



MONITOREO CLIMÁTICO: HERRAMIENTA AL SERVICIO DE LA CAFICULTURA COLOMBIANA



MONITOREO CLIMÁTICO: HERRAMIENTA AL SERVICIO DE LA CAFICULTURA COLOMBIANA

Ninibeth Sarmiento***

Carolina Ramírez***

Álvaro Jaramillo**

Alexander Restrepo***

Juan Carlos García López*

* Investigador Científico I

** Investigador Senior

*** Asistente de Investigación

Disciplina de Agroclimatología

Centro Nacional de Investigaciones de Café

Cenicafé

GESTIÓN INTELIGENTE DEL AGUA



AGUA
RESPONSABILIDAD
DE TODOS



AGUA
PARA UNA
CAFICULTURA
SOSTENIBLE



ECOSISTEMAS
HÍDRICOS
ESTRATÉGICOS



DECISIONES
RESPONSABLES
FRENTE AL
AGUA

**Familias cafeteras
en las microcuencas**

- Dirección y administración
- Buen gobierno
- Género
- Monitoreo y evaluación
- Manejo de riesgos
- Responsabilidad social

Gestión Inteligente del Agua - Manos al Agua es una asociación público-privada que generó un modelo para habilitar y mejorar los sistemas para la cooperación intersectorial, la caficultura sostenible, la protección ambiental y la toma de decisiones, que ha permitido contribuir a enfrentar los desafíos del desbalance hídrico para el sector cafetero y su cadena de valor, estableciendo condiciones ambientales, sociales y productivas para reducir la pobreza, mejorar el bienestar rural, contribuir a la paz y alcanzar el desarrollo sostenible en la zona rural colombiana.



MONITOREO CLIMÁTICO: HERRAMIENTA AL SERVICIO DE LA CAFICULTURA COLOMBIANA



DECISIONES RESPONSABLES FRENTE AL AGUA

Es un Proyecto a cinco años que trabajó en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Nariño y Valle del Cauca, con un enfoque de manejo de 25 microcuencas en función de la gestión integral del recurso hídrico, vinculando a más de 11.630 familias caficultoras, en una zona de intervención de 148.754 hectáreas.



Socios Fundadores

Roberto Vélez Vallejo
Gerente General
Federación Nacional de Cafeteros (FNC)

Jean-Marc Duvoisin
CEO, Nespresso

Mark Schneider
Chief Executive Officer
Nestlé

Alejandro Gamboa Castilla
Director General
Agencia de Cooperación Internacional de Colombia
APC Colombia

Wageningen University and Research

Álvaro L. Gaitán Bustamante
Director Cenicafé

Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países
Bajos y Netherlands Enterprise Agency

Comité Directivo

Marcelo Burity
Green Coffee Development
Nestlé

Paulo Barone
Sustainability Program - Coffee
Nespresso

Charon Zondervan
Wageningen University and Research
Programme Coordinator
Environmental Sciences Group

Hernando Duque Orrego
Gerente Técnico
FNC

Director del Proyecto Manos al Agua (FNC)

Rodrigo Calderón Correa

Comité Técnico Científico

Wouter Wolters
Wageningen University and Research
Environmental Research

Carlo Conforto Galli
Technical Manager Water Resources
Nestlé

Nelson Rodríguez
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Laura Miguel Ayala
Wageningen University and Research
Environmental Research

Comité Operativo

Ricardo Piedrahita
Strategic Sourcing and Sustainability Manager
Supply Chain
Nestlé Colombia

Santiago Arango
Green Coffee Project Manager
Nespresso Colombia

Nelson Rodríguez
Ph.D en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Investigador científico
Cenicafé, FNC
Equipo Administrativo, Coordinador, Científico y
Técnico del Proyecto

Comité Editorial Cenicafé

Álvaro León Gaitán Bustamante
Ph.D. Director - Cenicafé

Pablo Benavides Machado
Ph.D. Ing. Agrónomo
Entomología - Cenicafé

Juan Rodrigo Sanz Uribe
Ph.D. Ing. Mecánico
Poscosecha - Cenicafé

Carmenza Esther Góngora Botero
Ph.D. Microbióloga
Entomología - Cenicafé

José Ricardo Acuña Zornosa
Ph.D. Microbiólogo
Fisiología - Cenicafé

Siavosh Sadeghian Khalajabadi
Ph.D. Ing. Agrónomo
Suelos - Cenicafé

Secretaría técnica del Comité editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín López
Ing. Agrónoma M.Sc.

Revisión textos Proyecto GIA
Paola Castaño Aristizábal

Revisión editorial
Laura Alexandra Laitón Jiménez
Ing. Agrónoma M.Sc. - Cenicafé

Diseño y diagramación
Paula Andrea Marroquín Bonilla

Fotografías
Archivo Cenicafé
David Bonilla Abreo

Mapas
Juan Camilo Espinosa Osorio

Impreso por
Javegraf

Tabla de contenido

	Resumen	6
1	Introducción	9
2	Red Meteorológica Cafetera	13
	Antecedentes	14
	Aspectos técnicos	16
	Selección del sitio.....	32
	Sistema de adquisición, procesamiento y transmisión de información.....	34
	Sistema de comunicación y transmisión de datos.....	35
	Requerimientos climatológicos.....	37
	Mantenimiento.....	37
	Documentación de las estaciones meteorológicas.....	38
	Elementos de monitoreo	40
	Precipitación.....	40
	Temperatura y humedad relativa.....	42
	Radiación global.....	43
	Velocidad del viento.....	44
3	Control de calidad y estimación estadística de la información meteorológica	49
	Criterios de referencia según la Organización Meteorológica Mundial.....	50
	Métodos de control de calidad de información meteorológica.....	51
	Metodologías de estimación estadística de los datos meteorológicos.....	58
4	Balance hídrico como herramientas de monitoreo en los sistemas de producción de café	61
	Componentes del balance hídrico agroclimático	62
	Lluvia efectiva.....	62
	Evapotranspiración de referencia y de cultivo.....	64
	Capacidad de retención de humedad.....	67
	Método del balance hídrico para el cultivo de café	70
5	Índices de déficit y exceso hídrico	77
	Supuestos para la construcción de déficit y exceso.....	78
	Déficit hídrico vs. Etapa fisiológica del cultivo de café.....	81
	Exceso hídrico vs. Etapa fisiológica del cultivo de café.....	85
	Alternativas de adaptación.....	88
5	Sistema de apoyo a la toma de decisiones para la caficultura	93
	Plataforma agroclimática cafetera.....	94
	Boletín Agroclimático hídrico.....	98
	Aplicativo de balance hídrico.....	98
	Intercambio de saberes Investigación-Extensión-Caficultor.....	100
7	Conclusiones y recomendaciones	105
8	Literatura citada	108



RESUMEN

Desde sus inicios, la Federación Nacional de Cafeteros ha desarrollado la estrategia de implementación de estaciones meteorológicas a lo largo y ancho del territorio cafetero colombiano. Dicha implementación inició en el año 1941 con la instalación de estaciones meteorológicas convencionales, y hoy continúa contando hoy con una red meteorológica conformada por 210 puestos de observación convencional. Desde el año 2013, en el marco de un convenio con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la Federación Nacional de Cafeteros dio inicio a la implementación de una red meteorológica automática, con 107 estaciones.

Entre los años 2015 y 2017, en el marco del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua, como parte de la estrategia de monitoreo climático, se instalaron 25 estaciones meteorológicas automáticas en las microcuencas seleccionadas dentro de los departamentos cafeteros de Antioquia, Caldas, Cauca, Nariño y Valle del Cauca. Con la instalación se generó información climática en el área de las microcuencas y se fortaleció la Red Meteorológica Cafetera, incrementando la cobertura de monitoreo en los departamentos de intervención.

La implementación de la red meteorológica permitió aprender lecciones importantes sobre la instalación y operación de las estaciones, el manejo de la información climática y la generación de productos de investigación con aplicación a la caficultura.

La estrategia de monitoreo climático del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua tuvo como objetivo generar alertas tempranas por condiciones extremas de humedad en el suelo que pueden afectar el cultivo de café, y disponer de esta información para la toma de decisiones oportunas, determinadas a partir del cálculo del balance hídrico, haciendo uso de la información de la Red Meteorológica Cafetera.

Para el cumplimiento de dicho objetivo, luego de la instalación de las estaciones meteorológicas, se hizo el seguimiento, análisis y validación de la información climática. El seguimiento se realizó mediante la implementación de plataformas de monitoreo que permiten consultar el estado de los componentes de las estaciones para la programación de actividades de mantenimiento. Para el análisis y validación se desarrolló y aplicó una metodología de control de calidad que incluye técnicas, procedimientos y test que permiten identificar errores y depurar la información registrada por las estaciones meteorológicas.

Se identificó que la presencia de información faltante es un problema recurrente en las series meteorológicas y esta puede deberse a diferentes causas, entre ellas el daño de los instrumentos o mal funcionamiento de los mismos, fallas en la transmisión o en el sistema de alimentación de energía, o como resultado del control de calidad. Teniendo en cuenta que el cálculo de la evapotranspiración de referencia y del balance hídrico requiere información completa en el período de estudio, se definió para cada estación automática una estación de referencia con base en análisis estadístico y relaciones altitudinales y de distancia. La selección de estaciones de referencia permitió validar los datos a nivel regional y estimar los períodos faltantes cuando existe un comportamiento similar en las series meteorológicas.

Para el cálculo del balance hídrico del cultivo de café se utilizó la metodología desarrollada por Thornthwaite y Mather, adaptada por Jaramillo (1982, 2002), para la zona cafetera colombiana, la cual tiene en cuenta las características físicas del suelo, algunas variables de intercambio gaseoso del cultivo (evapotranspiración real y potencial) y las condiciones climáticas de la zona (radiación solar, lluvia, humedad relativa y temperatura).

Para la determinación de la capacidad de retención de humedad de los suelos de la zona cafetera se emplearon diferentes fuentes de información: la toma de muestras de suelo en el área en la que están instaladas las estaciones meteorológicas para la evaluación y la información disponible de las propiedades físicas, las unidades de suelo y los estudios de ecotopos cafeteros.

Usando la información meteorológica y de suelo se implementó la rutina de balance hídrico decadiario (cada diez días), para un cultivo en producción en las estaciones automáticas de los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle del Cauca, Cauca y Nariño; además se obtuvieron los valores de exceso y déficit hídricos, así como el índice de humedad.

El tiempo a partir del cual la continuidad en la condición de déficit o exceso (determinada con base en el índice de humedad) genera afectación sobre el cultivo de café, según la etapa fenológica en la que se encuentre, es de 30 días consecutivos. Según la continuidad de la condición deficitaria o de exceso, se definieron cinco estados que describen la condición de humedad, a partir de los cuales pueden generarse recomendaciones para el manejo del cultivo, dependiendo de la edad del mismo. Cuando el índice de humedad se encuentra entre 0,3 y 0,6 el suelo se encuentra en una condición normal, es decir, es adecuada para el cultivo.

Para dos períodos decadiarios continuos en los que el índice esté por debajo de 0,3, se considera que el suelo está moderadamente seco, pero si esta condición continúa, el suelo en el siguiente período tendrá una condición muy seca.

En cuanto al exceso, para dos períodos decadiarios continuos que presenten un índice de humedad del suelo (IHS) mayor a 0,6 se define como una condición moderadamente húmeda y si persiste, se establece una condición muy húmeda.

Aprovechando el nivel de diseño funcional con el que hoy cuenta la plataforma agroclimática y teniendo en cuenta la necesidad de implementar un sistema experto que integre la información (datos), los procesos (algoritmos de programación) y la visualización, se diseñó un aplicativo para desplegar los resultados de la rutina del balance hídrico decadiario. En el aplicativo el usuario podrá consultar la condición hídrica de las decadiarias (10 días) de los últimos meses, expresada mediante el índice de humedad del suelo.

