005; Mishra and Singh, 2009; Mishra et al., 2009; López et al., 2017). Enfocado hacia las comunidades campesinas más vulnerables y ajustado a la realidad territorial local y regional (López et al., 2017), con una metodología didáctica, clara y sencilla sin perder la rigurosidad técnica y científica.

5.2 MÉTODOS IDÓNEOS PARA EL MONITOREO DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA EN UN CONTEXTO DE PEQUEÑOS CAFICULTORES

5.2.1 Muestreo de suelos

Las muestras para el análisis de suelo (3 disturbadas y 2 no disturbadas) se tomaron espacialmente en puntos representativos del cafetal de la finca (1,7 ha). Se enumera a los diferentes cilindros (A y B) y demás recipientes (C - K) en orden alfabético para dar un orden lógico y facilitar la lectura de los resultados. Los cilindros A y B corresponden a las 2 muestras no disturbadas anteriormente mencionadas, mientras que los recipientes C hasta el K corresponden a vasos metálicos dispuestos en el LASA para análisis de estados de humedad del suelo con 2 (dos) repeticiones, esto es, se pesaron las variables indicadas (Tabla 10) 3 (tres) veces y se tomó el promedio de ellas para establecer cada humedad gravimétrica.

El análisis de suelo aplicado a las muestras colectadas en la finca caficultora estudio en la vereda Veracruz-Buesaco (Tabla 10) arrojó un valor de humedad de capacidad de campo (Cc) de 37,4% (Tabla 10) y un valor de punto de marchitez permanente (PMP) de 11,4% (Tabla 10) los cuales se plasman en un gráfico de tensión de humedad del suelo (THS) (Figura 14).

Tabla 10. Densidad aparente y humedad gravimétrica a presiones atmosféricas de 0,3; 3,0; 8,0 y 15,0 bar.

	Recipientes										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Peso [g]										
Masa inicial	198,7	210,9									
Masa suelo inicial	128,6	141,0									
Masa saturación	212,4	223,7									
Masa suelo saturación	142,3	153,8									
Masa drenado	202,7	217,2									
Masa suelo drenado	132,7	147,3									
Masa horneada	165,4	178,5									
Masa suelo horneado	95,4	108,6	9,7	7,8	6,7	8,3	9,0	7,9	7,8	7,8	7,7
Da [g/cm^3]	1,0	1,1									
Da media [g/cm^3]	1,0										

W (0,3 bar: CC)	39,1	35,6									
W media (0,3 bar: CC)	37,4										
Masa vasos		6,0	5,8	5,0	4,5	4,6	4,4	4,6	4,8	5,6	
Masa vasos + suelo		18,2	15,4	13,4	14,3	15,4	13,8	13,2	13,4	14,2	
Masa suelo		12,1	9,7	8,4	9,7	10,8	9,4	8,6	8,6	8,6	
Masa vasos + suelo horneado		15,7	13,6	11,7	12,8	13,6	12,3	12,3	12,5	13,3	
Masa agua		2,5	1,9	1,7	1,5	1,8	1,5	0,9	0,9	0,9	
W (3 bar)		25,4	24,1	25,6							
W media (3 bar)		25,0									
W (8 bar)					17,8	20,0	19,3				
W media (8 bar)					19,0						
W (15 bar: PMP)							11,2	11,5	11,4		
W media (15 bar: PMP)							11,4				

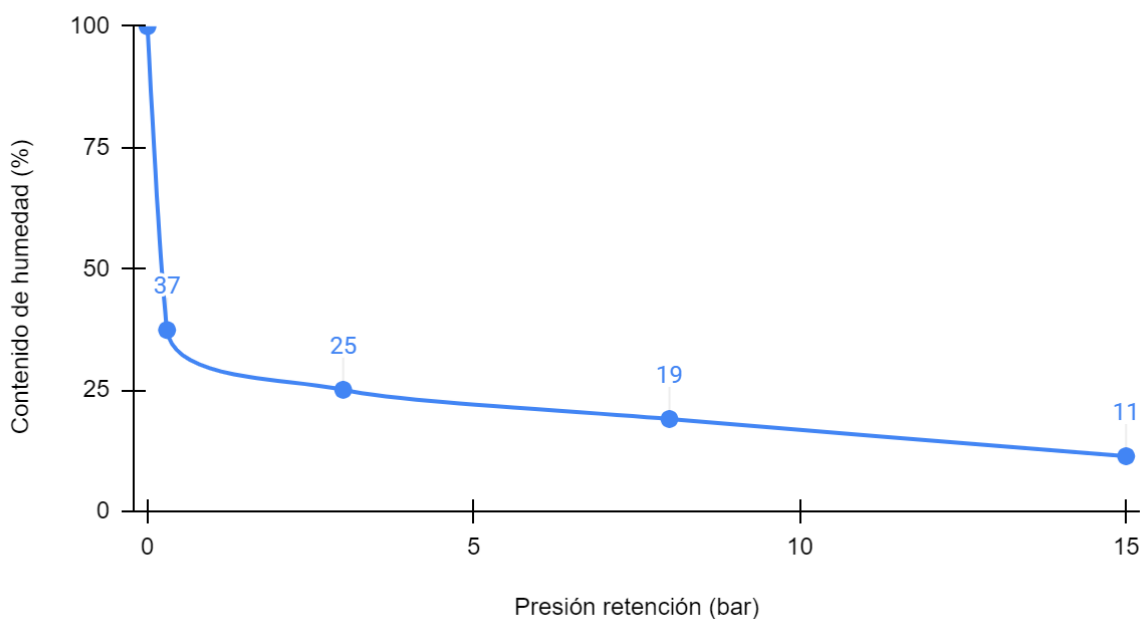


Figura 14. Curva de tensión de humedad del (THS) suelo finca caficultora Veracruz-Buesaco

La discusión de los resultados de las constantes hídricas se realiza en el apartado 5.3.1.3
Necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora

5.2.2 Caferrómetro

5.2.2.1 Marcas de evaporación en el Caferrómetro

Tabla 11. *Distancia y marcas de evaporación Caferrómetro.*

Etapas del café	Marca	Altura desde orificio (cm)
Inicial	ECI-40	6,6
	ECI-80	13,2
	ECI-100	16,5
Madura	ECM-40	6,3
	ECM-80	12,5
	ECM-100	15,6

La primera marca corresponde a la Cc la cual marca el origen de la evaporación en el caferrómetro, mediante la Ecuación 6 se calculó la distancia de las demás marcas de evaporación del caferrómetro (EC) (Tabla 11) considerando el factor de desarrollo fenológico (etapa inicial y madura) del café (Tabla 5) y el NCH para el consumo del 40%, 80% y 100% del agua aprovechable (AA) (Figura 15). La marca correspondiente al consumo del 100% de la AA representa el PMP para la planta de café. Este proceso se realizó para cada etapa fenológica con la finalidad de escoger un conjunto de marcas de evaporación representativas del ciclo completo productivo del café, así pues se escogió la marca del NCH al 40% de la etapa inicial (ECI-40) del cultivo, y las marcas del NCH al 80% y 100% de la etapa madura de la planta (ECM-80, ECM-100 respectivamente) (Tabla 11).

Estos resultados presentan un precedente en cuanto a metodologías técnicas y artesanales del monitoreo de las condiciones hídricas del cultivo de café, específicamente en el seguimiento a la sequía agrícola con alertas tempranas a nivel nacional. Adicionalmente, los resultados del análisis de suelos registrados de los que se obtuvo las marcas de evaporación del Caferrómetro son únicos e irrepetibles para la zona de estudio (Veracruz, Buesaco-Nariño).

Si bien se partió de la hoja de ruta propuesta como método de programación visual del riego de la caña de azúcar planteada por Torres y Cruz. (1995) (Torres et al., 2004), y calibrada como alternativa de programación de riego por aspersión para el cacao por Gavilánez & Farias (2019), ambas herramientas presentan resultados específicos de marcas de evaporación máxima permitida para cada cultivo (16 mm de lámina evaporada para el cacao y 10 y 17 cm de lámina para suelo liviano, 11,5 y 18,5 cm para suelo mediano, y 13 y 20 cm de lámina de evaporación máxima para la caña) a partir de las cuales se aplicaba el riego. No obstante esos resultados no presentan un insumo pertinente para la discusión de este trabajo ya que en primer lugar el enfoque de ambas metodologías insumo está orientado hacia la programación del riego, mientras que el caferrómetro se enfocó con vocación cualitativa hacia los perjuicios en el estado fenológico del estrés hídrico en el café.

Adicionalmente, según la búsqueda bibliométrica realizada no se cuentan con otros estudios similares a nivel nacional e internacional con los cuales comparar estos resultados.

5.2.2.2 Sistema de monitoreo de sequía agrícola mediante Caferrómetro

Según el análisis de suelo, las necesidades hídricas del cultivo (NHC) y el factor de agotamiento o nivel crítico de humedad (NCH) para el café, se estableció la marca ECI-40 como el inicio del estrés hídrico para el cultivo presente en la zona (Tabla 11 y Figura 15). En este trabajo el estrés hídrico para el cultivo de café y la sequía agrícola del mismo, se abordan de manera análoga debido a la aplicación agrícola similar de ambos conceptos.

Así pues los días en los que se observe una medida de humedad en el suelo representada en el caferrómetro por debajo de la marca ECI-40 se deben catalogar como período de sequía agrícola. Si la sequía continúa y las mediciones de la humedad del suelo en el caferrómetro continúan descendiendo por debajo de la marca ECI-40 se han establecido dos marcas adicionales (ECI-80 y ECI-100) las cuales denotan un nivel progresivo en la severidad de la sequía. Cuando el nivel de humedad disminuya hasta ECI-100 significa el nivel de mayor severidad para el cultivo de café pues se habrá llegado al PMP para el mismo y su muerte vegetal (Figura 15).

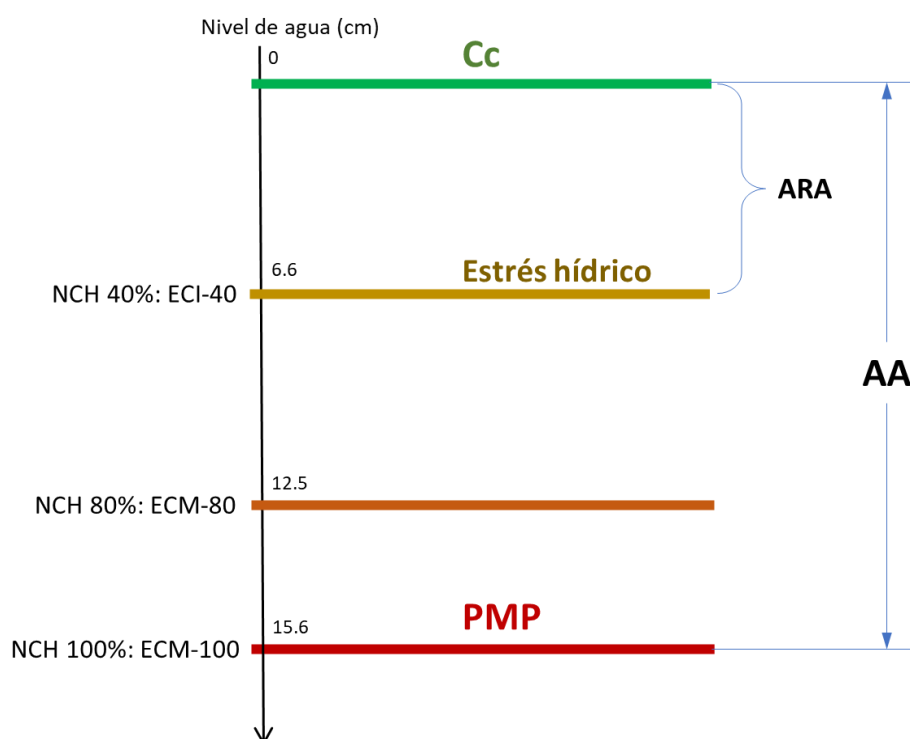


Figura 15. Lecturas de nivel de humedad en el Caferrómetro.