Los resultados del balance hídrico describen la condición de humedad del suelo en un período determinado, por lo que la generación de alertas tempranas a partir de los índices derivados del balance hídrico debe estar soportada en el conocimiento de las condiciones locales, del cultivo y de los resultados de investigación derivados del monitoreo climático. Con base en una revisión de los resultados de investigación de Cenicafé, se consolidaron las estrategias de adaptación que deben implementarse ante condiciones de humedad críticas para el cultivo.





Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

INTRODUCCIÓN

1



Como soporte a las observaciones en materia de monitoreo climático y las derivadas en insumos técnicos para toma de decisiones, en este documento se presentan los aspectos que deben asumirse en la implementación de una red meteorológica y los cuidados especiales a considerar durante su vida operativa.

El libro permite dimensionar la estricta tarea que debe respaldarse a la hora de garantizar la calidad de los datos, con el fin de desarrollar una estrategia que, con base en un análisis de información riguroso, garantice un resultado satisfactorio, ajustado a las necesidades de la caficultura y los caficultores.

Teniendo presente la oportunidad que brinda una red meteorológica con transmisión en tiempo cercano al real, el reto para la investigación es desarrollar estrategias que permitan elaborar contenidos en gráficos o tablas, aplicaciones y documentos, entre otros, que le permitan a un grupo de usuarios determinado usar la información con propósitos de decisión más oportuna y ajustada a sus necesidades.

En el caso particular de este libro, se hace énfasis en el balance hídrico del sistema de producción de café, a partir del conocimiento de la evolución de los principales elementos meteorológicos como la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento, junto con el cálculo del agua aprovechable, resultado de muestrear y analizar los suelos



de los cultivos aledaños a las estaciones meteorológicas. Los datos e información anterior permiten el procesamiento de las funciones y parámetros del modelo de balance hídrico que serán utilizados en el cálculo decadiario (diez días) del índice de humedad del suelo, para cada sitio de referencia de ubicación de la estación meteorológica automática, insumo final para generar alertas tempranas por déficit y exceso hídricos.

En el documento se presenta el detalle de cómo se configura una condición de suelo muy seca o muy húmeda, así como la relación de los efectos de las condiciones extremas de déficit y exceso hídricos con las etapas fisiológicas del cultivo, para disponer de algunas alternativas de manejo más frecuentes.

Dentro del alcance del uso de información, se muestran los sistemas de apoyo a la toma de decisiones que hoy tiene la comunidad cafetera, se describe de manera detallada la Plataforma Agroclimática Cafetera (<https://agroclima.cenicafe.org/>), y específicamente, cómo podrá utilizarse en el futuro el aplicativo de balance hídrico.

Así mismo, en el marco del proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua, se presenta una síntesis de las principales actividades educativas que respaldan los procesos evolutivos del intercambio experiencial en las etapas de socialización, implementación y apropiación, que promovieron el compromiso de las comunidades para el manejo y conservación de su entorno.





**Monitoreo climático:
herramienta al servicio de la
caficultura colombiana**

**RED METEOROLÓGICA
CAFETERA**

2

Antecedentes

Cenicafé desde sus inicios ha determinado la importancia de hacer seguimiento a las condiciones atmosféricas del entorno cafetero; es por esta razón que en 1941 se estableció la primera estación meteorológica en Cenicafé. En 1945, los delegados del Congreso Nacional Cafetero aprobaron la creación de un servicio propio de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) administrado por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), para estudiar y determinar el clima de las regiones cafeteras en colaboración con los servicios meteorológicos oficiales.

En 1949 se creó el observatorio meteorológico y se promovió extender las mediciones para el conocimiento del clima en la zona cafetera colombiana. Desde el año 1950 hasta la fecha, se publica de manera ininterrumpida el Anuario Meteorológico Cafetero. En 1951 se tenían 53 puestos de observación y en 1965 la red operaba con 200 puestos de observación meteorológica convencional. En la actualidad la red opera con 210 estaciones convencionales, de las cuales 49 corresponden a estaciones principales, nueve helioplumiográficas, seis pluviográficas y 146 pluviométricas (Figura 1).

Línea de tiempo Red Meteorológica Cafetera

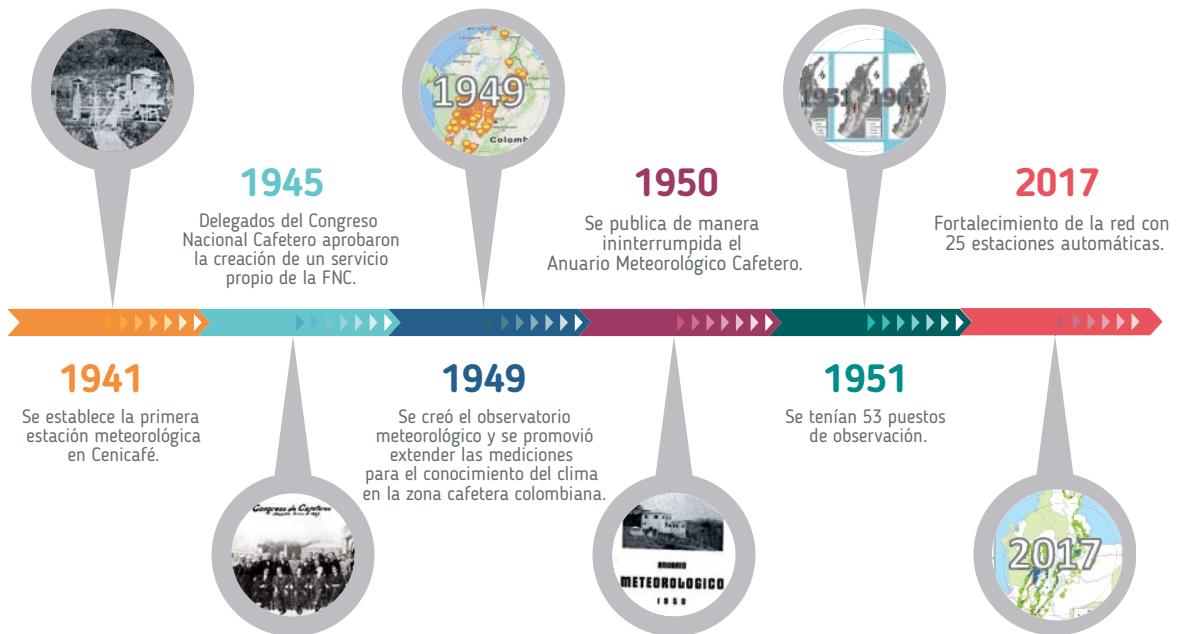


Figura 1. Línea de tiempo Red Meteorológica Cafetera

La red meteorológica convencional de la Federación Nacional de Cafeteros ha permitido conocer el comportamiento general de la distribución anual de la precipitación en la zona cafetera de Colombia, que se caracteriza en su zona centro por la ocurrencia de dos períodos húmedos en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre, y dos menos húmedos en los meses de diciembre a febrero y junio a septiembre, explicados principalmente por el movimiento latitudinal de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual origina a su paso condiciones de alta nubosidad y aumento en la cantidad de lluvia. Por su parte, la ZCIT en la zona norte determina un período húmedo que va desde el mes de abril hasta noviembre y otro menos húmedo desde diciembre hasta marzo. La zona del piedemonte llanero, región oriental de Colombia, presenta el mismo comportamiento que la zona norte, pero la condición húmeda, por mayor oferta hídrica, es más intensa. En la zona sur también se presenta un período más húmedo que se extiende desde el mes de octubre hasta mayo, y un período menos húmedo desde junio hasta septiembre.

La información histórica de la red convencional también ha permitido tener clasificaciones de clima regionales, distribución anual de la temperatura y la radiación, disponibilidad de agua en el suelo mediante balances de agua en los sistemas de producción de café y la determinación de los períodos húmedos, menos húmedos y secos.

Desde el año 2013 la Federación Nacional de Cafeteros desarrolló una estrategia de implementación de una red meteorológica automática, en el marco de un convenio con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Desde el año 2014 se encuentran operando 107 estaciones, de las cuales 41 funcionan en paralelo con estaciones convencionales, con el fin de homologar la serie de estas últimas y proceder a su desmonte paulatino (Figura 2). En el marco del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua, los cofinanciadores (Nestlé, Nespresso, el Ministerio Holandés de Relaciones Exteriores, la Universidad de Wageningen y la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional (APC), Colombia), decidieron, entre sus objetivos, fortalecer la red con 25 estaciones automáticas, una en cada cuenca, e iniciar un proceso logístico de definición de sus características técnicas, su gestión de compra, implementación y puesta en funcionamiento, la cual se logró entre noviembre de 2015 y febrero de 2017.



Figura 2. Estación meteorológica automática y convencional funcionando en paralelo.

Con las estaciones meteorológicas automáticas se pretende el fortalecimiento de herramientas que permitan a los caficultores reducir los efectos de eventos climáticos extremos, así como aprovechar las oportunidades de incrementar la capacidad productiva cuando se presentan eventos favorables. Se espera que el funcionamiento de las estaciones automáticas, además de dar continuidad a la serie histórica de las estaciones convencionales, permita robustecer los datos meteorológicos y la información climática con mayor cobertura espacial, temporalidad de mayor detalle y oportunidad para el despliegue de datos en tiempo cercano al real.

Así mismo, utilizando la información de precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento que se genera a partir de las estaciones meteorológicas automáticas, se proyecta continuar con estudios en materia de necesidades hídricas del cultivo del café.

Aspectos técnicos

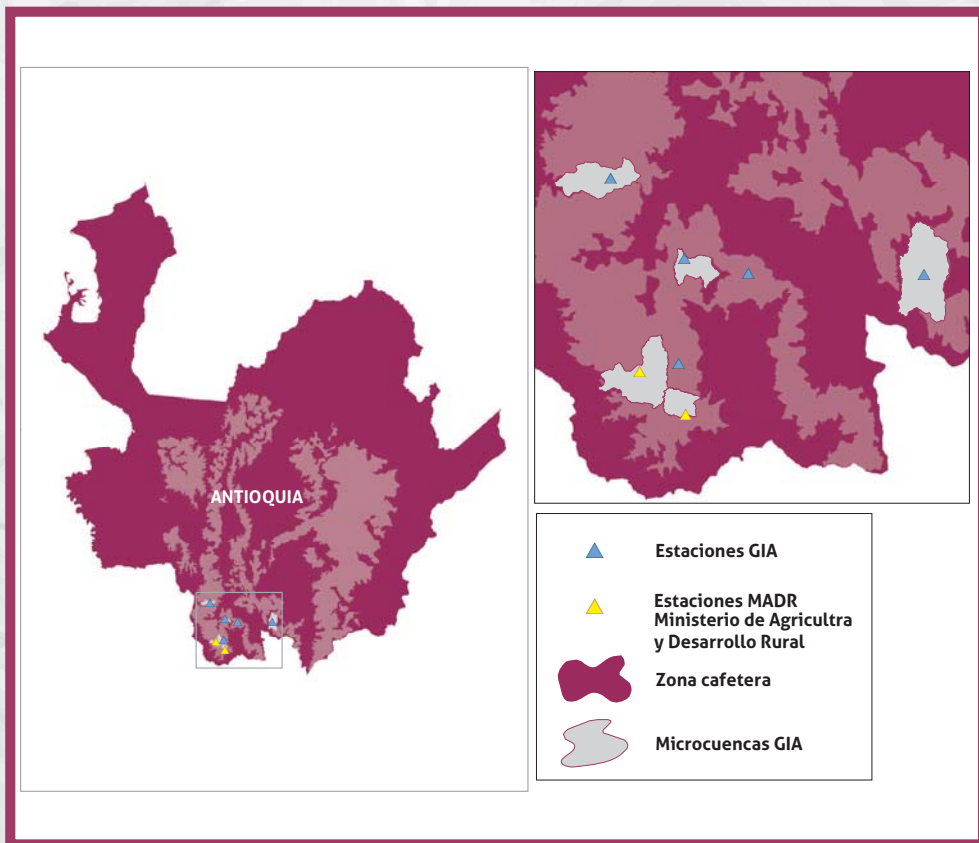
Las estaciones meteorológicas tienen como finalidad realizar mediciones representativas de las condiciones atmosféricas de un lugar, según el tipo de estación y la aplicación que se quiera dar. Previo a la implementación, es necesario definir el propósito de la instalación, para así determinar la ubicación más adecuada, los requerimientos técnicos de instrumentación y los procedimientos de observación que cumplen dicho propósito.