De acuerdo al clima, la capacidad de retención de agua del suelo y la etapa de desarrollo vegetativo del cultivo varía el requerimiento hídrico, y en consecuencia se establece la frecuencia de riego para los cultivos (Anzueto, 2020). En el caso del cultivo de café a nivel nacional, Casierra et al. (2009) determinaron que la frecuencia para el riego de café es de 1-15 días dependiendo de la aplicación que se busque en cuanto a la producción. Con ese contexto el monitoreo de las condiciones de humedad asociadas con la sequía agrícola se debería realizar cada día, sin embargo se puede realizar semanalmente (cada 7 días) o en

un rango inferior a este tiempo (1 a 7 días) para realizar un mejor seguimiento de las condiciones de humedad del suelo.

Se desarrolló además el instructivo didáctico para medir las condiciones de humedad del suelo del cultivo de café (Figura 16) como una ayuda metodológica física para monitorear la sequía agrícola en el cultivo de café por parte del caficultor. Una vez instalado el caferrómetro máximo a un metro del cultivo se debe estar pendiente de las condiciones meteorológicas, pues al momento de la ocurrencia de un evento de precipitación se debe revisar hasta donde se llena el Caferrómetro, si la lámina captada en el balde no llega hasta la marca de Cc (Figura 15) se debe llenar la cantidad faltante hasta alcanzar el aforo de esta marca y así preparar el monitoreo. Se realizó un orificio en la parte inmediatamente superior a la marca de Cc para drenar el exceso de agua en caso que la intensidad de la precipitación supere esta marca que simboliza el límite superior de la AA. Una vez el nivel de agua debido a la evaporación llegue hasta la marca ECI-40 ubicada a 6,6 cm de la Cc (Tabla 11, Figura 15), se inicia el monitoreo de la sequía agrícola dado que se estará iniciando el período de estrés hídrico en el cultivo cuando se llegue al consumo del 40% del AA. A medida que el nivel del agua siga descendiendo se acercará a la marca ECM-80 ubicada a 12,5 cm de la Cc (Tabla 11, Figura 15 y 16) la cual indica el consumo del 80% del AA y una afectación aún mayor del desarrollo de la planta. Cuando el nivel del agua alcanza la marca ECM-100 ubicada a 15,6 cm de la Cc (Tabla 11, Figura 15 y 16) se habrá alcanzado el límite inferior del AA (PMP) y finalmente la muerte vegetal del cultivo.

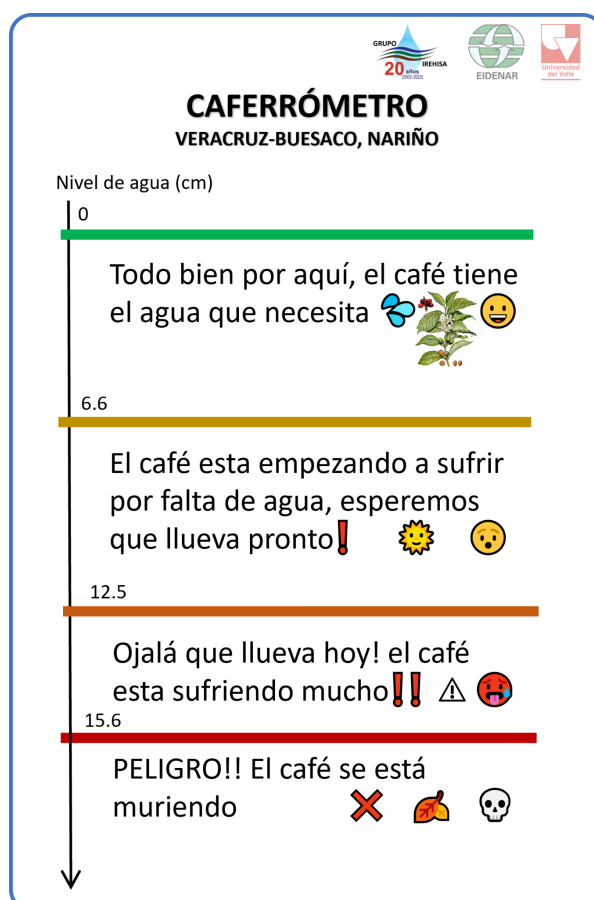


Figura 16. Herramienta instructiva para lectura de nivel de humedad en el Caferrómetro.



Figura 17. Caferrómetro. Fuente: *Imágenes captadas por autor.*

El Caferrómetro se diseñó, elaboró y se instaló en el cultivo de café de la finca del líder caficultor Guillermo Valencia se socializó y capacitó al líder caficultor (Figura 17), sin embargo no se validó en campo

5.3 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN, FORTALECIMIENTO DE RESILIENCIA Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE LOS EFECTOS DE LA SEQUÍA AGRÍCOLA EN UN CONTEXTO DE PEQUEÑOS CAFICULTORES

5.3.1 Estudio técnico de las necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora de Buesaco

5.3.1.1 Organización comunitaria

Buesaco es caracterizado por presentar una economía de agricultura campesina, familiar y comunitaria en sus unidades de producción. Este tipo de agricultura se define como una economía (producción, transformación y comercialización de bienes y servicios) territorial basada en la gestión y el trabajo familiar, asociativo o comunitario principalmente agropecuario (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017). En ella, mujeres, hombres, familias, y comunidades campesinas quienes conviven en los territorios rurales tienen un papel protagónico (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural et al., 2018). Este sistema incluye las distintas formas organizativas y los diferentes medios de vida que emplean las familias y comunidades rurales para satisfacer sus necesidades, generar ingresos, y construir territorios; e involucra actividades sociales, culturales, ambientales, políticas y económicas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural et al., 2018).

Según la información de la cartografía social levantada en campo, los actores involucrados en el sector agrícola de Buesaco se componen de familias campesinas y caficultoras las cuales están desconectadas del sector estatal, excepto por la interacción que tienen con algunas iniciativas pedagógicas y técnicas de instituciones de educación superior como la Universidad de Nariño y la Universidad del Valle (Figura 18). Sin embargo no se percibe injerencia estatal para impulsar la economía de los caficultores de esta zona, condición similar para las asociaciones comunitarias entre productores, las cuales son desconocidas entre la comunidad veredal.

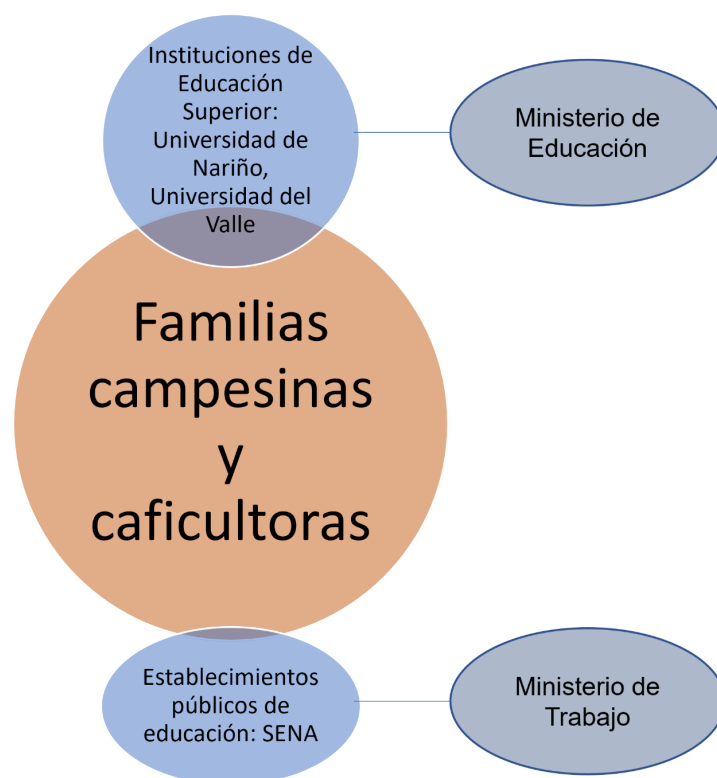


Figura 18. Actores identificados en la comunidad caficultora de Buesaco-Nariño. Fuente: Figura elaborada por autor.

Aunque el sector primario es el más representativo a nivel municipal (se estima que en un 90% de la población depende del sector agropecuario) (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018), existe una problemática asociada al mismo debido a problemas como la falta de sistemas integrales de producción, deficiente cobertura de asistencia técnica, falta de organización comunitaria y asociativa y ausencia de canales de comercialización, que no permite tener una visión integral y actualizada de la situación socioeconómica (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018).

Es por lo tanto, fundamental el papel de la economía campesina, familiar y comunitaria en el desarrollo del campo, la erradicación del hambre, la generación de empleo e ingresos, la dignificación y formalización del trabajo, la producción de alimentos y, en general, en el desarrollo de la nación (Gobierno de Colombia & FARC-EP, 2016). A su vez es necesario fortalecer los sistemas de producción y organización comunitaria (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018) con asistencia técnica y económica de parte del estado (Figura 19) mediante el aporte de instituciones clave para el desarrollo del agro como la Agencia de Desarrollo Rural. Donde también se cuente con una participación más activa de las entidades con jurisdicción territorial como la Corporación Autónoma Regional de Nariño-CORPONARIÑO y la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria (Umata), con el fin de promover la asociación entre los pequeños productores de la zona.

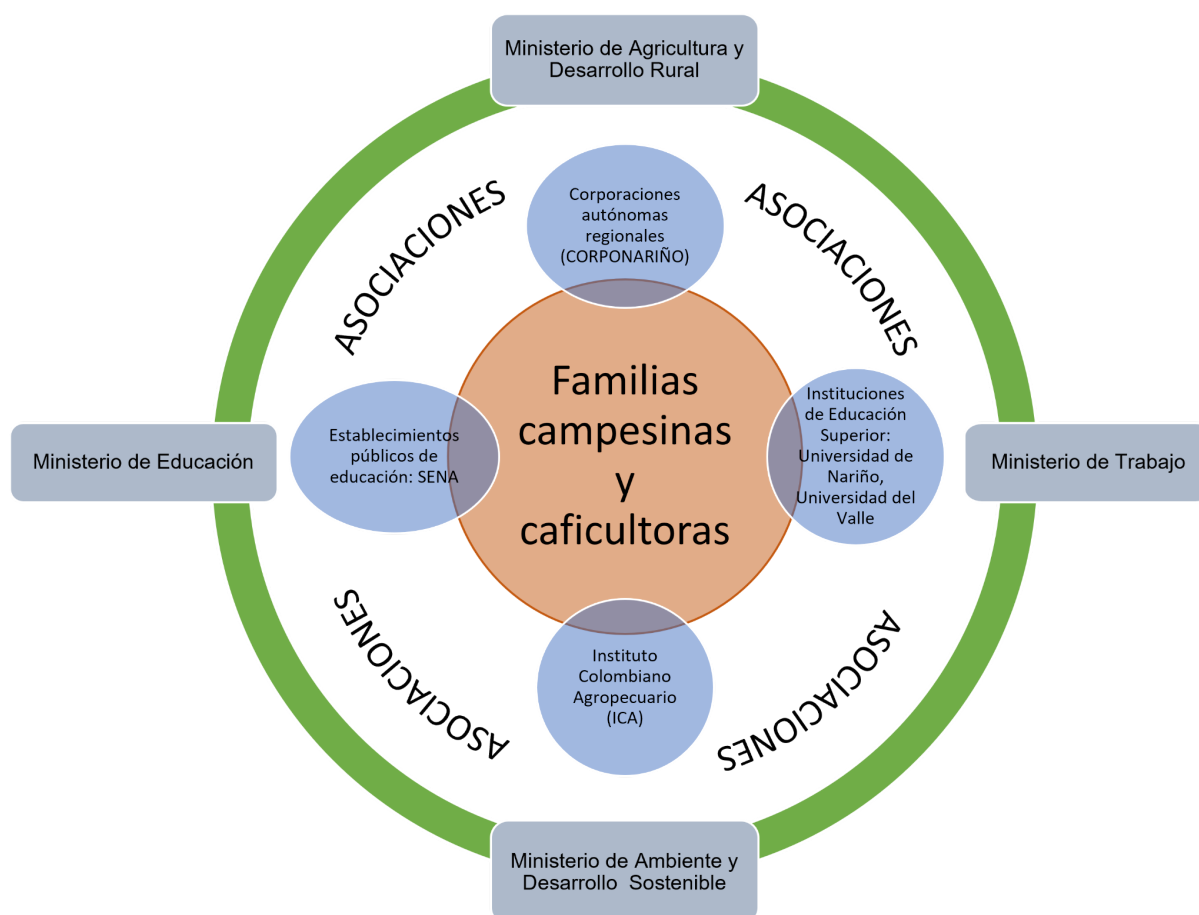


Figura 19. Estructuración ideal de actores para caficultores de Buesaco-Nariño. Fuente: Figura elaborada por autor.

5.3.1.2 Sistemas productivos agrícolas

Debido a la variedad de pisos térmicos (clima cálido hasta clima de páramo), lo que le confiere una diversidad de suelos (Anexo 9), y el alto potencial de recursos naturales (hídricos, de suelo, aire, fauna y flora), Buesaco tiene una notable vocación agropecuaria (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015). En cuanto a la distribución de la extensión de su territorio (62.320 ha): 20% del área corresponde a unidades agroproductivas, cultivos tradicionales (café, maíz, frijol, cítricos y hortalizas), el 30% a bosque naturales, 40% a pastos naturales dedicados a ganadería extensiva y un 10% de la topografía corresponde a terrenos escarpados. El desarrollo productivo del municipio es impulsado en gran medida por una economía campesina de tipo extractivo basada en la producción agrícola tradicional (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015).

Respecto a la tenencia de la tierra del municipio, para el 2018 se contaban con 5658 predios en manos de 7193 propietarios, donde más del 55% de estos predios presentaba una extensión menor a 2 hectáreas y el 32% de los predios exponía extensiones entre 3 y 10 hectáreas, lo cual es un indicador de la estructura agraria principalmente minifundista (pequeña propiedad) en el territorio (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018). Sus prácticas agrícolas son culturalmente tradicionales y en pequeñas unidades productivas (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018), donde predomina la asociación de cultivos como el café (cultivo principal de la zona) con algunas plantas de plátano, guineo, cítricos (naranja, lima, limón, mandarina), gramíneas (maíz), tubérculos

(yuca) y leguminosas (frijol) sembrados en lotes (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015).

La producción de café es uno de los renglones más representativos en la economía de Buesaco ya que la totalidad de la producción se destina a la exportación, seguido de la producción de leche, producto que se comercializa hacia la ciudad de Pasto. El cultivo de maíz, frijol, arveja, legumbres, cítricos y otros frutales, así como la explotación de especies menores aves, cerdos, peces, y cuyes se destinan en un 80% para el autoconsumo asegurando la alimentación de los núcleos familiares campesinos. La explotación de las especies mayores (ganado lechero) se concentra en la zona fría mientras que el ganado para carne en la zona media y cálida de sus pisos térmicos (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018).

De acuerdo al contexto formulado según el diagnóstico realizado en las salidas de campo en 5 fincas caficultoras y la información recopilada de las entrevistas individuales y grupal del grupo focal (Acevedo et al., 2022) (Figura 20), descrito anteriormente, se constató que los productores no cuentan con una tecnificación adecuada en su práctica agrícola debido a la limitada cobertura del servicio de asistencia técnica, pues no tienen sistemas de riego y el proceso de siembra y cosecha (recolección, la despulpada, la lavada y la secada) es predominantemente artesanal. Utilizan la agricultura de secano, en la cual se cultiva teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas (meses de lluvia y sequía) para la práctica agrícola (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015; Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018).

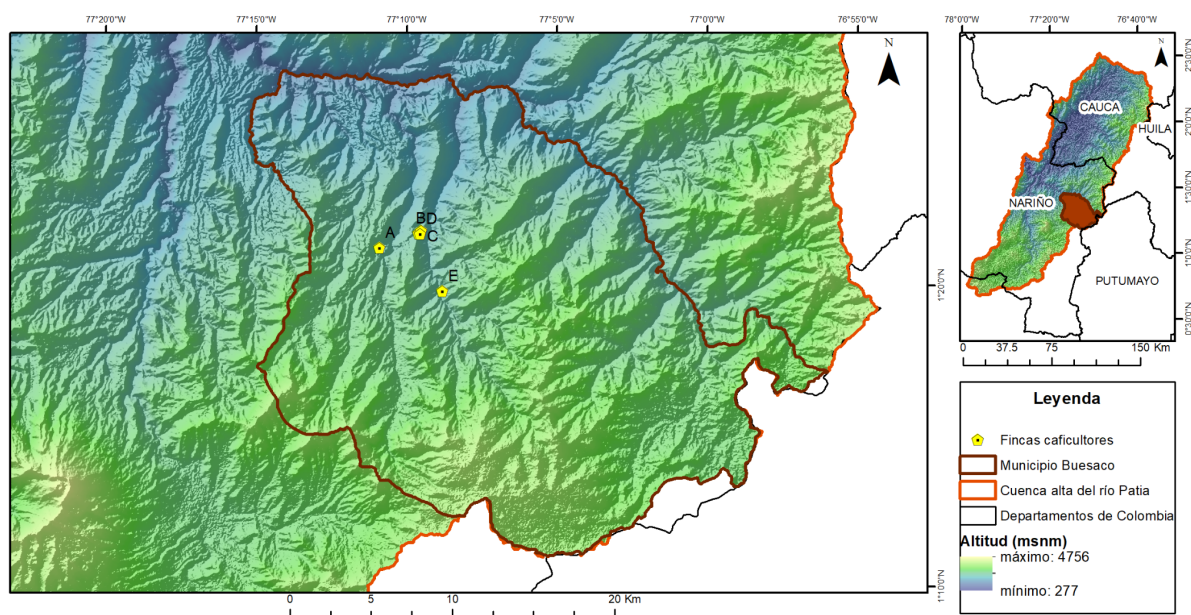


Figura 20. Localización de fincas agricultoras en Buesaco. Fuente: Mapa realizado por autor en ArcMap 10.8

La vulnerabilidad para las comunidades y productores de la zona viene dada inicialmente de la dependencia a las condiciones climáticas sujetas a su vez a la variabilidad y los eventos extremos debido al cambio climático, lo cual les ha significado pérdidas económicas cuando hay excesos de lluvia y la productividad de las cosechas se afecta negativamente. Adicionalmente, un bajo o nulo valor agregado de la producción, donde la actividad en general responde a materias primas que dependen de las fluctuaciones de la oferta y la

demanda, el escaso margen de utilidad que tiene el productor, la falta de asistencia técnica permanente y la baja tecnología repercuten en el rendimiento de la producciones por debajo de los promedios regionales y nacionales, deprimiendo la producción, generado condiciones de desempleo de la mano rural y una economía de supervivencia, lo cual se convierte en un estímulo a abandonar el campo y migrar hacia una economía basada en las plantaciones de cultivos ilícitos (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015; Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño, 2018).

De acuerdo al diagnóstico realizado en la visita a esta zona, se identificaron características agroecológicas en dichas prácticas, pues se usan bio-compuestos como el material orgánico excedente de cosechas de café anteriores y del proceso de alimentación de la crianza de animales menores como aves (gallinaza), ovinos (excremento), y aportes de técnicas más complejas como el compost y lombricompost para mantener y propiciar condiciones apropiadas de fertilidad, humedad y textura del suelo y así obtener una producción rentable para sus sistemas productivos agrícolas. No obstante utilizan algunos compuestos químicos como el Glifo-café como herbicida para el control de plantas arvenses y la urea orgánica como fertilizante y complemento para mejorar la resistencia del cultivo de café ante la evapotranspiración en exceso.

Buesaco con su predominante característica de territorio rural ha vivido una evolución donde las relaciones históricas de los productores agrícolas con sus entorno han cambiado, siendo notables aspectos como el agropecuario, cultural y climático. Según la información referente a la evolución en la agricultura de la zona producto de la cartografía social realizada en la zona, anteriormente se tenían cultivos de flores, papa, maíz, cebada, trigo, frijol y arveja, había poca cantidad de ganado, se contaba con una mayor cobertura boscosa y había una mayor cantidad de fuente hídrica (arroyos y quebradas), lo que le confería al suelo un mejor aporte de nutrientes. Mientras que en la actualidad se cuenta con grandes extensiones de cultivo de café con algunas asociaciones como plátano, yuca, mandarina, naranja y piña, hay una menor área boscosa al igual que se ha visto disminuida la disposición de fuentes hídricas lo que se ha visto reflejado en una menor cantidad de nutrientes en el suelo, impulsando así a la aplicación de agroquímicos para suplir la deficiencia mineral que requieren los cultivos.

5.3.1.3 Necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora

La zona andina del suroccidente colombiano presenta un ciclo anual bimodal (con dos picos máximos de lluvia en el año) de precipitación (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2020) caracterizado por temporadas de altas lluvias (estaciones húmedas) de marzo a mayo y octubre a diciembre, y temporadas de escasas lluvias (sequía) de enero a febrero y julio a septiembre (Poveda et al., 2011; Canchala et al., 2022). El departamento de Nariño posee unas condiciones topográficas complejas gracias a su ubicación dentro de la Cordillera de los Andes (Garreaud et al., 2009; Poveda et al., 2020; Espinoza et al., 2020) y al este del Chocó Biogeográfico Colombiano, una de las regiones más biodiversas de Colombia y del mundo (Canchala et al., 2020a). Aparte de las condiciones anteriores, la cercanía del departamento al Océano Pacífico Tropical y la influencia de los vientos alisios que aportan una importante cantidad de humedad hacia el continente influyen en cambios de los patrones de lluvia de esta región (Canchala et al., 2020a; Canchala et al., 2022).

Para el caso de Buesaco las temporadas de lluvias abundantes concuerdan con el registro anteriormente descrito, siendo las temporadas de escasas lluvias desde junio hasta septiembre, siendo el mes más lluvioso noviembre y el mes más seco agosto (Figura 21). La subregión climática andina presenta una precipitación media mensual de 130 mm/mes (Canchala et al., 2020a), mientras que Buesaco por su parte presenta un valor similar aunque inferior de 106 mm/mes para un conjunto de datos entre 1983-2017 (Figura 21).

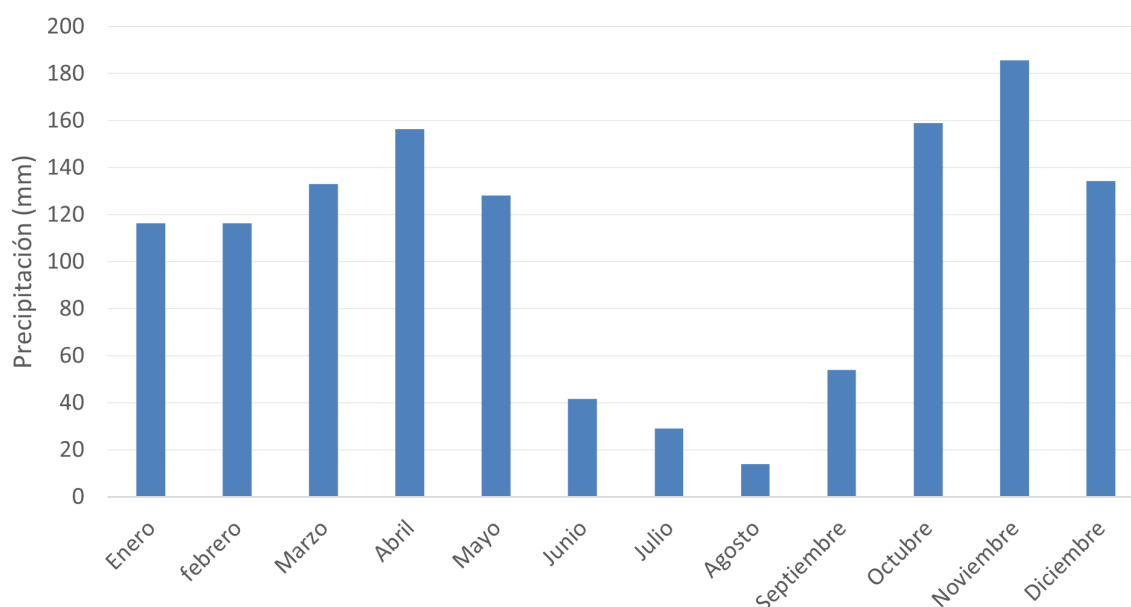


Figura 21. Hietograma (precipitación media mensual multianual) de Buesaco 1983-2017. Fuente: Figura elaborada por autor.