En el marco del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua se seleccionaron e instalaron estaciones meteorológicas automáticas (EMA), con el fin de proveer información meteorológica y conocer las condiciones climatológicas de 25 microcuencas distribuidas a lo largo en la zona cafetera de los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, además de fortalecer la Red Meteorológica de la FNC (Tabla 1). Mediante este tipo de estaciones, las observaciones se realizan y transmiten automáticamente con alta frecuencia y en tiempo cercano al real, permitiendo así incrementar el número y la fiabilidad de las observaciones, reducir los errores humanos y los costos de operación al disminuir el número de observadores.

La ubicación de las estaciones en el área de cada una de las microcuencas fue definida a partir de la experiencia previa que se tuvo con la implementación de la red meteorológica de estaciones automáticas, mediante una evaluación técnica y siguiendo las recomendaciones de los Comités Departamentales; para los casos de las microcuencas quebrada Chaparralá (Andes, Antioquia), quebrada San Bartolo (Jardín, Antioquia), quebrada La Linda (Pensilvania, Caldas), río Capitanes (Balboa, Cauca), quebrada La Fragua (La Unión, Nariño) y quebrada El Ingenio (Sandóná, Nariño), debido a que ya se encontraba una estación meteorológica automática en el área de estudio, no se instalaron nuevas estaciones y se seleccionaron otros puntos representativos dentro de los departamentos, según concepto de los Comités Departamentales para instalar las estaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas automáticas GIA instaladas en las microcuencas

Estaciones meteorológicas- Antioquia (págs. 17 a 19)



Estación: Abejorral GIA



Departamento:

Antioquia

Municipio:

Abejorral

Vereda:

Chagualal

Latitud

5,79647

Longitud:

-75,51644

Altitud:

1.766 m

Fecha de

instalación:

10/06/2016

Microcuenca:

La Liborina



Continúa ->

Estación: Jardín GIA



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Jardín
Vereda:
San Bartolo
Latitud:
5,62433
Longitud:
-75,85575
Altitud:
1,655 m
Fecha de instalación:
07/12/2015



Estación: Pueblorrico GIA



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Pueblorrico
Vereda:
San Bartolo
Latitud:
5,81564
Longitud:
-75,84814
Altitud:
1,578 m
Fecha de instalación:
08/12/2015
Microcuena:
La Leona



Estación: Andes MADR



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Andes
Vereda:
El Líbano
Latitud:
5,660111
Longitud:
-75,914139
Altitud:
1,626 m
Fecha de instalación:
5/07/2013
Microcuena:
La Chaparrala



Estación: Salgar GIA



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Salgar
Vereda:
La Gulunga
Latitud:
5,92797
Longitud:
-75,95128
Altitud:
1.622 m
Fecha de instalación:
08/03/2016
Microcuenca:
La Gulunga



Estación: Jardín MADR



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Jardín
Vereda:
El Verdun
Latitud:
5,6
Longitud:
-75,85
Altitud:
1.621 m
Fecha de instalación:
20/08/2015
Microcuenca:
San Bartolo



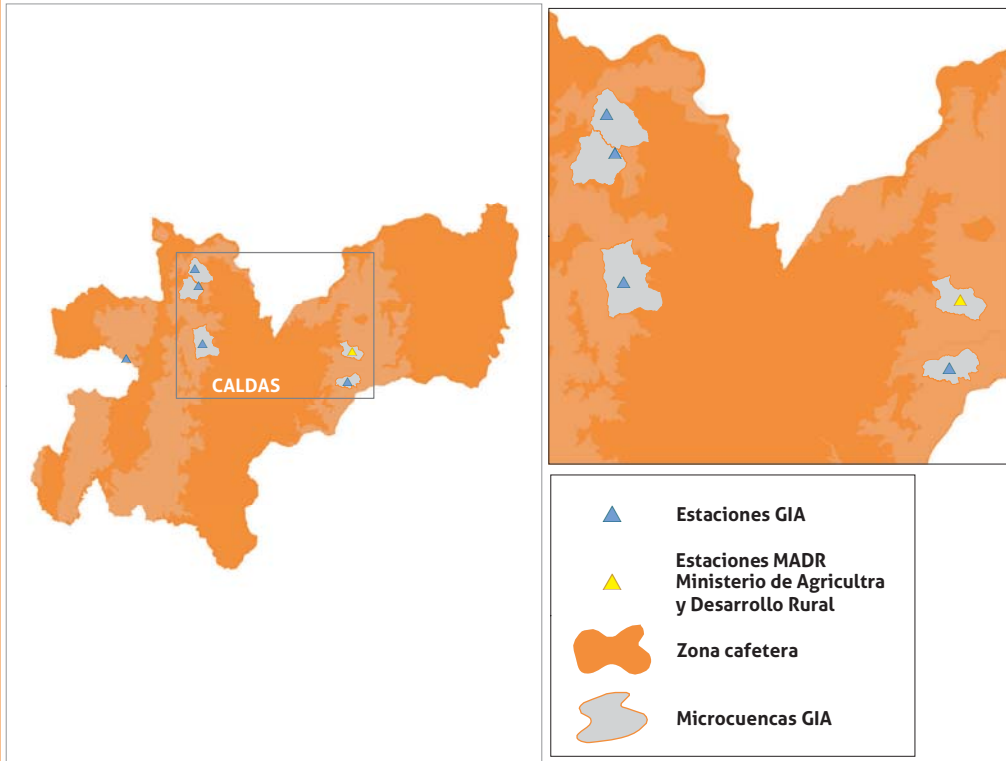
Estación: Jericó GIA



Departamento:
Antioquia
Municipio:
Jericó
Vereda:
Palenquito
Latitud:
5,79850
Longitud:
-75,76250
Altitud:
1.813 m
Fecha de instalación:
26/04/2017



Estaciones meteorológicas - Caldas (págs. 20 a 22)



Estación: Villaraz MADR



Departamento:

Caldas

Municipio:

Pensilvania

Vereda:

Villaraz

Latitud:

5,383333

Longitud:

-75,0666679

Altitud:

1.641 m

Fecha de instalación:

18/12/2013

Microcuenca:

La Linda



Continúa ->

Estación: Aguasdas GIA



Departamento: Caldas
Municipio: Aguasdas
Vereda: El Edén
Latitud: 5,60042
Longitud: -75,48161
Altitud: 1.740 m
Fecha de instalación: 05/12/2015
Microcuenca: Edén Bareño



Estación: Marquetalia GIA



Departamento: Caldas
Municipio: Marquetalia
Vereda: La Quebra
Latitud: 5,29989
Longitud: -75,07617
Altitud: 1.473 m
Fecha de instalación: 26/01/2016
Microcuenca: Los Sainos



Estación: Pácora GIA

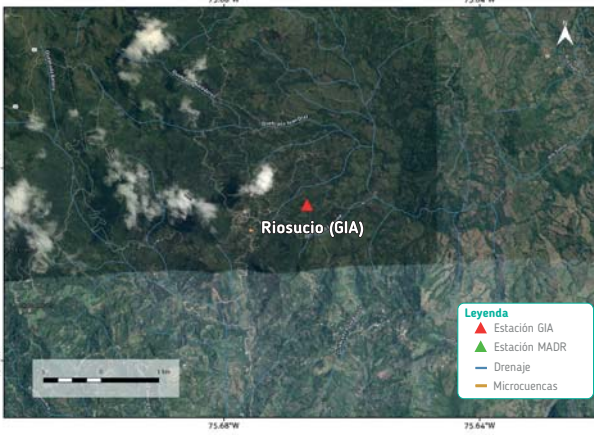


Departamento: Caldas
Municipio: Pácora
Vereda: Los Morros
Latitud: 5,55572
Longitud: -75,47506
Altitud: 1.795 m
Fecha de instalación: 10/12/2015
Microcuenca: Pácora



Continuación ->

Estación: Riosucio GIA



Departamento:

Caldas

Municipio:

Riosucio

Vereda:

Bonafont

Latitud:

5,36174

Longitud:

-75,67614

Altitud:

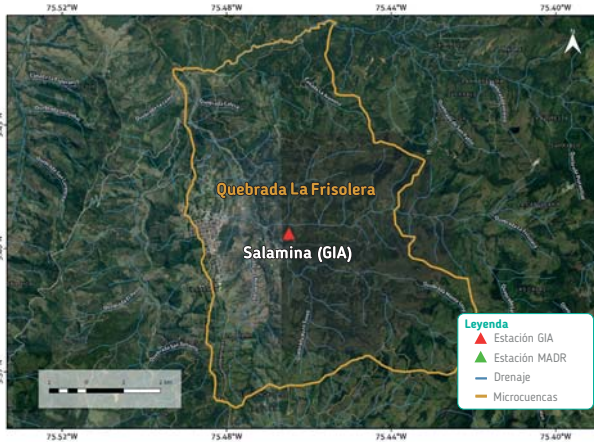
1.448 m

**Fecha de
instalación:**

28/01/2016



Estación: Salamina GIA



Departamento:

Caldas

Municipio:

Salamina

Vereda:

Cañaveral

Latitud:

5,40083

Longitud:

-75,4615

Altitud:

1.771 m

**Fecha de
instalación:**

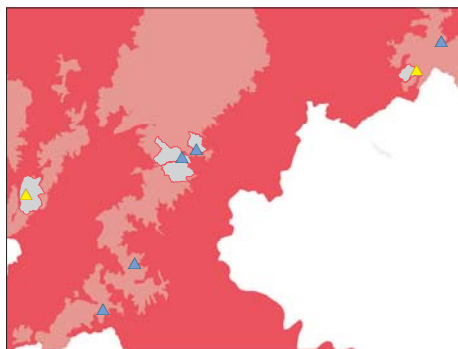
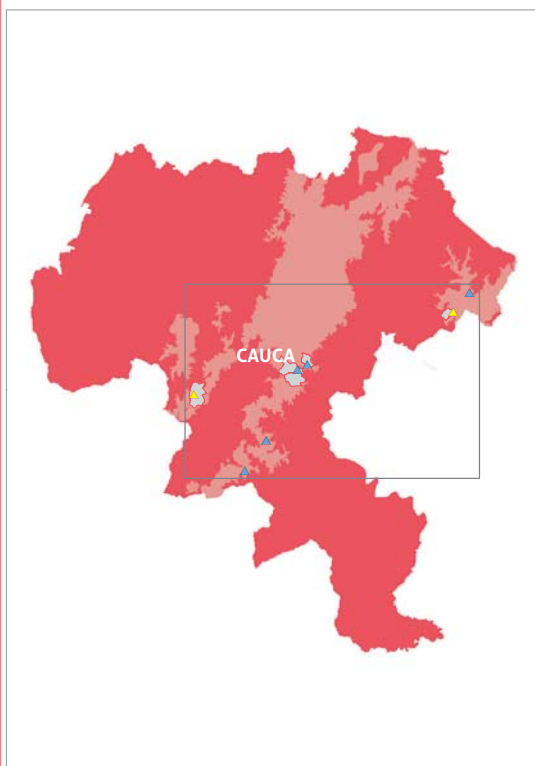
09/12/2015

Microcuenca:

La Frisolera



Estaciones meteorológicas - Cauca (págs. 23 a 25)



Estación: Almaguer GIA



Departamento:

Cauca

Municipio:

Almaguer

Vereda:

Achiral

Latitud

1,91658

Longitud:

-76,86433

Altitud:

1.938 m

Fecha de

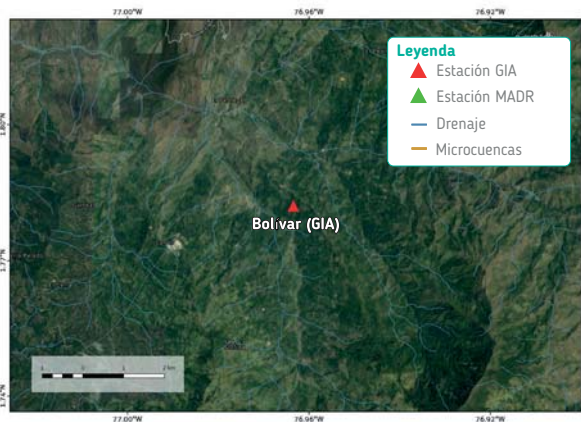
instalación:

27/11/2015



Continúa ->

Estación: Bolívar GIA

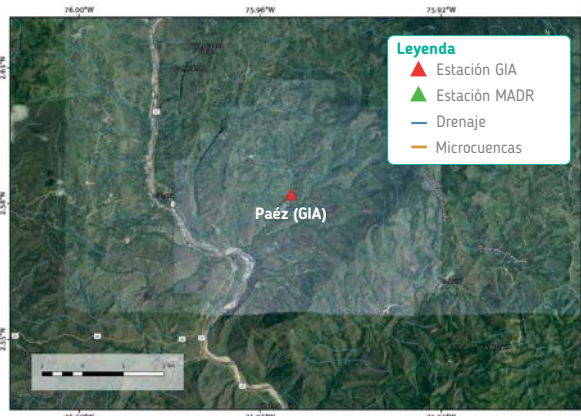


Departamento:

Cauca
Municipio:
Bolívar
Vereda:
Chalguayaco
Latitud:
1,77917
Longitud:
-76,96025
Altitud:
1.770 m
**Fecha de
instalación:**
16/12/2015



Estación: Paéz GIA



Departamento:

Cauca
Municipio:
Paéz
Vereda:
Caloto
Cohetando
Latitud:
2,57925
Longitud:
-75,94986
Altitud:
1.714 m
**Fecha de
instalación:**
11/04/2016



Estación: Rosas GIA

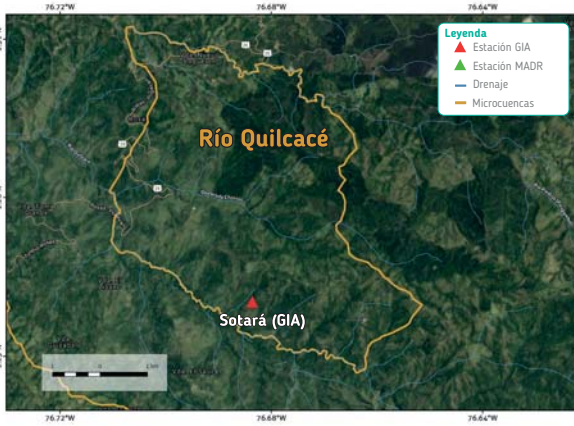


Departamento:

Cauca
Municipio:
Rosas
Vereda:
El Márquez
Latitud:
2,233
Longitud:
-76,72347
Altitud:
1.794 m
**Fecha de
instalación:**
25/11/2015
Microcuenca:
El Márquez



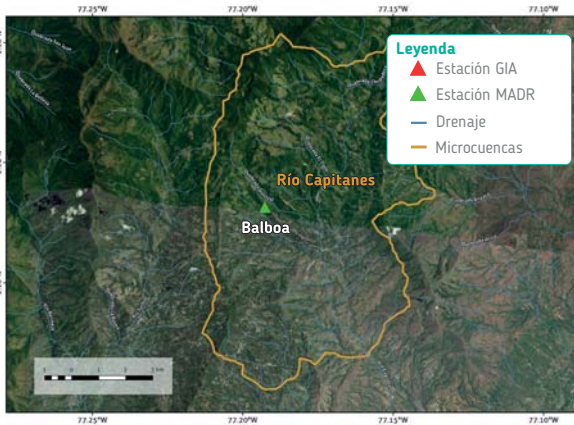
Estación: Sotará GIA



Departamento:
Cauca
Municipio:
Sotará
Vereda:
Corralejas
Latitud:
2,2575
Longitud:
-76,68031
Altitud:
1.737 m
Fecha de instalación:
25/11/2015
Microcuenca:
Quilcacé



Estación: Balboa MADR



Departamento:
Cauca
Municipio:
Balboa
Vereda:
La Palma
Latitud:
2,125194
Longitud:
-77,192667
Altitud:
1.695 m
Fecha de instalación:
25/02/2014
Microcuencas:
Capitanes



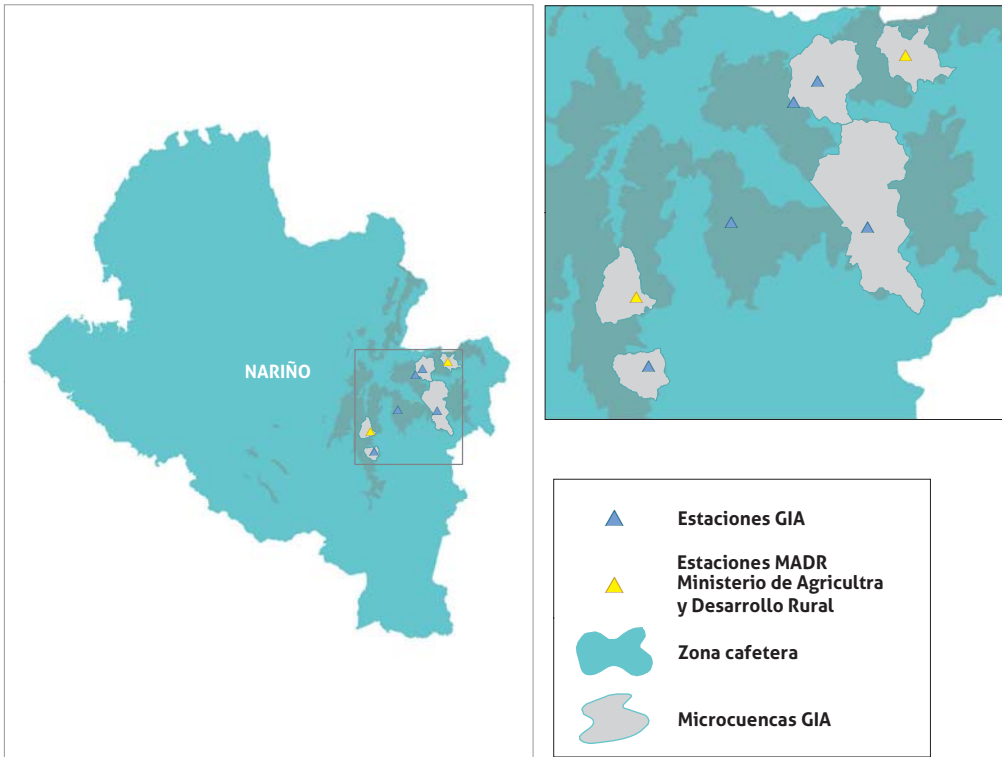
Estación: Inzá MADR



Departamento:
Cauca
Municipio:
Inzá
Vereda:
San José
Latitud:
2,233
Longitud:
2,497861
Altitud:
1.848 m
Fecha de instalación:
09/07/2014
Microcuenca:
La Chorrera



Estaciones meteorológicas - Nariño (págs. 26 a 28)



Estación: El Sauce MADR



Departamento:
Nariño

Municipio:
La Unión

Vereda:
La Unión

Latitud:
1.615556

Longitud:
-77.109722

Altitud:
1.609 m

**Fecha de
instalación:**
27/06/2013

Microcuenca:
La Fragua



Continúa ->

Estación: Sandoná MADR



Departamento:

Nariño

Municipio:

Sandoná

Vereda:

San Andrés

Latitud:

1,300889

Longitud:

-77,460361

Altitud:

1.838 m

Fecha de

instalación:

25/02/2015

Microcuencia:

El Ingenio



Estación: Buesaco GIA



Departamento:

Nariño

Municipio:

Buesaco

Vereda:

Buesquito

Latitud:

1,38975

Longitud:

-77,15567

Altitud:

1.885 m

Fecha de

instalación:

18/12/2015

Microcuencas:

Buesquito



Estación: Consacá GIA



Departamento:

Nariño

Municipio:

Consacá

Vereda:

Churapamba

Latitud:

1.20831

Longitud:

-77.44122

Altitud:

1.930 m

Fecha de

instalación:

30/11/2015

Microcuencia:

Azufral



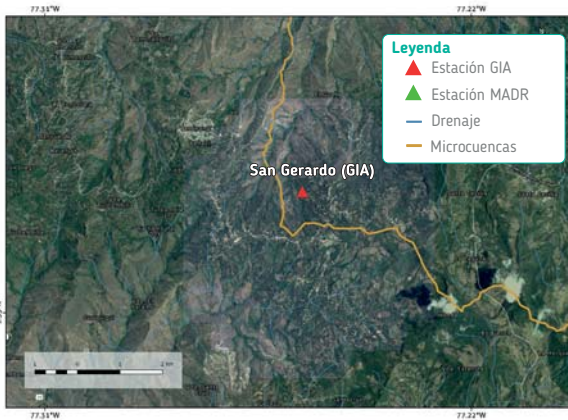
Estación:
El Tambo GIA



Departamento:
Nariño
Municipio:
El Tambo
Vereda:
San José del Cidral
Latitud:
1,39592
Longitud:
-77,33339
Altitud:
2.157 m
Fecha de instalación:
03/04/2016



Estación:
San Gerardo GIA



Departamento:
Nariño
Municipio:
San Lorenzo
Vereda:
San Gerardo
Latitud:
1,55261
Longitud:
-77,25236
Altitud:
1.984 m
Fecha de instalación:
21/12/2015
Microcuencas:
El Molino



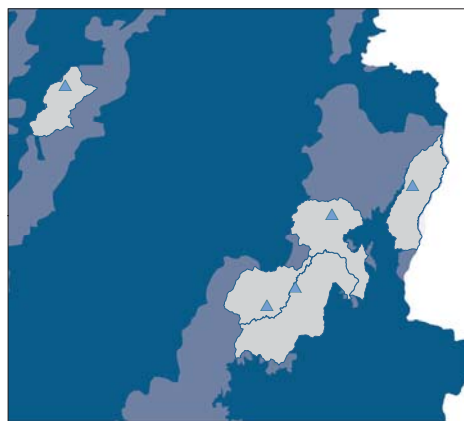
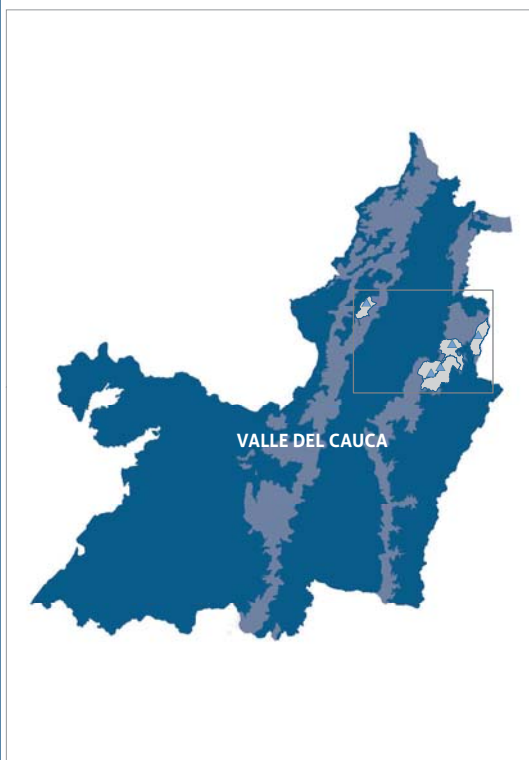
Estación:
Vueltahonda GIA



Departamento:
Nariño
Municipio:
San Lorenzo
Vereda:
Vuelta Honda
Latitud:
1,57983
Longitud:
-77,22119
Altitud:
1.833 m
Fecha de instalación:
01/12/2015
Microcuenca:
El Molino



Estaciones meteorológicas - Valle del Cauca (págs. 29 a 30)



Estación: Bolívar GIA (Valle)



Departamento:

Valle del Cauca

Municipio:

Bolívar

Vereda:

La María

Latitud:

4,38567

Longitud:

-76,25478

Altitud:

1.781 m

Fecha de instalación:

16/12/2015

Microcuenca:

Platanares



Continúa ->

Estación: Bugalagrande GIA



Departamento: Valle del Cauca
Municipio: Bugalagrande
Vereda: San Isidro
Latitud 4,11572
Longitud: -76,007
Altitud: 1.795 m
Fecha de instalación: 29/12/2015
Microcuenca: La Paila



Estación: Cominales GIA



Departamento: Valle del Cauca
Municipio: Sevilla
Vereda: Cominales
Latitud 4,22722
Longitud: -75,92681
Altitud: 1.554 m
Fecha de instalación: 28/12/2015
Microcuencas: San Marcos



Estación: Potosí GIA



Departamento: Valle del Cauca
Municipio: Caicedonia
Vereda: Puerto Rico
Latitud 4,26272
Longitud: -75,82758
Altitud: 1.681m
Fecha de instalación: 15/12/2015
Microcuenca: Barragán





La configuración exacta de las estaciones se definió con base en las necesidades de información para el cálculo del balance hídrico y el monitoreo hidrológico (Figura 3). Se requiere contar con información de variables como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación global y humedad volumétrica del suelo a escala horaria, diaria y decadiaria. La capacidad de los sistemas de almacenamiento de datos y energía, así como el tipo de sistema de comunicación, se determinaron en función de la frecuencia de toma de datos y las características del lugar.