Según 3 muestras de suelo disturbadas colectadas en la finca del líder caficultor Guillermo Valencia en la vereda Veracruz-Buesaco, el suelo de esta zona tiene una textura franco-arcilloso (FAR) (Anexo 10), un valor de humedad de CC de 37,38% y un valor de PMP de 11,36% (Tabla 10, Figura 14). Según la textura franco-arcillosa (Anexo 10) y los valores de retención de humedad bajos a medios (15-48% a 0,3 bar y 11-24% a 15 bar), este suelo presenta características de suelos tipo Alfisoles, Mollisoles, Inceptisoles y Entisoles (IGAC, 2004). Este tipo de suelos, característicos de las zonas con cenizas volcánicas, presentan una buena estructura, profundidad hasta varios metros de desarrollo del suelo, con buena capacidad de retención de humedad y buen drenaje interno, lo que les transfiere una excelente aptitud para el cultivo de café (Arcila et al., 2007).

Se encontró que el mes con la evapotranspiración más alta es agosto con 145,69 mm/mes y el mes con la evapotranspiración más baja es febrero con 110,56 mm/mes (Figura 22). El consumo promedio de agua de la planta de café es aproximadamente 125 mm/mes. Cuando el aporte hídrico es inferior a este valor, disminuye la producción. Considerando que en las regiones cafeteras de Colombia la evaporación diaria alcanza entre 3 y 4 mm, un período seco de 30 a 40 días consecutivos afectaría la producción del grano (Jaramillo, 2005a, 2005b).

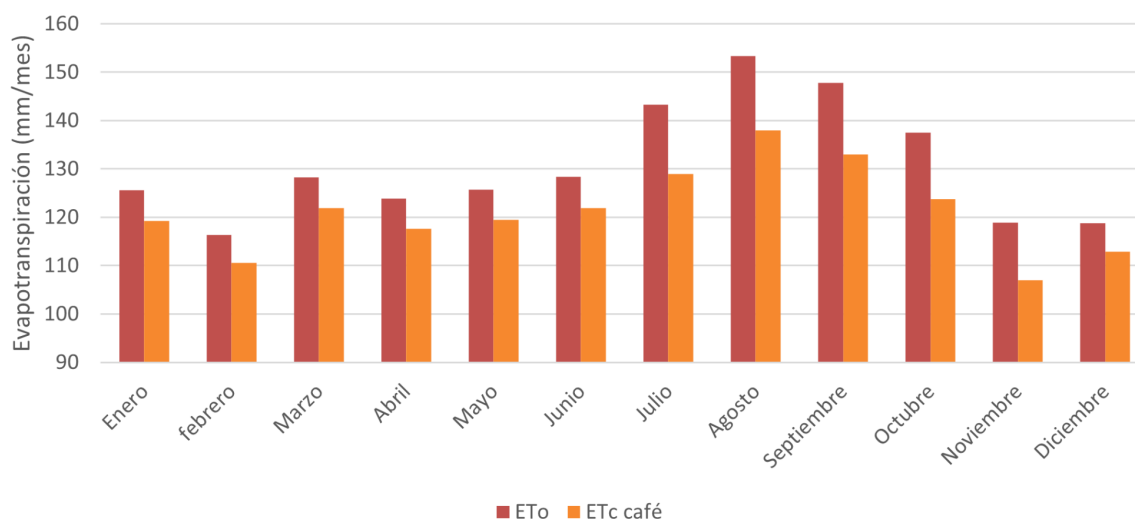


Figura 22. Evapotranspiración referencia (ETo) y del café (ETc) mensual multianual 1983-2017 Buesaco. Fuente: Figura elaborada por autor.

Con estos datos se realizó el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de café para cada mes en la zona rural de Buesaco (Tabla 12) llegando a la NRn (demanda hídrica -oferta hídrica) (Figura 23). En el caso de un mes con una NRn negativa no es necesario suplir de agua al cultivo (no fue el caso en este estudio).

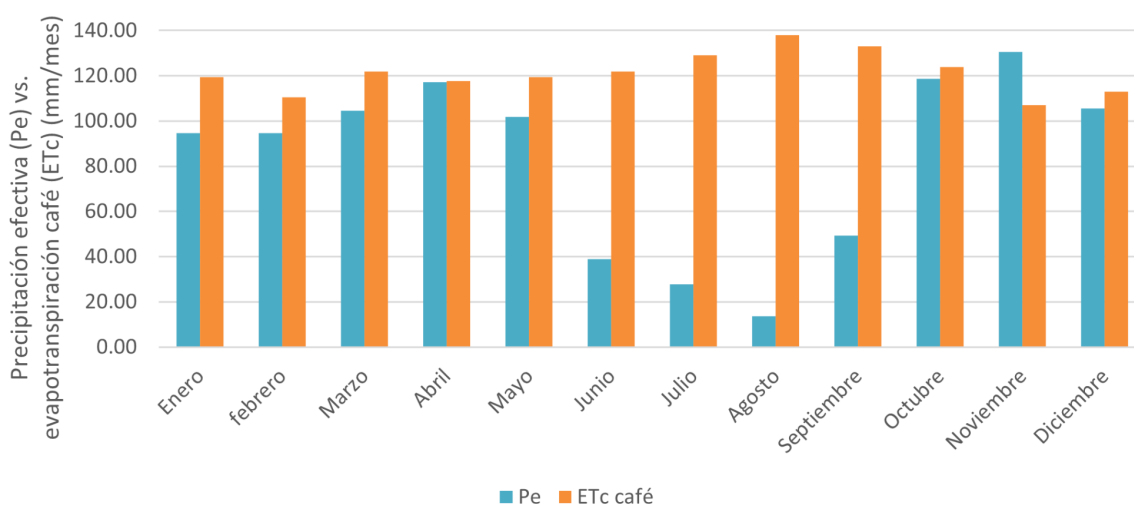


Figura 23. Oferta vs. demanda del recurso hídrico. 1983-2017 Buesaco. Fuente: Figura elaborada por autor.

El período de junio a septiembre es el más crítico debido a la mayor demanda de agua del café, siendo agosto el mes de mayor demanda. El caudal de flujo continuo neto (Qnfc) y total (Qpfc) (sin tener en cuenta las eficiencias del posible sistema de riego y considerando las eficiencias respectivamente) arrojó que se necesita un caudal de 1,09 L/s*ha (litros por segundo por hectárea) para el mes más crítico (agosto) y un caudal de 0,17 L/s*ha para el mes con menor demanda (Noviembre) para la zona rural de Buesaco (Tabla 12). Ningún mes está exento de la necesidad de aporte de un caudal de flujo continuo para las necesidades hídricas del cultivo de café.

Tabla 12. Necesidad hídrica del Café en Buesaco

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pe 75% [mm]	49,80	61,20	64,50	79,0	62,10	6,30	3,0	0,0	9,70	88,60	86,60	50,90
Kc café	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,95
ETc 50% [mm/día]	3,81	3,95	3,92	3,89	3,82	4,07	4,21	4,46	4,45	4,03	3,60	3,67
NRn [mm/día]	2,20	1,76	1,84	1,26	1,82	3,86	4,11	4,46	4,12	1,17	0,71	2,03
Qnfc [L/s*ha]	0,26	0,20	0,21	0,15	0,21	0,45	0,48	0,52	0,48	0,14	0,08	0,24
Ep	0,48											
Qnfc [L/s*ha]	0,54	0,43	0,45	0,31	0,44	0,94	1,00	1,09	1,00	0,29	0,17	0,50

Para este proyecto se asumió una eficiencia del proyecto (Ep) de 0,476 (47,6%) la cual se compone de tres tipos de eficiencia ($47,6\% = 80\% * 85\% * 70\%$): eficiencia de conducción del 80% que corresponde a sistemas de tuberías en PVC, eficiencia de distribución del 85% también asociada a un sistema de distribución en tubería PVC y finalmente una eficiencia de aplicación del 70% que se asocia a un sistema de aplicación de riego por aspersión, dado que la pendiente media de la zona (15,6%) no presenta un mayor grado de dificultad para el posible sistema de riego. Estas estimaciones se asumieron sopesando las condiciones sociales, culturales y económicas de la comunidad caficultora observadas en la zona teniendo en cuenta la baja tecnificación y difícil acceso a una asistencia técnica adecuada. Debido a lo anterior se recomienda un sistema de captación y distribución del sistema de riego en tubería PVC, pues implica un bajo costo sin perjuicio de su eficiencia. No se va a entrar al diseño hidráulico del posible sistema de riego ya que no es el alcance ni objetivo de este informe.

Para el caso-estudio puntual de las necesidades hídricas de café en la finca de 1,7 ha del líder caficultor Guillermo Valencia, ubicada en la vereda Veracruz. Donde se tomaron en cuenta los valores de LARA, la densidad aparente del suelo de la finca (Da) y el factor de agotamiento (f), se calculó finalmente el caudal requerido del proyecto o caso de estudio (Qpfc) para una jornada de riego diaria propuesta de 8 horas teniendo en cuenta las eficiencias del proyecto y un área de 1,7 ha.

Tabla 13. Necesidad hídrica del Café. Finca Guillermo Valencia

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área [ha]	1,7											
Qnfc [l/s]	0,91	0,73	0,76	0,52	0,75	1,60	1,70	1,85	1,71	0,49	0,30	0,84
CC [%]	37,38											

PMP [%]	11,36											
P [cm]	30											
Da [g/cm ³]	1,04											
f [%]	40											
LARA [mm]	32,47											
FR⁴ [días]	8	8	8	8	8	7	7	7	7	8	9	8
LARA⁵ [mm]	30,50	31,59	31,36	31,15	30,56	28,49	29,44	21,21	31,13	32,24	32,42	29,40
Qpfc [l/s]	4,73	4,90	4,86	4,83	4,74	5,05	5,22	5,53	5,52	5,00	4,47	4,56

5.3.1.4 Potencial agrícola

La productividad de los suelos está determinada por sus características físicas, que integradas con las climáticas determinan su producción con un sistema específico de cultivo, en otras palabras la aptitud o “vocación” de los suelos (Gómez et al., 1991). El cafeto se desarrolla adecuadamente si se tienen las condiciones físicas adecuadas en el suelo, como una profundidad efectiva mayor de 50 cm, alta resistencia a la erosión (aspecto que requiere un buen manejo del suelo), adecuado drenaje natural, buena aireación y permeabilidad, pendientes que no superen el 45%. La fertilidad natural puede ser baja, aspecto que se puede subsanar con una fertilización química adecuada y oportuna (Gómez et al., 1991).

Según investigaciones realizadas por Arcila et al. (2007), existen 12 componentes del suelo considerados principales para el normal crecimiento y producción del café los cuales deben considerarse como referencia para la toma de decisiones al momento de establecer el cultivo. Estos valores se pueden comparar (Tabla 14) con la caracterización química de ciertas zonas con uso de suelo de bosque ubicadas en el municipio de Pasto (bosque secundario a 2820 msnm) (Bastidas & Botina, 2018) y cercanas a este (bosque nativo de las faldas del volcán Galeras a 3100 msnm) (Arteaga J. et al., 2016), las cuales se caracterizan por la no intervención humana. Se evidencia entonces que los suelos de Nariño tienen niveles superiores a los rangos adecuados para la mayoría de los minerales y componentes químicos (a excepción de unos pocos inferiores como el Zn los cuales se pueden incorporar al suelo con enmiendas de abono naturales) necesarios para el cultivo de café.

⁴ **FR***: frecuencia de riego corregida

⁵ **LARA***: LARA corregida

Tabla 14. Principales componentes y minerales del suelo para la producción de café en zona cafetera colombiana vs caracterización química de suelos nativos de Nariño.

Componente	Unidad de medida	Rango ideal	Bosque seco	Bosque nativo
pH	-	5,0-6,0	5,3	6,0
Materia orgánica (MO)	%	11,4 - 12,6	23,9	13,4
Saturación de aluminio	%	0 - 60,0	-----	-----
Fósforo (P)	mg/kg	6,0 - 14,0	3,18	14,3
Boro		0,2	-----	-----
Zinc (Zn)		1,0	0,19	-----
Manganeso (Mn)		50,0	-----	-----
Hierro (Fe)		100,0	-----	271,3
Cobre (Cu)		1,0	-----	-----
Potasio (K)	cmol/kg	0,3 - 0,4	0,38	1,8
Calcio (Ca)		1,8 - 2,4	2,38	20,8
Magnesio (Mg)		0,6 - 0,8	1,0	5,0

Fuente: Arcila et al. (2007), Arteaga J. et al. (2016) y Bastidas & Botina (2018)

El departamento de Nariño es uno de los departamentos de mayor complejidad y variabilidad en cuanto a paisajes, climas (Anexo 9), suelos y material parental (IGAC, 2004). Su territorio está caracterizado por fenómenos sucesivos de tectonismo, erosión, remoción en masa y aportes de materiales aluviales, marinos y piroclásticos (provenientes de erupciones de los volcanes Galeras, Cumbal, Azufral, Chiles, Doña Juana, Morazurco y Patascoy) (IGAC, 2004). El clima, el material parental y los organismos son los factores formadores de mayor incidencia en el desarrollo de suelos de las zonas de altiplanicie (IGAC, 2004).