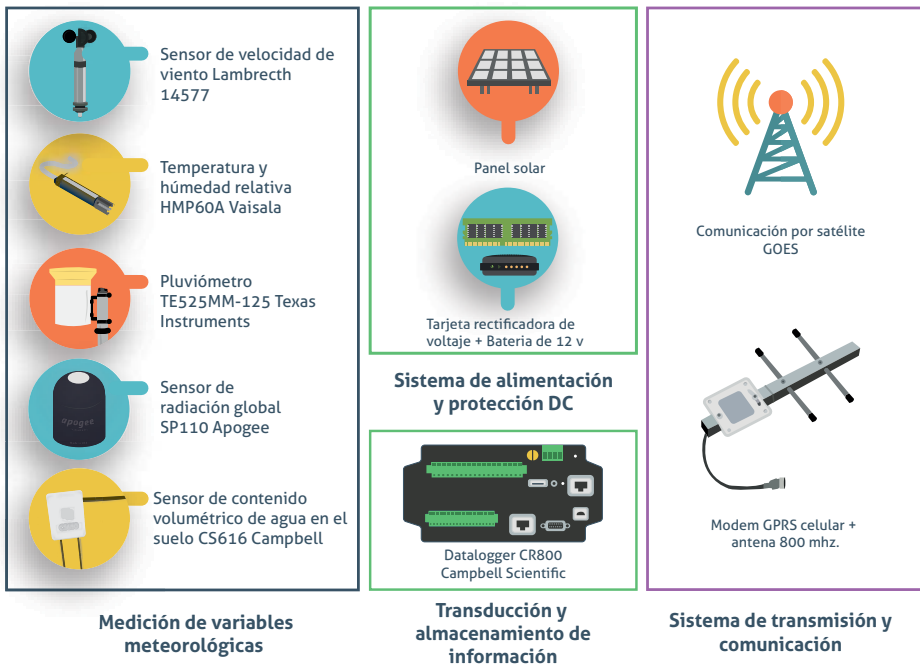


Figura 3. Infraestructura de toma de datos meteorológicos de las estaciones GIA de la Red Meteorológica Cafetera.

A continuación se describen los aspectos técnicos que deben tenerse en cuenta para la implementación de estaciones meteorológicas automáticas y que pueden ser adaptados según los recursos y condiciones locales.

Selección del sitio

La representatividad se refiere al grado en el cual las mediciones describen la realidad del lugar en el que está instalado el instrumento de medición (Organización Meteorológica Mundial, 2010), por lo cual, para la selección de la ubicación de una estación deben considerarse diferentes aspectos que la garanticen. Para la instalación de las estaciones meteorológicas automáticas se definieron áreas dentro de las microcuencas que fueran representativas de la zona cafetera y que contaran con facilidad de acceso y comunicación para la transmisión de la información. Se tuvieron en cuenta los siguientes lineamientos generales para la ubicación de una estación meteorológica (Organización Meteorológica Mundial, 2014):

- Los sitios escogidos deben estar suficientemente alejados de árboles, edificios, terrenos con pendiente pronunciada u otros obstáculos, a una distancia mayor o igual a diez veces la altura del obstáculo.
- El terreno debe ser nivelado, en un lugar donde el clima y el suelo permitan una cubierta de césped y bajo ninguna circunstancia la superficie del suelo puede ser de concreto, asfalto o roca triturada.
- Deben evitarse ubicaciones cercanas a lagos, pantanos o áreas de frecuente aspersión o inundación, e investigar la probabilidad de que las condiciones de la ubicación permanezcan iguales durante un período de tiempo prolongado con pocos cambios en el entorno.

Los sitios deben ser identificados por su posición geográfica, es decir, por la latitud, longitud y altitud, además de incluir información adicional como el departamento, municipio, vereda y propietario del predio cafetero.

Con el fin de minimizar los efectos por tránsito de personas y animales cerca de la estación, es conveniente realizar un encerramiento, cuya disposición no debe representar obstáculos para la medición de las diferentes variables meteorológicas. En las Figuras 4 y 5 se muestra la configuración de los encerramientos de las estaciones meteorológicas. Debe tenerse en cuenta que la calidad de las observaciones depende mucho del ambiente circundante de la estación, por lo que debe procurarse que las condiciones físicas del sitio seleccionado se mantengan a lo largo del tiempo.

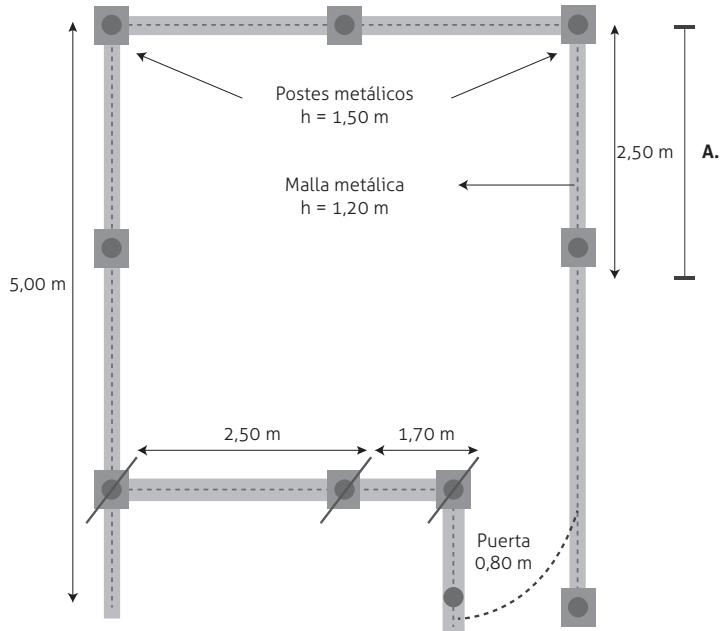


Figura 4. Plano del encerramiento de una estación meteorológica automática.

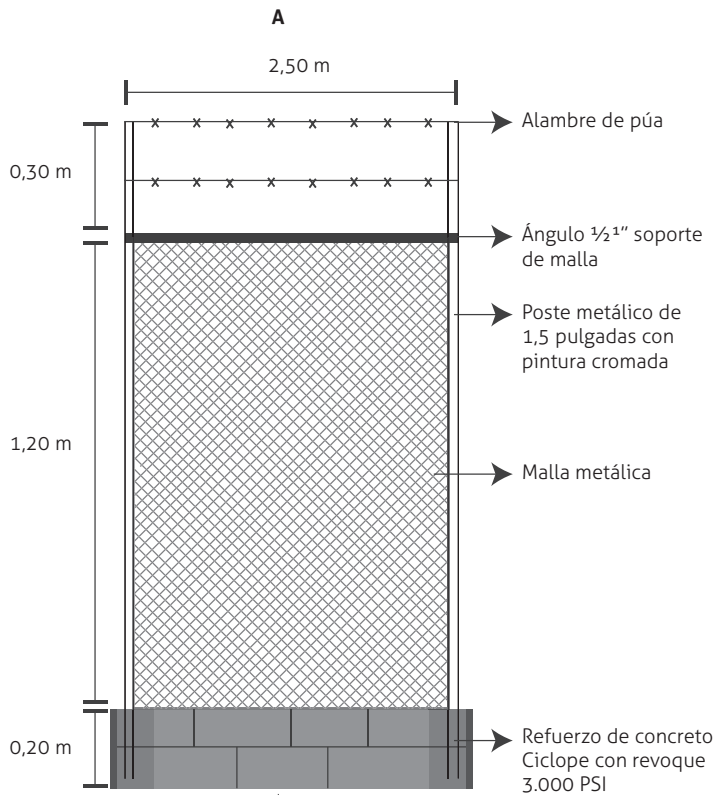


Figura 5. Vista lateral del encerramiento.

Sistema de adquisición, procesamiento y transmisión de información

El núcleo de una estación automática es el *datalogger*, el cual tiene como función la adquisición, procesamiento, almacenamiento y transmisión de los datos. Los sensores son los instrumentos de medición y convierten los cambios de las variables físicas en una señal eléctrica proporcional. El *datalogger*, mediante algoritmos, almacena la salida de los sensores en un intervalo de tiempo determinado y unidades de medida específicas. Para el funcionamiento del *datalogger* se requiere de una fuente de alimentación para operar de forma continua, por lo que las estaciones deben contar con un sistema de abastecimiento de energía preferiblemente estable. Los paneles solares con baterías de respaldo son una fuente de energía útil para las estaciones automáticas en área remotas. En el caso de la Red Meteorológica Cafetera, las estaciones cuentan con una batería de 12 voltios cargada por el panel solar, que almacena la energía durante las horas del día para garantizar la operación durante las horas de la noche.

Si el *datalogger* se encuentra cerca de los sensores, el procesamiento en el sitio reduce la cantidad de datos que deben transmitirse y el consumo de energía; además, permite que estos estén asequibles para la conexión directa a los canales de comunicación.

Los sensores deben tener una operación estable y confiable, tener un grado de incertidumbre de acuerdo con los requerimientos establecidos para cada variable, ser de fácil calibración y mantenimiento, así como contar con repuestos asequibles. Según la variable meteorológica es necesario tener en cuenta algunos aspectos de los instrumentos:

- **Temperatura y humedad relativa:** tipo de protección y ventilación del sensor.
- **Velocidad del viento:** tiempo de respuesta del anemómetro y secuencia de registro.
- **Precipitación:** diámetro del pluviómetro, altura sobre el suelo y presencia de elementos que puedan modificar el flujo de aire.

Algunas de las propiedades de los instrumentos descritas en la Figura 6 deben ser consideradas de acuerdo con la aplicación de la estación meteorológica, siguiendo las recomendaciones dadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Incertidumbre	Es la expresión numérica de la exactitud. Es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores cuantitativos atribuida a los instrumentos de medición.
Sensibilidad	Hace referencia al cambio en la respuesta del sensor dividido por el cambio correspondiente en el estímulo.
Tiempo de respuesta	Es el intervalo de tiempo entre el instante en que el estímulo es sujeto de un cambio y el instante en que responde el sensor para medir dicho cambio.
Resolución	Es una expresión cuantitativa de la habilidad de un sensor para distinguir de manera significativa entre valores estrechamente adyacentes de la cantidad indicada.
Estabilidad	Es la habilidad del sensor de mantener sus características meteorológicas constantes a lo largo del tiempo.