El relieve es en general moderadamente inclinado y plano (pendientes entre 12-50%) con excepción de los cañones (presentan pendientes mayores al 50%) formados por corrientes de agua, procesos erosivos y fenómenos de remoción en masa. Esta configuración del relieve ha permitido la acumulación de capas de ceniza volcánica de diferente espesor (IGAC, 2004).

Las zonas onduladas como el municipio de Buesaco, de mesas y cañones tiene la topografía de lomas características de la altiplanicie y en ellas se presentan suelos con componentes arcillosos (IGAC, 2004). En esta zona se presenta un alto contenido de ceniza volcánica (tobas volcánicas andesíticas) en el suelo de la zona cafetera, que produce abundantes elementos minerales que permanecen en el suelo debido a la baja precipitación pluvial y elevada evapotranspiración de la zona (Gómez et al., 1991; IGAC, 2004). Las cenizas arrojadas por los volcanes de esta zona han recubierto indistintamente diversos

suelos y/o materiales (ígneos, sedimentarios, metamórficos) en grandes extensiones, moldeando su paisaje (áreas onduladas o planas), con espesores que varían entre unos pocos centímetros hasta varios metros (Gómez et al., 1991). Estas condiciones climáticas, geológicas y topográficas han permitido el desarrollo de suelos con poca a moderada evolución, alto contenido de materia orgánica y alta fertilidad (IGAC, 2004).

La importancia de los suelos de ceniza volcánica radica en que son los únicos suelos de la zona cafetera que tienen perfiles homogéneos en sus características físicas y químicas, en otras palabras presentan áreas significativas en forma uniforme (Gómez et al., 1991). La mayoría presentan condiciones físicas ideales como drenaje interno, capacidad de retención de humedad, estabilidad estructural (resistentes a la erosión) (Gómez et al., 1991). Este tipo de suelo constituye las áreas más densamente cultivadas en café (caficultura al sol con densidades superiores a 5.000 árboles/ha), con sistemas de cultivo de alta densidad de siembra y alta productividad (Gómez et al., 1991).

Nariño, caracterizado por su extraordinario clima es un territorio reconocido de producción de café de calidad a nivel nacional (63% de sus municipios son productores de café) (Lagos et al., 2019), y ha utilizado este rubro como un potencializador de su desarrollo junto al turismo; según el informe del Comité de Cafeteros (2013), entre el período 2013-2014 contaba con más de 54.000 fincas, 39.000 caficultores (7,1% productores a nivel nacional) y una producción de poco más de 626.000 sacos de 60 kg anual en una extensión de 38.850 ha (Lagos et al., 2019), con una densidad de producción de más de 5.250 plantas/ha mientras que otros departamentos registraron una densidad de menos de 3.250 plantas/ha en sus zonas cafeteras (FNC et al., 2015), con los cuales producía 3 marcas de cafés especiales: Nespresso AAA, Cafés de origen y Rainforest Alliance (FNC et al., 2017). Buesaco es uno de los municipios con una importante participación en la caficultura de Nariño, pues resalta por una mayor área sembrada, mayor área cosechada, mayor producción y rendimiento a diferencia de otros municipios cafeteros del departamento (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014). Adicionalmente destaca por su mercado de cafés especiales, aspecto destacado en notas de la prensa regional (Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco, 2015).

5.3.2 Estrategias agroecológicas para la producción de café como estrategias de adaptación y mitigación a los efectos de sequía agrícola producto de la VC y CC

El calentamiento del océano Pacífico ecuatorial es un factor impulsor de VC, siendo El Niño un evento extremo producto de la misma. Usualmente los eventos de El Niño pueden durar entre 7 meses hasta 2 años, con un impacto (pronunciado o nó) sobre las condiciones hídricas y meteorológicas de la zona cafetera colombiana (Ramírez et al., 2014; Serna & Farfán, 2018).

En la zona cafetera debido a la ocurrencia de El Niño se presentan alteraciones en las condiciones meteorológicas como la disminución de lluvias totales anuales (impactando de específicamente los períodos históricamente secos), incremento de las horas de brillo solar y de la radiación, incremento de la temperatura media del aire y de la amplitud térmica (afectando la actividad fotosintética de la planta de café y favoreciendo el desarrollo de la broca) aumentando el número de días de déficit hídrico, y por consiguiente reduciendo la humedad del suelo (Ramírez et al., 2014).

Esta VC genera una necesidad al caficultor de vigilancia de estos eventos y adaptación de su sistema de producción de café adoptando estrategias y prácticas agronómicas para minimizar los riesgos (Turbay et al., 2015; Serna & Farfán, 2018). De acuerdo a la gestión del riesgo, son varias las instituciones (Naciones Unidas - UN, Organización Meteorológica Mundial - OMM, Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño - CIIFEN, Sistema Nacional Ambiental - SINA) institutos (IDEAM) y Corporaciones Autónomas Regionales y asociaciones (Centro Nacional de Investigaciones de Café. - Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros - FNC) tanto internacionales como nacionales que se han encargado de formular una serie de recomendaciones a los productores con la finalidad de mejorar la adaptación ante el CC y la VC (López et al., 2017; Pérez et al., 2017; UNODRR & IDEAM, 2018; Fuganti et al., 2020).

Con este contexto y de acuerdo a una búsqueda bibliográfica actualizada a nivel nacional, se presentan a continuación un conjunto de estrategias agroecológicas para la adaptación y mitigación ante los impactos de la VC y el CC asociadas al El Niño como fase extrema cálida del ENOS para el cultivo de café (Tabla 15).

Tabla 15. Estrategias agroecológicas de adaptación y mitigación a la VC y CC para el cultivo de café asociadas a El Niño

Condición	Estrategia	
Altas temperaturas	- Cultivos asociados a sombra para contrarrestar la sensibilidad y/o aumentar la adaptabilidad.. - Diversificación genética: busca el manejo de varias especies de plantas en el cultivo con el fin de lograr una sinergia entre estas.	
Sequía prolongada	- Cubierta de suelo y cultivo: mejoran el contenido de materia orgánica presente en el suelo estableciendo una capa orgánica comúnmente denominada mulching (colchón de hojas), mayor contenido de materia orgánica se traduce en mayor retención de humedad. - Técnicas de infiltración para riego con el fin de disminuir impactos directos como marchitez y mortalidad. Incentivar las prácticas de conservación y cosecha por medio de la colecta y almacenamiento de agua lluvia. - Introducir nuevas variedades de especies que sean resistentes al estrés hídrico.	
Déficit hídrico y vulnerabilidad del suelo	- Uso de árboles intercalados para manejar los porcentajes de sombrío de acuerdo al brillo solar. Introducir árboles de sombrío permanente durante el ciclo productivo del café. - Barreras vivas para la protección a procesos erosivos, éstas se establecen según la pendiente del suelo y altura del árbol.	
Resiliencia en sistemas de producción	Siembras nuevas	- Centro y sur en donde se cosecha el 1er semestre, la siembra debe hacerse entre septiembre y octubre
	Renovación de cafetales	Para la zona sur de la zona cafetera nacional: junio – julio - Ajustar la densidad de tallos a partir de las condiciones agroecológicas - En zonas bajas debe predominar la zoca tipo pulmón

		a 60 cm de altura con despunte
	Diversificación y reemplazo de cultivos	- En altitudes mayores a 1500 msnm intercalar cultivos de maíz y frijol - Siembra de plantas con micorrizas, materia orgánica y fósforo
	Sombra	- En altitudes inferiores a 1300 msnm hacer sombrío transitorio y emplear cultivos de cobertura
Manejo de enfermedades	Control biológico	- Manejo integrado de arvenses con selector y de inferencia alta para la cressera. - Barreras vivas para reducir la muerte descendente. - Selección de arvenses nobles en cafetales jóvenes para controlar más de 15 especies nativas de parasitoides y 8 depredadores - Regulación de araña roja por medio de especies como Coccinellidae Stethorus s.p. (Coleoptera: Coccinellidae) y larvas de Chrysoperla s.p.
	Control químico	- Tratamientos para evitar la dispersión una vez se confirme la sintomatología de nemátodos. - Emplear organofosforados para la infestación y posición de penetración de la broca del café. - Aplicación de acaricidas en focos iniciales en áreas endémicas para combatir la araña roja del café.
Prácticas sociales	Diversificar ingresos y servicios financieros, capacitar e informar comunitariamente sobre pronósticos del tiempo y clima, incentivar el trabajo conjunto para afrontar desafíos, fortalecer las organizaciones de agricultores implementando la formación, crédito para inversiones y seguro de cultivos	

Fuente: (Badii et al., 2000; Jaramillo & Arcila, 2009; Norato, 2012; Turbay et al., 2015; coffee&climate, 2015)

6. CONCLUSIONES

A continuación se presentan conclusiones de acuerdo con los objetivos planteados.

Revisión bibliométrica sobre sistemas de monitoreo de sequía agrícola

- El monitoreo de la sequía agrícola a nivel global se orienta al análisis de datos de variables meteorológicas como la precipitación y temperatura recopilados por estaciones climáticas (39% de los artículos revisados), de datos de imágenes satelitales emitidas por sensores remotos (52% de los artículos revisados); ambos interpretados por índices que establecen umbrales con los que se clasifica el comportamiento a gran escala de la sequía, espacializando sus resultados mediante sistemas de información geográfica. También se encontró un enfoque que emplea modelos matemáticos y herramientas estadísticas con los que se analiza teóricamente (9% de los artículos revisados) el evento de sequía agrícola.
- El estudio actual sobre los sistemas de monitoreo de sequía agrícola indica una fortaleza en el análisis cuantitativo y conceptual del evento climático, pero una deficiencia en la evaluación cualitativa. Se evidencia un reducido interés hacia el monitoreo en escala zonal o local *in situ*.

Métodos idóneos para el monitoreo de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores

- El Caferrómetro expone una metodología práctica, a pequeña escala, *in situ*, con rigurosidad en su aspecto cualitativo y cuantitativo, y se diseñó para hacer un seguimiento en tiempo real del estado de humedad en el suelo para prevenir los efectos nocivos de la sequía en los cultivos de café.

Estrategias de mitigación, fortalecimiento de resiliencia y reducción de la vulnerabilidad ante los efectos de la sequía agrícola en un contexto de pequeños caficultores

- El estudio técnico de las necesidades hídricas básicas de la comunidad caficultora de Buesaco se convierte en una herramienta útil para reducir la vulnerabilidad de sus caficultores, pues establece períodos críticos donde la demanda excede la oferta (junio a septiembre), así como el mes con menor demanda (Noviembre).
- Las prácticas agroecológicas consignadas se convierten en herramientas adicionales para la adaptación y mitigación de los efectos de la sequía asociados a la variabilidad y el cambio climático, con el fin de minimizar los riesgos para los caficultores.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Dentro de la gestión integrada del recurso hídrico-GIRH (uso eficiente del recurso hídrico) se propone:

- Ejecutar el Caferrómetro propuesto para validar y evaluar su funcionamiento, comparando los resultados de humedad estimados por el evaporímetro con los estados de humedad medidos por análisis de suelo (equipo de membrana) en condiciones climáticas opuestas, húmedas y secas en diferentes épocas del año.
- Se propone también adaptar y evaluar la metodología diseñada con el Caferrómetro estableciendo las necesidades hídricas de algunos cultivos (definir según contexto) representativos o de interés en una finca agroecológica, construyendo diferentes pluviómetros/evaporímetros (AGRÓMETRO) para el monitoreo de las condiciones hídricas del suelo para cada cultivo, contrastando los estados de humedad por ambos métodos (análisis de suelo y agrómetros) para evaluar su rendimiento y relación.

Finalmente se plantea un proyecto enmarcado en la investigación acción participativa (IAP), donde a partir de un diagnóstico con observación participante y metodología campesino a campesino de la comunidad, teniendo a los campesinos o pequeños productores como actores activos y protagonistas, se desarrollen y ejecuten estrategias de mitigación y adaptación a la VC y CC contextualizadas a las condiciones de la comunidad, de manera que puedan contar con la capacidad técnica y operativa para implementarlas, que fortalezcan la resiliencia y reduzcan la vulnerabilidad de los campesinos ante efectos adversos de eventos climáticos extremos asociados a la VC y CC.