Figura 6. Características de los instrumentos de medición (sensores).

Los sensores y sistemas seleccionados deben estar lo suficientemente bien documentados para proveer un adecuado entendimiento de su capacidad, características y algoritmos usados. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2010) da algunas indicaciones acerca de los requerimientos técnicos de la instrumentación para las diferentes variables medidas por estaciones meteorológicas, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos de incertidumbre para medidas agrometeorológicas.
Fuente: Organización Meteorológica Mundial (2010).

Parámetro	Incertidumbre requerida en valores diarios
Temperatura máxima y mínima	$< \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
Humedad relativa	$\pm 5,0\%$
Velocidad del viento	$\pm 0,5 \text{ m/s}^{-1}$
Precipitación	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Radiación Solar	10,0%

Sistema de comunicación y transmisión de datos

Cada estación meteorológica automática transmite sus datos a un sistema central que es el *datalogger*, donde se recibe, procesa y almacena la información. Los dispositivos utilizados para transmitir los datos e información desde los sitios en los que están instaladas las estaciones deben tener la capacidad de almacenar una determinada cantidad de información, cubriendo un período mayor al comprendido entre dos visitas programadas de mantenimiento. Los métodos de transmisión dependen de la ubicación del sitio, la disponibilidad de infraestructura de comunicación, acceso de señal y costos asociados a la operación.

Para la selección del sistema de transmisión deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Fuente de energía: debe tenerse en cuenta la capacidad del sistema de alimentación de energía ya que la transmisión es el proceso que genera mayor gasto energético.
- Costos del equipo (módem, antena, fuente de alimentación).
- Costo de transmisión de datos (costos del operador y mantenimiento del sistema).
- Controles de rutina requeridos.

La red de estaciones meteorológicas automáticas cuenta con dos sistemas de comunicación: transmisión por GPRS (General Packet Radio Service) y transmisión satelital. El primero hace uso de la red de telefonía móvil con cobertura en la zona en la que se encuentra la estación, y mediante un módem provisto de una SIM card permite establecer comunicación desde el sistema central para la transmisión de datos y la administración de la estación (Figura 7). La comunicación con este sistema es bidireccional, es decir, que hay transmisión desde la estación hacia el sistema central y viceversa. Para ahorrar la energía de la batería el sistema transmite los datos solo en horas establecidas. Entre las ventajas de este sistema se encuentran los bajos costos de instalación, la alta velocidad de transmisión respecto a otros sistemas de comunicación

y la facilidad de administración desde el sistema central. Algunas desventajas son la inestabilidad de la cobertura de los operadores en algunas zonas y el mantenimiento de las SIM card.

El sistema de comunicación satelital es una opción que permite tener mayor cobertura, especialmente en zonas donde no hay alcance de los operadores móviles. Este sistema hace uso de satélites en una posición ajustada en el espacio en relación con la superficie terrestre (Figura 8). Para la transmisión existe una ventana de tiempo asignada en la que la estación envía los datos al satélite y, posteriormente, este los transmite a una estación en tierra. Los datos quedan almacenados en un servidor desde el cual, por intermedio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), puede obtenerse la información registrada por la estación.

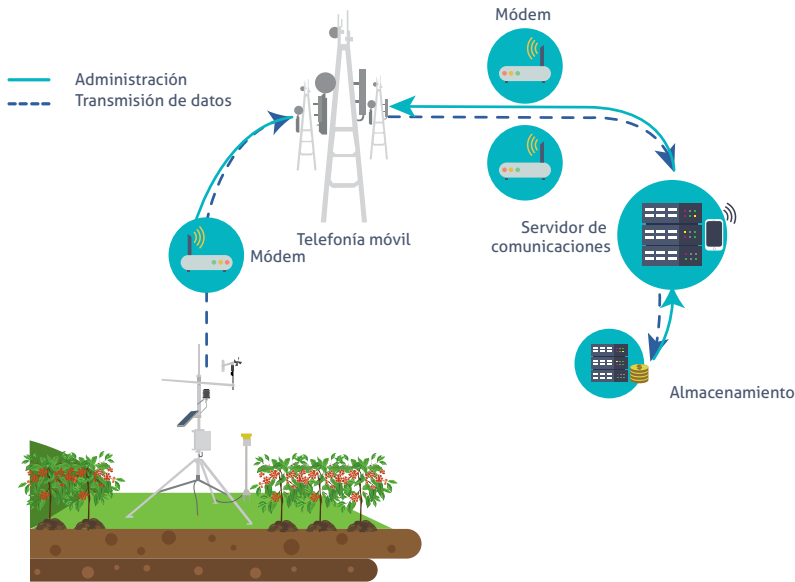


Figura 7. Componentes del sistema de comunicación por GPRS.

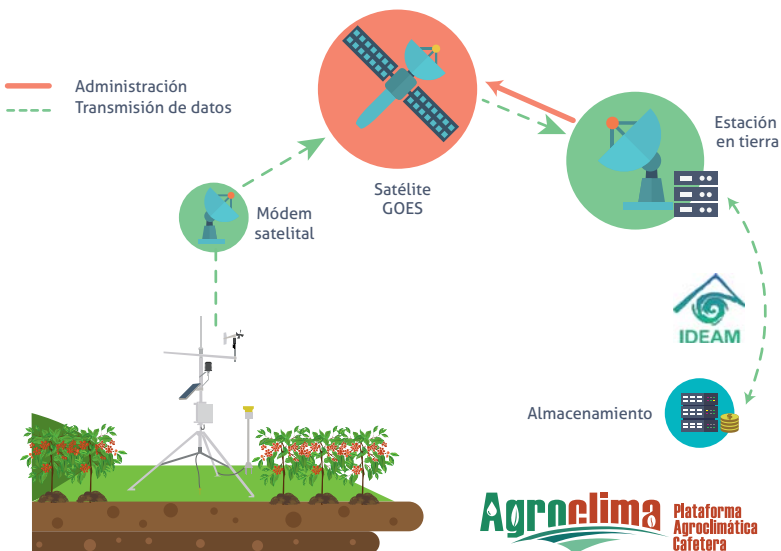


Figura 8. Componentes del sistema de comunicación satelital.

Requerimientos climatológicos

En los lugares donde una estación meteorológica automática tiene como propósito proveer información para consolidar registros climatológicos, es importante la integridad y homogeneidad de las bases de datos. Si la estación automática reemplaza un sistema de observación convencional, estas deben estar en operación simultánea por un tiempo suficiente para facilitar el mantenimiento de la homogeneidad de los registros históricos. La OMM da algunas sugerencias respecto al tiempo de operación simultánea, que depende de la variable y del clima de la región (Tabla 3).

Tabla 3. Tiempo de operación simultánea de estaciones automáticas y convencionales (Organización Meteorológica Mundial, 2010)	
Variable	Tiempo recomendado de operación simultánea
Velocidad y dirección del viento	12 meses
Temperatura, humedad, brillo solar / radiación solar	24 meses
Precipitación	60 meses

Mantenimiento

El área en la que está instalada la red meteorológica automática presenta condiciones ambientales que favorecen la deposición de material vegetal e insectos en los instrumentos y componentes de la estación. Por lo anterior, sumado al deterioro generado por la operación de las estaciones, deben realizarse inspecciones en intervalos suficientemente cortos para garantizar la calidad de las observaciones y el correcto funcionamiento de los instrumentos. Las visitas de inspección y mantenimiento tienen por objetivo verificar la posición, exposición y funcionamiento de los instrumentos, evaluar el estado y operación de los sistemas de comunicación, almacenamiento de información y alimentación de energía y corregir las fallas que se presenten. Así mismo, incluye el mantenimiento de la grama de la estación y la limpieza de los instrumentos. La calibración debe realizarse al menos una o dos veces al año.

Es necesario verificar de manera rutinaria la calidad de las observaciones de las estaciones meteorológicas para detectar fallas en la red, y según la naturaleza de las mismas, definir las acciones requeridas y la prioridad con la que deben ser implementadas. Por lo anterior, para la red meteorológica automática se desarrollaron plataformas de monitoreo, desde las cuales puede consultarse el estado de los componentes de las estaciones y así programar las visitas de inspección y mantenimiento de forma eficiente.

Se diferencian dos tipos de mantenimiento: preventivo y correctivo. El primero consiste en realizar inspecciones con el fin de prevenir averías, prolongar el tiempo de funcionamiento del equipo y mantener el buen estado de la estación. El mantenimiento correctivo incluye la sustitución, ajuste o reparación de los elementos que no funcionan adecuadamente. A continuación se describen algunas de las actividades de mantenimiento que se realizan en las estaciones meteorológicas automáticas:

Mantenimiento preventivo



Mantenimiento correctivo



Los costos de mantenimiento, calibración y funcionamiento de una red meteorológica automática deben considerarse en la planificación de la ubicación e instalación.

Documentación de las estaciones meteorológicas

Los usuarios de observaciones meteorológicas requieren conocer la exposición, tipo de observación y condición real del equipo y su funcionamiento, así como las circunstancias de las observaciones. Esta información es de gran importancia en el estudio del clima, ya que deben evaluarse las condiciones detalladas de las estaciones y los sitios que representan.

Deben realizarse los metadatos (datos sobre datos) sobre todos los asuntos de establecimiento y mantenimiento de la estación y sobre los cambios que ocurren, incluyendo el historial de calibración, mantenimiento y los cambios en términos de exposición (OMM, 2014). Los metadatos son de gran importancia para los elementos sensibles a la exposición como la precipitación, el viento y la temperatura. Los cambios en los instrumentos, por ejemplo, pueden tener un gran impacto sobre los datos; cuando se presentan, es crucial registrarlos en el metadato, así como la fecha exacta en la que se realiza el cambio, ya que estas modificaciones tienen impacto en la homogeneidad de los datos. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de metadato para la estación Marquetalia, GIA.


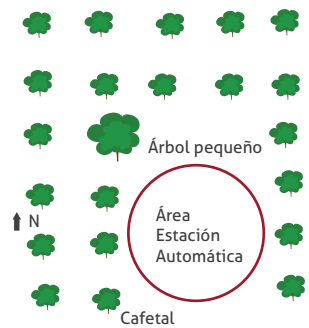
 FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA METADATO ESTACIÓN METEOROLÓGICA		Formato	Versión 1																																														
Código Estación 30019	Fecha instalación	26/01/2016	Años 1																																														
Nombre Estación Marquetalia GIA	Fecha Suspensión																																																
Tipo Estación Automático	Cordillera Central	Vertiente Oriental																																															
Categoría GIA	Cuenca hidrográfica Medio Magdalena																																																
Departamento Caldas	Lat (Y)	5,29989	Long (X) -7507617																																														
Municipio Marquetalia	Altitud	1.473 m																																															
Vereda La Quiebra																																																	
Nombre Finca La Esperanza	Reubicada No	No. Comodato 19																																															
Meso escala																																																	
Proximidad de superficies de agua (km)	0,43 km	quebrada los Sainos																																															
Proximidad de áreas urbanas (km)	2,6 km	municipio La Victoria																																															
Proximidad de de montañas (km)	< 0,1 km																																																
Proximidad de bosques (km)	16 km	selva de Florencia																																															
Local																																																	
Pendiente del terreno																																																	
Tipo de cobertura circundante Casa casa, árboles de jardín, frutales																																																	
Microescala																																																	
Cobertura actual		Pasto																																															
Obstáculo cercanos		Árboles y casa																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Instrumentos</th> <th>Altura Instrumen</th> <th>Horario Observ-</th> <th>Fabricante-Modelo</th> <th>Fecha</th> <th>Mantenimiento Evento Visita</th> <th>Observ.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pluviómetro</td> <td>X</td> <td rowspan="5">Continuo</td> <td rowspan="5">Texas Instruments</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Temperatura humedad</td> <td>X</td> <td>Vaisala</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Velocidad del viento</td> <td>X</td> <td>Lambrech</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Radiación global</td> <td>X</td> <td>Apoge</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Contenido volumétrico</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Agua en el suelo</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Instrumentos	Altura Instrumen	Horario Observ-	Fabricante-Modelo	Fecha	Mantenimiento Evento Visita	Observ.	Pluviómetro	X	Continuo	Texas Instruments				Temperatura humedad	X	Vaisala				Velocidad del viento	X	Lambrech				Radiación global	X	Apoge				Contenido volumétrico	X					Agua en el suelo	X								
Instrumentos	Altura Instrumen	Horario Observ-	Fabricante-Modelo	Fecha	Mantenimiento Evento Visita	Observ.																																											
Pluviómetro	X	Continuo	Texas Instruments																																														
Temperatura humedad	X			Vaisala																																													
Velocidad del viento	X			Lambrech																																													
Radiación global	X			Apoge																																													
Contenido volumétrico	X																																																
Agua en el suelo	X																																																
Nombre del observador Celular																																																	
Nombre del propietario Finca Hugo Suárez Patiño Celular																																																	

Figura 9. Ejemplo de metadato para una estación meteorológica automática.