8. REFERENCIAS

- Acevedo, M., Mera, J., Ocampo, C., & Zorrilla, D. (2022). *Informe Tejiendo Saberes sobre ámbito social de la primera salida de campo al municipio de Buesaco, Nariño*.
- Acevedo, M., Mera, J., Ocampo, C., & Zorrilla, D. (2023). *Informe ámbito social de la segunda salida de campo al municipio de Buesaco, Nariño*.
- Acevedo Osorio, Á., & Schneider, S. (2020). Agricultura Campesina, Familiar y Comunitaria: una perspectiva renovada del campesinado para la construcción de paz en Colombia. *Luna Azul*, 50, 132–155. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.50.7>
- Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco. (2015). Consideraciones generales. In *Buesaco Territorio y Memoria* (Vol. 1, pp. 21–29).
- Alcaldía Municipal de Buesaco en Nariño. (2018). Nuestro municipio - Buesaco. Alcaldía Municipal Municipio de Buesaco en Nariño. <http://www.buesaco-narino.gov.co/municipio/nuestro-municipio>.
- Alcaldía Municipal de Buesaco en Nariño. (2022). DIRECTORIO DE ASOCIACIONES Y GRUPOS ASOCIATIVOS MUNICIPIO 2022. <http://www.buesaco-narino.gov.co/informacion-adicional/directorio-de-asociaciones-y-grupos-asociativos-municipio2022>
- Agencia Suiza para el Desarrollo & COSUDE (2010). Implementación de un sistema de alerta temprana para la cuenca del Río Combeima, Departamento del Tolima – Colombia. Bogotá: COSUDE
- Allen, R.; Pereira L.; Raes D. y Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (pp. 9, 10, 78, 79 y 112). Roma, Italia: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- Altieri, M.A. (1995). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. Westview Press, Boulder, CO.
- Altieri, M. (2002). Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 93:1–24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Altieri, M. y Nicholls, C. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología* 8 (1): 7-20. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921>
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2017). Estrategias agroecológicas para enfrentar el cambio climático. *LEISA. Revista de Agroecología*, 2(33), 5-9.
- Anderson, W. B., Zaitchik, B. F., Hain, C. R., Anderson, M. C., Yilmaz, M. T., Mecikalski, J., & Schultz, L. (2012). Towards an integrated soil moisture drought monitor for East Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2893–2913. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2893-2012>

- Anzueto, F. (2020). *Guía de buenas prácticas en el cultivo del café para la adaptación al cambio climático*.
- Araneda C., R. J., Bermúdez, M., & Puertas, J. (2021). Benchmarking of drought and climate indices for agricultural drought monitoring in Argentina. *Science of The Total Environment*, 790, 148090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148090>
- Arcila P, J., Farfán V, F., Moreno B, A., Salazar G, L. F., & Hincapié G, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia (H. F. Ospina O & S. M. Marín L, Eds.). CENICAFE.
- Ardanuy, J. (2012). Breve introducción a la bibliometría. Departament de Biblioteconomia i Documentació, Universitat de Barcelona.
- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Javier L., F. (2010). Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 155–169.
- Arteaga J., J. C., Navia E., J. F., & Castillo, J. A. (2016). Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>
- Arteaga, L. & Burbano, J. (2018). Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(2): 79-91.
- Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120–133.
- Ayala A., I., & Carvajal E., Y. (2017). Estudio de la hidrometeorología mensual de la cuenca alta del río cauca en el departamento del Valle del Cauca durante las fases extremas del fenómeno ENOS.
- Badii, M., Tejada, A. Flores, C. Lopez & Quiróz, H.. (2000). Historia, fundamentos e importancia. Pp. 3-17. En: M. H. Badii, A. E. Flores y L. J. Galán (eds.). *Fundamentos y Perspectivas de Control Biológico*. UANL, Monterrey. <https://www.redalyc.org/pdf/402/40240217.pdf>.
- Bastidas Burbano, K. T., & Botina Ortega, A. J. (2018). CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SUELO Y SU ASOCIACIÓN CON LA MATERIA ORGÁNICA EN DIFERENTES SISTEMAS PRODUCTIVOS, NARIÑO [Trabajo de grado]. UNIVERSIDAD DE NARIÑO.
- Beguiría, S., S.M. Vicente-Serrano, F. Reig and B. La torre (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, vol. 34, no. 10, pp. 3001–3023.

- Biblioteca Universitaria Universidad de Málaga (BUMA). (2023). *Evaluación de la actividad investigadora: Acreditación y Sexenios: Bibliometría*. Las Guías de La Biblioteca. <https://biblioguias.uma.es/Bibliometria>
- Bolten, J. D., Crow, W. T., Zhan, X., Jackson, T. J., & Reynolds, C. A. (2010). Evaluating the Utility of Remotely Sensed Soil Moisture Retrievals for Operational Agricultural Drought Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1), 57–66. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2009.2037163>
- Campos, A., Holm, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F. & Dickson, E. (2012). Resumen ejecutivo. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial. Bogotá.
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., Carvajal-Escobar, Y., & Caicedo-Bravo, E. (2020a). Teleconnections between Monthly Rainfall Variability and Large-Scale Climate Indices in Southwestern Colombia. *Water*, 12(7), 1863. <https://doi.org/10.3390/w12071863>
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Cerón, W. L., & Caicedo-Bravo, E. (2020b). Monthly Rainfall Anomalies Forecasting for Southwestern Colombia Using Artificial Neural Networks Approaches. *Water*, 12(9), 2628. <https://doi.org/10.3390/w12092628>
- Canchala, T., Ocampo-Marulanda, C., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Cerón, W. L., & Caicedo-Bravo, E. (2022). Techniques for monthly rainfall regionalization in southwestern Colombia. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 94(4). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220201000>
- Carvajal, Y. (2012). Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático? *Memorias* (16), 105-119.
- Carvajal, Y., García G., M. & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería & Competitividad*, 9, (1): pp. 17-24.
- Casierra Posada, F., Sánchez, P., Castaño, J., & Viasús, R. (2009). Identificación de la cantidad y frecuencia óptimas de riego para almácigos de café (arábica v. castillo) en la subestación experimental de Cenicafé Santander. *Ciencia y Agricultura*, 7(2), 41–52.
- Celis R., J. A., Vergara A., H. J., & Vanegas B., D. X. (2017). Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir de indicadores eco hidrológicos basados en teledetección. *Revista de Tecnología*, 15(2). <https://doi.org/10.18270/rt.v15i2.2174>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. (2020). Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0002>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé. (2016). Guía: Más Agronomía, Más Productividad. Manizales: Cenicafé.

- Cherlet, M., C. Hutchinson, J. Reynolds, J. Hill, S. Sommer and G. von Maltitz, eds. (2018). World Atlas of Desertification. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- CIMAS. (2009). Metodologías Participativas - Manual. Observatorio Internacional de Ciudadanía y Medio Ambiente Sostenible (CIMAS)
- Coffee & climate. (2015). Climate Change Adaptation in Coffee Production. A step-by-step guide to supporting coffee farmers in adapting to climate change. Coffee & climate. www.coffeeandclimate.org
- Comités de Cafeteros. Informes de comités departamentales. FNC. Colombia, 2013. 132 p.
- Corponariño. (2012). Plan de acción para la prevención y mitigación de los procesos de desertificación y sequía en el enclave Subxerófito del Patía. Pasto. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE NARIÑO
- Corponariño. (2017). Plan de Gestión Ambiental Regional del departamento de Nariño. PGAR 2016 2036. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE NARIÑO
- Crow, W. T., Kumar, S. V., & Bolten, J. D. (2012). On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3451–3460. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3451-2012>
- DANE (2020). Cuentas nacionales año 2020, información consolidada de PIB. Colombia.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 1, pp. 52–58.
- Dai, A., T. Zhao and J. Chen (2018). Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, vol. 4, no. 3, pp. 301–312.
- Dalezios, N. R., Blanta, A., and Spyropoulos, N. V. (2012). Assessment of remotely sensed drought features in vulnerable agriculture, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3139–3150, doi:10.5194/nhess-12-3139-2012
- Dávila R., M., Guzmán S., R., Arroyo, H. M., Piñeres H., D., de La, D., Barranco, R., & Caballero U., C. v. (2009). Bibliometría: conceptos y utilidades para el estudio médico y la formación profesional. *Salud Uninorte*, 25(2), 319–330.
- Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. (2020). Cadena café 1° Trimestre 2020. *Ministerio de Agricultura*.
- Domínguez C., E., & Lozano B., S. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(148).
- Du L., Tian Q., Yu T. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 245–253.

- Duarte, O., Ríos, G., & Silva, J. (1996). Conceptos básicos sobre la metodología de sistemas de producción. En Instituto Colombiano Agropecuario (Ed.), Módulos para la capacitación metodológica de las UMATA (pp. 1–16). ICA.
- Dutra, E., W. Pozzi, F. Wetterhall, F.D. Giuseppe, L. Magnusson, G. Naumann, P. Barbosa, J. Vogt and F. Pappenberger (2014). Global meteorological drought–Part 2: Seasonal forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 7, pp. 2669–2678.
- Estrategia internacional para la reducción de desastres. Organización de las Naciones Unidas. (EIRD/ONU). (2013) <www.eird.org/eng/revista/no-16-2009/art18.html> Consultada el 20/10/2013.
- ELSEVIER. (2023, November). *What is Field-weighted Citation Impact (FWCI)?* Scopus: Access and Use Support Center. https://service-elsevier-com.bd.univalle.edu.co/app/answers/detail/a_id/14894/supporthub/scopus/related/1/session
- European Drought Observatory - JRC European Commission. (2022). *What is Drought?*. <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1001>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC, Centro Nacional de Investigaciones del Café-Cenicafé, & Fondo Nacional del Café-FoNC. (2015). Informe Anual Cenicafé 2015. <https://doi.org/10.38141/10783/2015>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). Ensayos sobre Economía Cafetera. *Federación Nacional de Cafeteros*, 34(1), 5–6. <https://federaciondefcafeteros.org>
- Federación Nacional de Cafeteros, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Anthesis Lavola. (2017). Nama café de Colombia: Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiaada (NAMA) en el Sector Cafetero de Colombia (Low Emission Capacity Building Programme). <http://hdl.handle.net/10778/4255>.
- Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Stahl, K., Hannah, D.M. (2010). Intercomparison of weather and circulation type classifications for hydrological drought development. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 35 (9), 507–515.
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2018). The 10 elements of agroecology: guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. <http://www.fao.org/3/i9037en/i9037en.pdf>
- Fundación Pro Cuencas del Río Las Piedras. (2013). Sistema de alertas agroclimáticas tempranas (SAAT) participativas con organizaciones y familias de custodios indígenas y campesinos de la cuenca alta del río Cauca. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Fuganti, G., Minelli, M., & Rojas, Ó. (2020). Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola. In Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb0624es>

- Gates, D. M., (1970): Physical and physiological properties of plants. *Remote Sensing with Specific Reference to Agriculture and Forestry*, National Academy of Sciences, 224-252
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gauthier, E. (1998). *Bibliometric Analysis of Scientific and Technological Research: A User's Guide to the Methodology*. Science and Technology Redesign Project Statistics, Ottawa, Ontario, Canada: Observatoire des Sciences et des Technologies (CIRST)
- Gavilánez L., F. C., & Farias C., S. R. (2019). Method of the cenirrometro as an alternative to scheduling irrigation by aspersion in cocoa crop (*Theobroma cacao*). *Acta Agronomica*, 68(1), 29–34. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n1.70370>.
- Giraldo J., Jaramillo R., A. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrientes en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo. *Cenicafé* 55(1):52-68.2004.
- Gitelson, A. A., and M. N. Merzlyak. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.*, 18, 2691-2697.
- Gliessman, S.R. (1998). *Agroecology: Ecological Process in Sustainable Agriculture*. Ann Arbor Press, Ann Arbor, MI.
- Gómez, L., Antonio, G., José, C. R., & Baldión, V. (1991). Ecotopos cafeteros de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/818>
- Gobernación de Nariño. (2016). Ordenanza No. 012, Por la cual se adopta el Plan de Desarrollo Departamental “Nariño Corazón del Mundo”, para el periodo constitucional 2016 – 2019. Recuperado de http://xn--nario-rta.gov.co/inicio/files/PlanDesarrollo/Plan_De_Desarrollo_Nario_corazn_Del_Mundo.pdf
- Gómez B., J. A., & C., M. C. (2018). Actualización de las estadísticas de la sequía en Colombia - Nota Técnica del IDEAM.
- González L., Nathalia., Carvajal E., Yesid., & Loaiza C., Wilmar. (2016). Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(48), 101-113. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a07
- González F., R., Cisneros Z., E., & Montilla, E. (2017). The coffee tree (*Coffea arabica* L.) response to water deficit in different development phases. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(3), 4–11.
- Gobernación de Nariño. (2020). *Plan de Desarrollo Departamental “Mi Nariño, en Defensa de lo Nuestro” 2020-2023*. <https://sitio.narino.gov.co/plan-de-desarrollo/>
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113–121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>

- Heim Jr, R.R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, no. 8, pp. 1149–1166.
- Hu, X., Ren, H., Tansey, K., Zheng, Y., Ghent, D., Liu, X., & Yan, L. (2019). Agricultural drought monitoring using European Space Agency Sentinel 3A land surface temperature and normalized difference vegetation index imageries. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107707>
- Hurtado, G., & Mayorga Márquez, R. (2006). *La sequía en Colombia*. Bogotá, Colombia: IDEAM.
- Hurtado, G. (2012). *Sequía Meteorológica y sequía Agrícola en Colombia - Incidencia actual y Tendencias*. Bogotá: IDEAM.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J, Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress–degree–day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24, 45–55.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Nariño (Vol. 1)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor and P.M. Midgley, eds]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp..
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr., P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17, 1133–1138.
- Jaramillo, A. (2000). Climatología de la región andina de Colombia: Microclima y fenología del cultivo del café. *Cenicafé*.
- Jaramillo, R. A.; Chaves, C.B. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque yen plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé (Colombia)*: 50(2):97-105.1999.
- Jaramillo, R., A. (2005). Clima andino y café en Colombia. Chinchiná, *Cenicafé*. 196 p.
- Jaramillo, R., A. (2005a). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 29(112), 371-382.

- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Jaramillo, Á. & Arcila, J. (2009). Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento del niño y su efecto en la caficultura. Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/1133/1/avt0390.pdf>.
- JRC Global Drought Observatory (GDO). (2021). *GDO Analytical Report - Droughts in South America - 10 years overview December 2021*. https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/news/GDODroughtNews202109_La_Plata_Basin.pdf
- Khan Academy. (2023). *Plantas C3, C4 y CAM ¿Cómo las vías C4 y CAM ayudan a reducir al mínimo la fotorrespiración?* Es.Khanacademy.Org. <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/photorespiration--c3-c4-cam-plants/a/c3-c4-and-cam-plants-agriculture>
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., Panov, N., & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *Journal of Climate*, 23(3), 618–633. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1405–1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621–636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Kogan, F. N. (2001). Operational Space Technology for Global Vegetation Assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949–1964. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2)
- Lagos B., Criollo E., García A., Muñoz B., López G., Benavides A., Dulce D.. El cultivo del Café (*coffea arabica* L.) en Nariño: cartilla divulgativa (2019). San Juan de Pasto: Editorial Universidad de Nariño, 2019. 60 p. : il., col.
- Laboratorio de Suelos y Aguas Universidad del Valle – LASA. (2015). Prácticas de Laboratorio de Suelos. 7 p.
- Lhommé J.P., Gómez L., Jaramillo R.A. (1984). Modelo matemático del balance hídrico. *Turrialba* 34(4):503- 507.

- Li, Y., Strapasson, A., & Rojas, O. (2020). Assessment of El Niño and La Niña impacts on China: Enhancing the Early Warning System on Food and Agriculture. *Weather and Climate Extremes*, 27, 100208. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100208>
- Lin BB. (2011). Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience* 61: 183–193.
- Liu, W. T., and F. N. Kogan. (1996). Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 2761-2782.
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Li, S., Liu, Y., & Ma, Y. (2016). Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 26(6), 750–767. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>.
- Loaiza Cerón, W., Carvajal Escobar, Y., & Baquero Montoya, O. L. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos*, 76(279), 557–578. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201520>.
- López G., J.-D., Carvajal E., Y., & Enciso A., A.M. (2017). Sistemas de alerta temprana con enfoque participativo: un desafío para la gestión del riesgo en Colombia. *Luna Azul*, 44, 231–246. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.44.14>.
- López Piñero, José M. (1972). *El análisis estadístico y sociométrico de la literatura científica*. València: Facultad de Medicina.
- Martínez F., J., González Z., A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., & Herrero J., C. M. (2016). Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sensing of Environment*, 177, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.064>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Mera, J. D. (2023) Evaluación espaciotemporal de la sequía hidrometeorológica en la cuenca alta del río patía empleando índices estandarizados de precipitación y caudal. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia
- Myers, V. I. (1970). Soil, water, and plant relations. *Remote Sensing with Specific Reference to Agriculture and Forestry*, National Academy of Sciences, 253-267.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014). Evaluaciones Agropecuarias Municipales. República de Colombia. Estadísticas AGRONET. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx#>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (Diciembre 29 2017). Resolución 494 por la cual se adoptan los lineamientos estratégicos de política pública para la agricultura campesina, familiar y comunitaria. Recuperado de

<https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Resoluciones/Resoluci%C3%B3n%20No%20000464%20de%202017.pdf>

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Agencia de Desarrollo Rural, & Unión Europea. (2018). *Lineamientos estratégicos de política pública - Agricultura Campesina Familiar y Comunitaria ACFC*.
- Mishra A K, Desai V R. (2005). Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India. *International Journal of River Basin Management*, 3(1): 31–41.
- Mishra A K, Singh V P. (2009). Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D6).
- Mishra A K, Singh V P, Desai V R. (2009). Drought characterization: A probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1): 41–55.
- Montealegre, E., & Pabón, J. (2002). Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. *Meteorología Colombiana*. 5:59-65. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Montealegre B., Jose. E. (2009). *Estudio de la Variabilidad Climática de la Precipitación en Colombia asociada a Procesos Oceánicos y Atmosféricos de Meso y Gran Escala*.
- Monzoli CA, Partelli LF, Gontijo I, Zucoloto M (2015) Distribuição do sistema radicular de cafeeiro conilon irrigado e não irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50: 1006-1016.
- Moreno, A. M. (2007). Fundamentos sobre sistemas de producción. En J. Arcila, F.F. Farfán, A. M. Moreno, L.F. Salazar, & E. Hincapié (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 15-20). Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Muñoz, L. (2014). Ensayos sobre economía cafetera. Federación Nacional de Cafeteros. Colombia. 119 p.
- Nalbantis, I., Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour. Manage* 23 (5), 881–897.
- Norato, L. (2012). IMPACTO DEL EFECTO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DEPARTAMENTAL DE CAFÉ EN COLOMBIA EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c4345865-7b09-4c4e-8585-f8878ab215eb/content>
- Núñez, D. (2013). Variabilidad de la sequía meteorológica de largo plazo en la parte mexicana de la Cuenca del río bravo, Tesis; Universidad Autónoma de Nuevo León, facultad de ciencias forestales; Linares, Nuevo León, México.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. Organización Meteorológica Mundial.

- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016). Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.
- Ortega G., D., Ceballos T, J. A., Ordoñez S., A., & Castellano B, H. V. (2021). Agricultural Drought Risk Assessment: A Spatial Analysis of Hazard, Exposure, and Vulnerability in Zacatecas, Mexico. *Water*, 13(10), 1431. <https://doi.org/10.3390/w13101431>.
- Ochsner, T. E., Cosh, M. H., Cuenca, R. H., Dorigo, W. A., Draper, C. S., Hagimoto, Y., Kerr, Y. H., Larson, K. M., Njoku, E. G., Small, E. E., & Zreda, M. (2013). State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6), 1888–1919. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0093>.
- Palmer W C. (1965). Meteorological drought, 30. US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, DC, USA.
- Palmer, W. C. (1968) Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21:4, 156-161, DOI: 10.1080/00431672.1968.9932814
- Pereira B.I.; Da Silva A.L.; Reichard K.; Dourado-Neto D.; Oliveira Santos B.O.; Volpe C.A. (2007) Comparison between climatological and field water balances for coffee crop. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Braz).64(3):215-220.
- Pérez B., J., Martínez G., M. T., & Hernández G., S. A. (2017). Evaluación inicial sobre el status quo de los sistemas de alerta temprana contra la sequía en Colombia. *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Colombia
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista Ciencias de la Tierra* 28 (107), pp. 201-221.
- Poveda J.G.; Ramírez J.M., Jaramillo R.A. (2002). Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. *Avances en recursos hidráulicos* 9:47-56.2002
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Prieto R, M., & March C, J. (2002). Paso a paso en el diseño de un estudio mediante grupos focales. *Aten Primaria* , 29(6), 366–373.
- Puertas, O, & Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Rev. Ingeniería y Desarrollo*, (23) 104-118 pág.

- Quintero A., M., Carvajal E., Y., & Aldunce, P. (2012). Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo. *Luna Azul*, 34, 257–271. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321727348015>
- Ramírez B.V.H.; Jaramillo, R.A. (2007). Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales de la zona andina. *Inves.Unisarc.Bol.* 5(1):19-33. 2007.
- Ramírez, V. H., & Jaramillo, A. (2009). Relación del índice oceánico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia. *Revista Cenicafé*, 60(2), 161-172. <http://hdl.handle.net/10778/228>
- Ramírez B., V. H., Jaramillo R., Á., & Arcila P., J. (2010a). Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé*, 61(1), 55–66.
- Ramírez B., V. H., Jaramillo R., Á., Arcila P., J., & Montoya R., E. C. (2010b). Estimación de la humedad del suelo en cafetales a libre exposición solar. *Cenicafé*, 61(3), 252–261.
- Ramírez B., V. H., Gaitán B., Á. L., Benavides M., P., Constantino C., L. M., Gil P., Z. N., Sadeghian K., S., & González O., H. (2014). Recomendaciones para la reducción del riesgo en la caficultura de Colombia ante un evento climático de El Niño. www.cenicafe.org.
- Ravelo, A. C.; Planchuelo, A. M.; Zanvettor, R. E.; Boletta, P. E. C. (2016). Drought monitoring and assessment system for Argentina. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120.
- Research Rabbit. (2023). *Research Rabbit*. [Researchrabbit.Ai. https://www.researchrabbit.ai/](https://www.researchrabbit.ai/)
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2875–2887. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- Ritchie, T.J. (1991). Specifications for the ideal model for predicting crop yields. In: Muchow, R.S.; Bellamy, J.A. (Eds.). *Climate risk in crop production: models and management for semiarid tropics and subtropics*. Wallingford, CAB. p. 97-122.
- Rojas, O. (2020). Agricultural extreme drought assessment at global level using the FAO-Agricultural Stress Index System (ASIS). *Weather and Climate Extremes*, 27, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.09.001>
- Rojas, O. (2021). Next Generation Agricultural Stress Index System (ASIS) for Agricultural Drought Monitoring. *Remote Sensing*, 13(5), 959. <https://doi.org/10.3390/rs13050959>
- Rueda F. O. A.; Poveda J. G.; Jaramillo, R. A. (2009). Modelación probabilística de la humedad del suelo y del estrés hídrico bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera: Variabilidad estacional y los efectos del ENSO. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. En impresión. 31p. 2009

- Saldaña Z, S.R. (2007). Socioeconomic vulnerability to natural disasters in Mexico: rural poor, trade and public response. CEPAL Report 92, UN-ECLAC, Disaster Evaluation Unit, Mexico, ISBN 978-92-1-121661-5.
- Sarandón, S.J. (2002). Incorporando el enfoque agroecológico en las Instituciones de Educación Agrícola Superior: la formación de profesionales para una agricultura sustentable. *Revista Agroecología e Desenvolvimento Rural Sustentável*. EMATER RS, Brasil, 3 (2):40-49.
- Sarandón, S.J. y Flores, C. (2012). La Agroecología: un paradigma emergente para el logro de un Desarrollo Rural Sustentable. In Frédéric Goulet, Danièle Magda, Nathalie Girard et Sarandón & Flores Agroecología y agricultura sustentable 69 Valeria Hernandez (Eds.) *L'agroécologie en Argentine et en France. Regards croisés*. Editions de L'Harmattan. Paris, France, III: 91-119.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- Saxton, K. y Rawls, W. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (70):1569-1578. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sedano C., K., Carvajal E., Y., & Ávila D., Á. (2011). ¿Cómo nos afecta el cambio climático en Colombia? Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *SEMILLAS*, 46(47), 47-53.
- Sedano, K. (2012). Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia-Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Serna G., C. A., & Farfán V., F. (2018). Implementación de prácticas de adaptación a eventos climáticos extremos en el sector cafetero de Colombia. In *Fondo Nacional de Café*.
- Sheffield, J., E.F. Wood, N. Chaney, K. Guan, S. Sadri, X. Yuan, L. Olang, A. Amani, A. Ali, S. Demuth and L. Ogallo (2014). A drought monitoring and forecasting system for sub-Sahara African water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 95, no. 6, pp. 861-882.
- SIATA. (2014). Sistema de Alerta Temprana Ambiental. Fecha de consulta: 26 de enero de 2022. Disponible en: https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/
- SIRE (2014). Sistema Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Fecha de consulta: 26 de enero de 2022. Disponible en: <http://www.sire.gov.co/>.
- Solano L., E., Castellanos Q., S. J., López R., M. M., & Hernández F., J. I. (2009). La bibliometría una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *Medisur*, 7(4).