Como parte del metadato de cada estación también es importante llevar el registro de la altura de los instrumentos sobre la superficie y el grado de interferencia que pueden ocasionar otros instrumentos u objetos, así como las fallas presentadas en cada instrumento, los cambios que se presenten en la ubicación y exposición (en caso de realizarse) y cuáles fueron las acciones correctivas implementadas. También debe incluirse la información relacionada con las unidades de medición, tiempos de respuesta, frecuencia de medición y tipo de comunicación para la transmisión de los datos.



PARA TENER EN CUENTA

El metadato es, en otras palabras, una versión extendida del registro administrativo de una estación meteorológica; contiene toda la información posible, incluyendo imágenes, especificaciones de los instrumentos y calibración, y registros de mantenimiento, entre otros.

Elementos de monitoreo

Precipitación

La precipitación es la variable de mayor importancia en el balance hídrico y se refiere a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre que proviene de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). Esta cantidad se expresa en milímetros (mm), siendo 1 mm la altura de agua equivalente a 1 L/m². En Colombia la cantidad de precipitación está determinada por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación local de cada vertiente, y a su vez, por la altitud, la orientación de las montañas y otros procesos que determinan el tiempo atmosférico (Jaramillo, 2005).

Para la medición de precipitación, las estaciones meteorológicas automáticas del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua cuentan con pluviómetros automáticos de cubetas basculantes (Figura 10), que consisten en un balancín dividido en dos compartimientos alrededor de un eje horizontal. El agua lluvia se conduce desde un colector hasta uno de los compartimientos del balancín, que después de una cantidad predeterminada, se inclina hacia su posición de reposo, vaciando el agua que contiene y mientras tanto, la lluvia sigue cayendo sobre el otro compartimiento. La distancia entre cada paso del registro representa el tiempo que se tarda en caer 0,1 mm de lluvia. Pueden presentarse errores debido a la pérdida de agua durante eventos extremos como altas temperaturas (rápida evaporación del agua depositada en el balancín), precipitaciones de alta intensidad y alta velocidad del viento, así como errores por taponamiento del colector, acumulación de material en los compartimientos o bloqueo del movimiento del balancín (OMM, 2010).

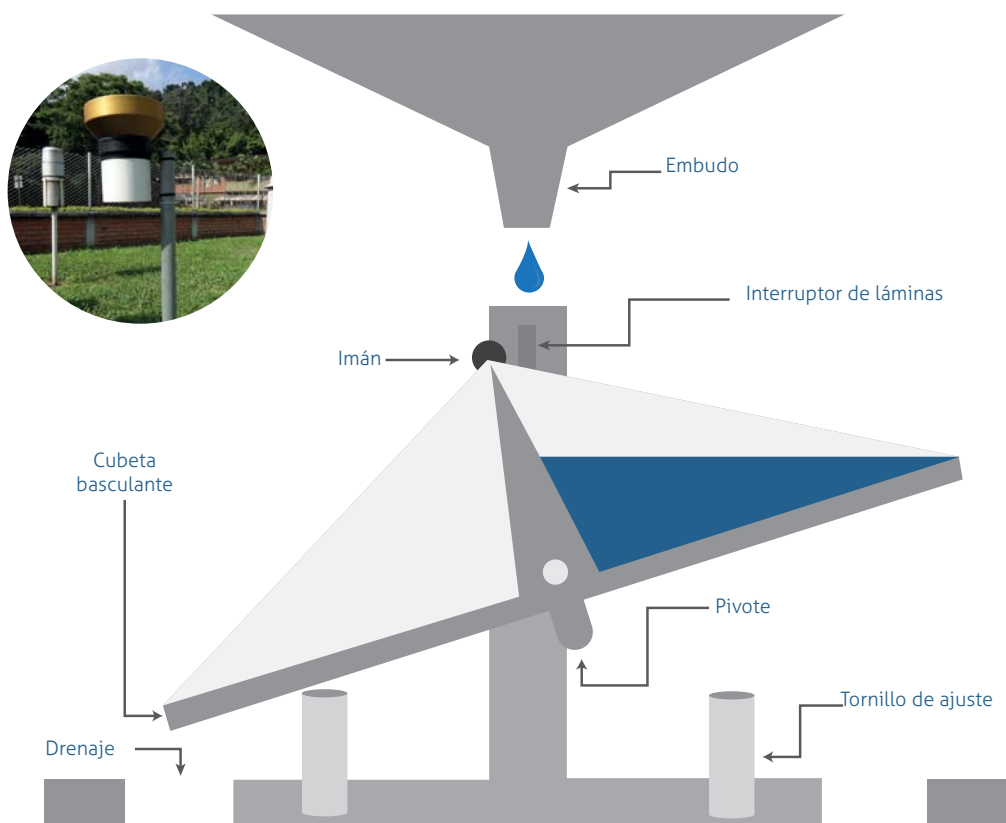


Figura 10. Pluviómetro y esquema de funcionamiento del balancín.



**PARA
TENER EN
CUENTA**

1,00 mm de lluvia equivale a 1 L/m²

1,00 mm/ha = 10.000 L/ha = 10 t/ha

Temperatura y humedad relativa

La temperatura indica la energía cinética de las moléculas del aire y puede ser expresada en diferentes escalas, según el valor asignado de referencia en puntos como la fusión del hielo y la ebullición del agua. Tiene una influencia directa sobre la tasa de evapotranspiración del cultivo: a mayor temperatura, mayor evapotranspiración.

Por su parte, la humedad del aire es el contenido de vapor de agua atmosférico, caracterizado por determinados valores de temperatura y presión del aire. Esta variable influencia directamente el desarrollo del cultivo de café, regulando su tasa de evapotranspiración y, por lo tanto, su balance de energía; y bajo condiciones micrometeorológicas locales, puede contribuir a la difusión de enfermedades. La humedad relativa expresa la relación porcentual entre la presión de vapor real y la presión de saturación a la misma temperatura (Battista *et al.*, 2000). La presión de vapor es una medida absoluta de la cantidad de vapor de agua en el aire, mientras que la presión de vapor de saturación es la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura determinada.

La temperatura y la humedad se miden comúnmente con un sensor combinado que cuenta con un alojamiento (Figura 11), que lo protege de la radiación y le provee ventilación natural. Se usan varios tipos de alojamiento para proteger el sensor, pero el más común consiste en una pila invertida de platos de plástico blancos (Brown y Russell, 2010). La temperatura se mide con un termistor, que muestra un cambio en la resistencia eléctrica en respuesta a los cambios de la temperatura. La humedad se mide con sensores que generan un cambio de resistencia eléctrica o capacitancia ante cambios de humedad.

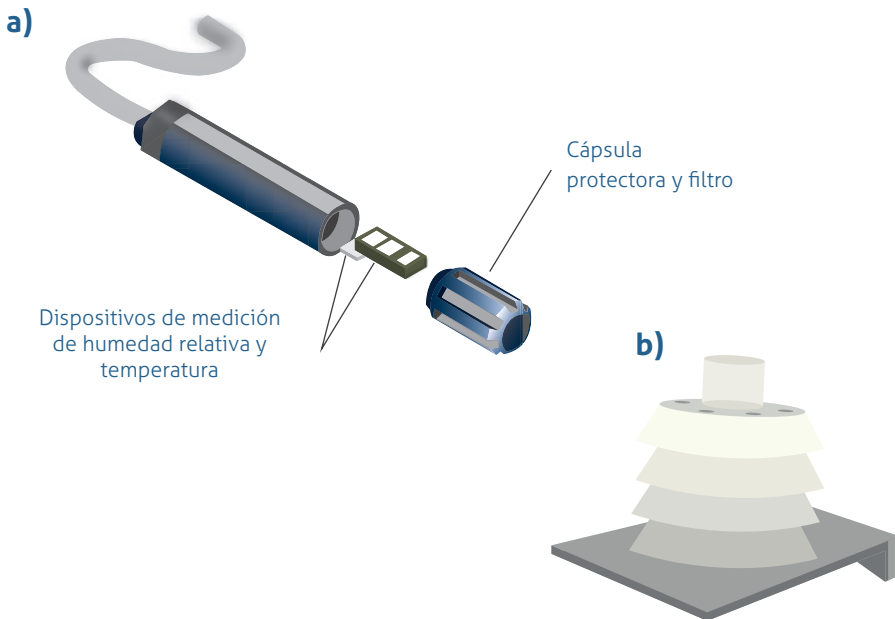


Figura 11. a) Sensor de temperatura y humedad relativa, b) Alojamiento para protección de radiación.

Radiación global

Es una de las variables más importantes para la caracterización del ambiente del cultivo. Su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis (Jaramillo, 2005). Representa la fuente de energía para el proceso de producción y regula las fases de desarrollo de las plantas.

Para la medición de radiación global se utiliza un instrumento llamado piranómetro. En estaciones automáticas se usa comúnmente el piranómetro de células de silicio (Figura 12), que consiste en un pequeño cilindro negro (1,0" de diámetro) ubicado sobre una placa base ajustable que contiene un nivel de diana. La parte de detección real de este instrumento es el pequeño "ojo" circular blanco que descansa cerca de la parte superior del sensor (Brown y Russell, 2010).



Figura 12. Piranómetro para medición de radiación solar.

Velocidad del viento

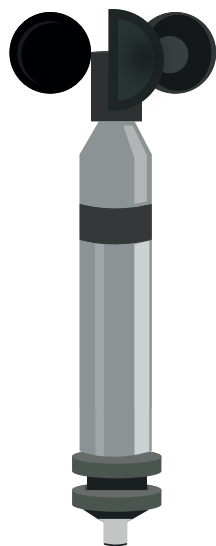


Figura 13. Anemómetro de copa.

El viento puede ser definido como el flujo de una masa de aire debido a un gradiente de presión entre dos puntos. Una de las características fundamentales es la velocidad, que se refiere a la distancia que recorre por unidad de tiempo (m/s) (Jaramillo, 2005). El transporte de aire tiene gran influencia en el cultivo, ya que modifica las condiciones micrometeorológicas y biológicas del ambiente. El viento puede modificar la temperatura, la humedad del aire, la evapotranspiración y la concentración de gases, entre otros.

La velocidad del viento se mide con un anemómetro de copa (Figura 13). El anemómetro tiene tres cazoletas unidas a ejes horizontales, que a su vez están conectados a un eje vertical central. El conjunto de copa está conectado a un elemento de detección que genera una señal eléctrica (por ejemplo, cierre de interruptor o voltaje) proporcional a la velocidad de rotación. La rotación de la copa es a su vez proporcional al flujo del viento.