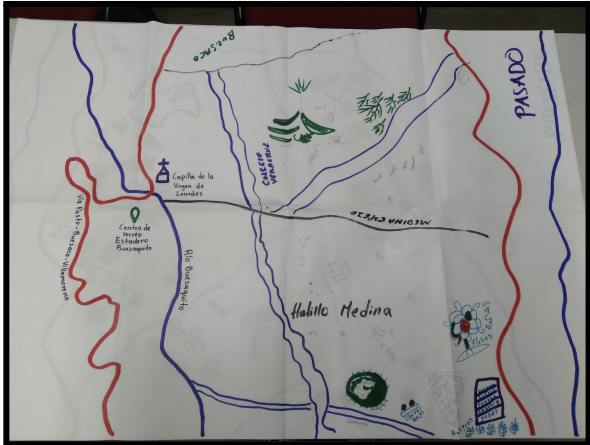
- Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Chang, L. Y., & Minh, V. Q. (2012). Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 417–427. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.014>
- Spinak, Ernesto (1996). *Diccionario enciclopédico de Bibliometría, Cienciometría e Infometría*. Caracas: UNESCO.
- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
- Svoboda, M.D., B.A. Fuchs, C.C. Poulsen and J.R. Nothwehr (2015). The drought risk atlas: Enhancing decision support for drought risk management in the United States. *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 274–286.
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A. (2004). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, vol. 48. Elsevier.
- Tian, L., Yuan, S., & Quiring, S. M. (2018). Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-central United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.024>
- Torres, J., & Cruz, R. (1995). El Cenirrómetro. Julio. *Serie Divulgativa*, 2.
- Torres A., J.S.; Cruz V., R.; Villegas T., F. (2004). Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar. Segunda edición. Cali, Cenicaña. 66p. (Serie Técnica no.33).
- Torres S., D., Ruiz P., R., & Delgado L. Cózar, E. (2009). Google Scholar como herramienta para la evaluación científica. *El Profesional de La Información*, 18(5), 501–510. <https://doi.org/10.3145/epi.2009.sep.03>
- Trenberth, K.E., A. Dai, G. Van Der Schrier, P.D. Jones, J. Barichivich, K.R. Briffa and J. Sheffield (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, vol. 4, no. 1, pp. 17–22.
- Tucker, C. J., and P. J. Sellers (1986). Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.*, 7, 1395-1416.
- Turbay, S.; Nates, B.; Jaramillo, F.; Vélez, J.J. y Ocampo, O.L. (2015). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(85), 95- 112. <https://doi.org/10.14350/rig.42298>.
- Unganai, L. S., and F. N. Kogan. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. *Remote Sens. Env.*, 63, 219-232.

- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2017). *Evaluación inicial sobre el status quo de los sistemas de alerta temprana contra la sequía en Colombia*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNODRR), & IDEAM. (2018). Estrategia Nacional para la Gestión Integral de la Sequía en Colombia.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNODRR). (2021). *GAR Special Report on Drought 2021*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Geneva
- United Nations | UN. (2022, March). *Un sistema de alerta temprana advertirá de los fenómenos climáticos a todos los habitantes del planeta*. <https://news.un.org/es/story/2022/03/1506022>
- Vandermeer, J. (1995). The ecological basis of alternative agriculture. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 26, 201–224.
- Van Loon, A.F., T. Gleeson, J. Clark, A.I. Van Dijk, K. Stahl, J. Hannaford, G. Di Baldassarre, A. J. Teuling, L. M. Tallaksen, R. Uijlenhoet, D. M. Hannah, J. Sheffield, M. Svoboda, B. Verbeiren, T. Wagener, S. Rangecroft, N. Wanders and H.A. Van Lanen (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, vol. 9, no. 2, pp. 89–91.
- Van Loon, A. F., Tjeldeman, E., Wanders, N., Van Lanen, H. A. J., Teuling, A. J., & Uijlenhoet, R. (2014). How climate seasonality modifies drought duration and deficit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(8), 4640–4656. <https://doi.org/10.1002/2013JD020383>
- Vega Viviescas, C. (2019). *Análisis de sequías meteorológicas e hidrológicas en la Macrocuena Magdalena – Cauca (McMC) para el período 1980-2010 [Magister en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia]*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69784>
- Velásquez F. S.; Jaramillo R. A. (2009) Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009
- Vergara V, H. (2015). Patrones de la vegetación y tipos de uso de la tierra en el Valle del Patía. *Colombia Forestal*, 18(1), 25-45
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1–27. <https://doi.org/10.1175/2012EI000434.1>
- Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004). Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 61–72. <https://doi.org/10.1080/0143116031000115328>

- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Wilhite, D.A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: D.A. Wilhite (Editor), *Drought: a global assessment*. Routledge, New York, pp. 1-18.
- Wilhite, D.A., M.V. Sivakumar and R. Pulwarty (2014). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*, vol. 3, pp. 4–13.
- Zampieri, M., A. Ceglar, F. Dentener and A. T. (2017). Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*, vol. 12, no. 6, 064008.
- Zhang, J., Mu, Q., & Huang, J. (2016). Assessing the remotely sensed Drought Severity Index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China. *Ecological Indicators*, 63, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.062>.
- Zhang, X., Chen, N., Li, J., Chen, Z., & Niyogi, D. (2017). Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 188, 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.045>

9. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de cartografía social: elementos del pasado del territorio de Buesaco, Nariño

ELEMENTOS	MAPA
• Cultivos de flores como las rosas, cultivos de papa, maíz, cebada, trigo, frijol, arveja. • Había ganado, en poca cantidad. • Mayor cobertura boscosa • Mayor fuente de aguas: Arroyos, quebradas • Mayor cantidad de nutrientes en el suelo • Mayor cantidad de personas se dedicaban a las labores agrícolas	

Fuente: Acevedo et al. (2022)

Anexo 2. Resultados de cartografía social: elementos del presente del territorio de Buesaco, Nariño

ELEMENTOS	MAPA
• Grandes extensiones de cultivo de café • Cultivos de: plátano, yuca, mandarina, naranja, piña • Menor área boscosa • Disminución de fuentes hídricas • Menor área para ganado • Menor cantidad de nutrientes en el suelo • Mayor uso de agroquímicos • Mayor migración de jóvenes a la ciudad capital	

Fuente: Acevedo et al. (2022)

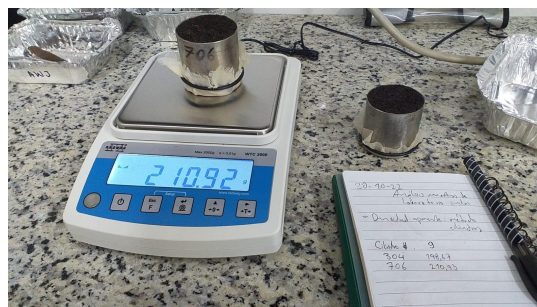
Anexo 3. Equipo de membrana de humedad-LASA



Anexo 4. Batidora de dispersión de suelos Hamilton -LASA

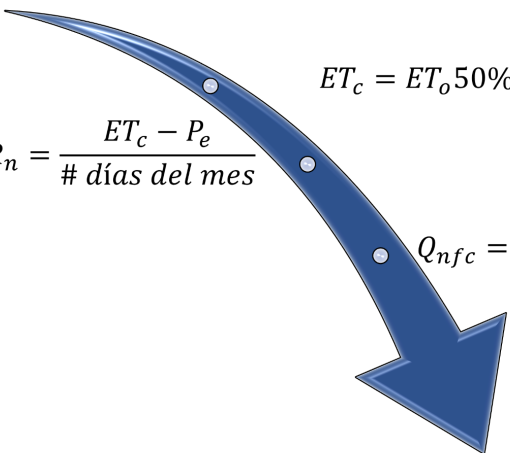


Anexo 5. Balanza electrónica-LASA



Anexo 6. Proceso para hallar la necesidad de riego neta (NRn) y el caudal de flujo continuo total (Qpfc)

$$P_e = \text{Precipitación75\%} * \frac{125 - (0.2 * \text{Precipitación75\%})}{125}$$



$$ET_c = ET_o 50\% * K_{c\text{café}}$$

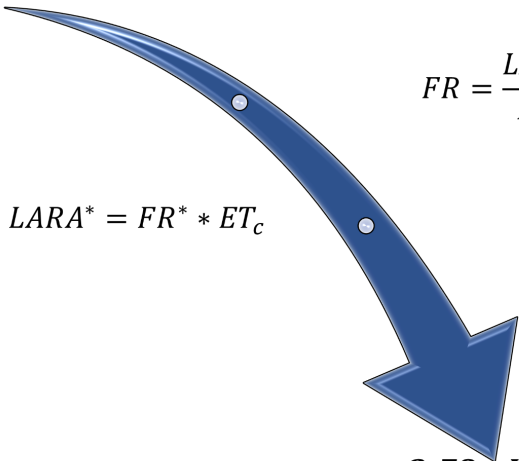
$$NR_n = \frac{ET_c - P_e}{\# \text{ días del mes}}$$

$$Q_{nfc} = NR_n * 0,116$$

$$Q_{pfc} = \frac{Q_{nfc}}{E_p}$$

Anexo 7. Proceso para hallar el caudal de flujo continuo total (Qpfc) para el caso de la finca de Guillermo Valencia

$$LARA = \frac{CC - PMP}{100} * (P * 10) * D_a * \frac{f}{100}$$



$$FR = \frac{LARA}{ET_c}$$

$$LARA^* = FR^* * ET_c$$

$$Q_{pfc} = \frac{2,78 * LARA^* * \text{Área}}{FR^* * 8 * E_p}$$

Anexo 8. Rúbrica de medición objetivo específico 3.

Orden	Criterios	Aplicabilidad (aplica/no aplica)
1	Zona Andina (Alto Patía)	
2	Sector agrícola de campesinos	
3	Cultivo de café	
4	Medida de adaptación y mitigación ante el CC y VC que reduce el riesgo de estrés hídrico por sequía agrícola	
5	Fortalecimiento de la resiliencia: propende la...	integración mano de obra familiar
		capacitación - formación
		participación - integración comunidad
		agregación
6	Disminución de la vulnerabilidad: propende la...	disminución del gasto y costos de producción
		mejora en la rentabilidad del sistema productivo
7	Sostenibilidad - Protección recursos naturales - Agroecología	

Anexo 9. Características ecológicas zona altiplanicie de Nariño

Clima (temperatura promedio)	Altura (msnm)	Precipitación media anual (mm)
Frío húmedo y muy húmedo	2000-3000	1000-4000
Frío seco (12-18°C)	2200-3020	< 1000
Medio húmedo y muy húmedo	1300-2000	1000-4000
Medio muy húmedo y pluvial (19°C)	1300-1800	4000-4600 (excesivas)
Medio seco (18-24°C)	1000-2000	500-1000 (escasas y mal distribuidas)
Cálido seco y muy seco (>24°C)	500-1000	500-1500

Fuente: IGAC (2004)

Anexo 10. Resultados del análisis físico de las muestras disturbadas del suelo en Buesaco, Nariño

Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas (%)	Textura
35	37	28	FAr

[ANÁLISIS DE TEXTURA DE MUESTRAS DE SUELO EN VEREDA VERACRUZ, BUESACO-NARIÑO](#)