Contenido de humedad en el suelo

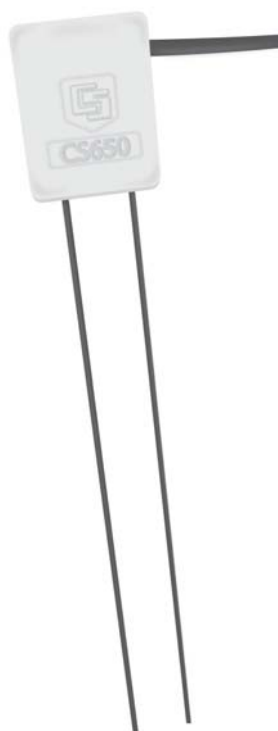


Figura 14. Sensor de humedad TDR para medir el contenido volumétrico en el suelo.

La disponibilidad de agua en el suelo es una condición esencial para la vida de las plantas. La humedad del suelo es una variable clave en el control del intercambio de agua y energía térmica entre la superficie de la tierra y la atmósfera, a través de la evapotranspiración de la planta. Generalmente se expresa como porcentaje de peso o volumen.

La Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Cenicafé cuenta con sensores de humedad volumétrica del suelo Campbell CS-616, instalados a dos profundidades (12 y 30 cm), los cuales utilizan el método de reflectometría de dominio temporal (*Time Domain Reflectometry*, TDR) para la determinación del contenido de humedad. El sensor consiste en dos barras de acero inoxidable conectadas a una placa de circuito (Figura 14); una onda electromagnética es enviada por una de las barras, y el tiempo que tarda la onda en llegar a la segunda barra, varía según la permitividad del suelo. Debido a la alta diferencia entre la permitividad de las partículas de suelo (2 a 5 F/m) del aire (1) y del agua (80), el tiempo de retardo de una onda electromagnética a través del suelo está fuertemente influenciado por el contenido de humedad (Chandler *et al.*, 2004).

Los instrumentos TDR deben calibrarse cuidadosamente para estimar la humedad del suelo según sus propiedades específicas en cada sitio. El contenido de humedad del suelo se caracteriza por una alta variabilidad espacial, por lo que al emplear métodos de medición puntual, se requiere incrementar la densidad de sensores para tener una estimación de mayor exactitud.



**PARA
TENER EN
CUENTA**

Elemento climático	Equipo de medición
Precipitación	Pluviómetro
Temperatura/humedad relativa	Termistor/Capacitor
Velocidad del viento	Anemómetro
Contenido de agua en el suelo	Sensor TDR
Radiación global	Piranómetro

Cobertura

La zona cafetera colombiana comprende 22 departamentos de Colombia, que se encuentran entre 1° de latitud Norte en el departamento de Nariño y 11,5° de latitud Norte en el departamento de La Guajira, y entre 72° y 78° de longitud Oeste, entre los departamentos de Arauca y Nariño respectivamente. Los departamentos que tienen mayor cobertura de la red meteorológica convencional son Caldas, Santander, Quindío, Risaralda y Tolima, los cuales tienen 191 de las 244 estaciones. Antes del año 2013 no se contaba con puestos de observación meteorológica en siete departamentos, pero a raíz del convenio con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural se fortaleció, actualizó y amplió la red climática cafetera mediante la instalación de 107 estaciones meteorológicas automáticas para toma de datos en nuevos sitios de la geografía nacional. De esta manera, la red pasó de tener presencia en 137 municipios a 176 municipios (Tablas 4 y 5).

Con el acceso a recursos de cofinanciación de Ciencia Tecnología e Investigación del Sistema General de Regalías (SGR), en el departamento de Huila se instalaron 16 estaciones automáticas, diez meteorológicas principales y ocho micrometeorológicas, ampliando la red del departamento a 32 estaciones, ubicadas en 17 de los 35 municipios cafeteros.

Por su parte, con recursos del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua se fortaleció aún más la red de estaciones meteorológicas automáticas en cinco departamentos cafeteros, como puede observarse en la Figura 15 y la Tabla 5. En estos cinco departamentos se aumentó la cobertura a 34% del total de los municipios cafeteros. Es importante señalar que la red automática se encuentra operando y transmitiendo en tiempo cercano al real; en la Plataforma Agroclimática Cafetera de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (agroclima.cenicafe.org) se custodian los datos, se realiza el control de calidad y se despliega la información para uso público.

Tabla 4. Cobertura departamental de la red meteorológica automática al año 2013.

Departamento	Número de municipios cafeteros	Municipios con red meteorológica	Cubrimiento departamental
Antioquia	94	14	15%
Bolívar	2	0	0%
Boyacá	37	3	8%
Caldas	25	24	96%
Caquetá	6	1	17%
Casanare	4	1	25%
Cauca	31	8	26%
Cesar	19	2	11%
Chocó	1	1	100%
Cundinamarca	69	17	25%
Huila	35	11	31%
La Guajira	10	0	0%
Magdalena	4	2	50%
Meta	9	1	11%
Nariño	38	3	8%
Norte de Santander	36	7	19%
Putumayo	1	1	100%
Quindío	12	12	100%
Risaralda	14	12	86%
Santander	71	22	31%
Tolima	38	18	47%
Valle del Cauca	39	16	41%
Total	595	176	30%

Tabla 5. Cobertura de la red meteorológica automática del proyecto GIA.

Departamento	Número de municipios cafeteros	Estaciones de red meteorológica (Incluida GIA)	Municipios con red meteorológica	Cubrimiento departamental
Antioquia	94	28	17	18%
Caldas	25	98	24	96%
Cauca	31	17	12	39%
Nariño	38	10	6	16%
Valle del Cauca	39	30	19	49%
Total	227	183	78	34%

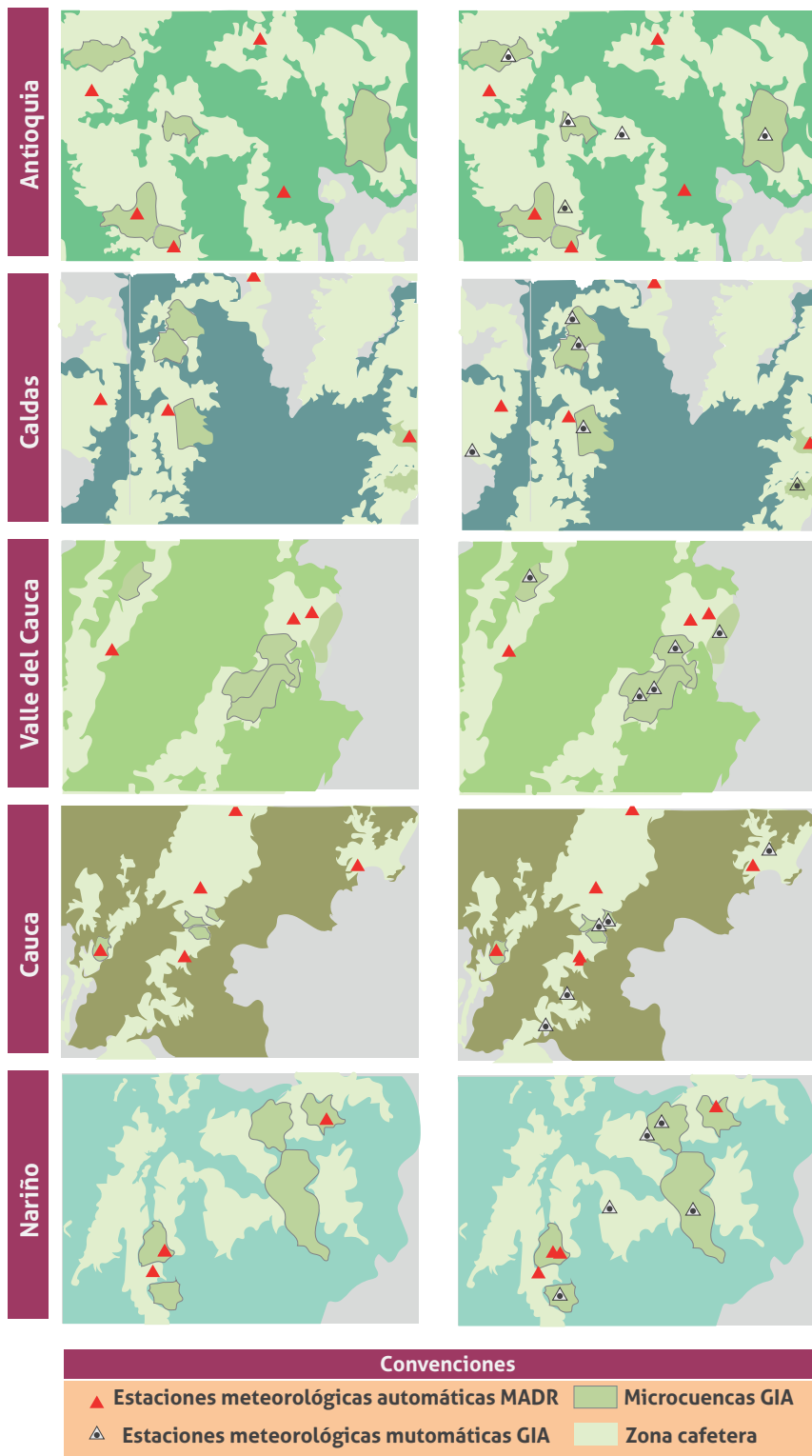


Figura 15. Estaciones meteorológicas automáticas instaladas en el año 2013 con el proyecto Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y estaciones instaladas en los años 2016 y 2017 con el Proyecto GIA.





Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

**CONTROL DE CALIDAD Y
ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA
DE LA INFORMACIÓN
METEOROLÓGICA**

3

Se considera que los datos meteorológicos son de calidad cuando responden a necesidades determinadas en cuanto a incertidumbre, resolución, continuidad, homogeneidad y representatividad. El objetivo del control de calidad es verificar si el valor de un dato es representativo de la medición que se pretendía efectuar y que no se haya visto afectado por factores no relacionados con el mismo (OMM, 2011). Los procedimientos de control de calidad se aplican para detectar e identificar los errores cometidos en el proceso de grabación, manipulación, transmisión y archivo de datos.

Las fallas en la comunicación y transmisión de los datos, obstrucciones en los sensores y fallas en el sistema de alimentación de energía de la estación son las principales causas de falta de calidad de los datos registrados por la red meteorológica automática. Otras causas secundarias están relacionadas con la vida útil de los sensores y errores en la configuración de las estaciones.

Los procedimientos de control de calidad son diversos y su aplicación depende de las características de los datos, por lo que conocerlos permite evaluar la validez de las observaciones y mejorar el uso de datos. El resultado final del control de calidad es una base de datos meteorológicos validados, acompañados de un "flag" o "bandera" que generalmente equivale a descripciones como dato "bueno", "sospechoso", "erróneo", "sin dato", etc., y depende del test aplicado. Se genera una información añadida al registro meteorológico que sirve para describir el nivel o grado de confianza de ese valor (Allen *et al.*, 2006).

Criterios de referencia según la Organización Meteorológica Mundial

La Organización Meteorológica Mundial en la reunión de Ginebra-Suiza, realizada en el año 2004, definió las directrices sobre procedimientos de control de calidad para los datos de estaciones meteorológicas automáticas (OMM 2004). Las directrices describen dos niveles de control de calidad en tiempo real, para datos de estaciones automáticas: control de calidad de datos brutos y de datos procesados.

El **control de calidad de los datos brutos** es llevado a cabo en el sitio de la estación y se aplica durante la adquisición de los datos con el fin de eliminar errores técnicos de los instrumentos asociados a inestabilidad, mal funcionamiento e interferencia. En esta etapa del control de calidad se verifica si los valores están dentro de los límites aceptables, construidos con base en las características del instrumento, y si la tasa de cambio en los valores es válida o no (según la frecuencia temporal de captura).

Debe haber al menos el 75% de las observaciones para calcular un valor instantáneo, por ejemplo, si la frecuencia es de seis datos por minuto, para calcular el valor del minuto de una variable debe haber cinco datos. Para esta misma frecuencia, la OMM establece los siguientes límites de variación entre datos (Tabla 6):

Tabla 6. Límites de variación entre datos consecutivos medidos por estaciones	
Variable	Límite
Temperatura del aire	2 °C
Humedad relativa	5 %
Velocidad del viento	20 m/s ⁻¹
Radiación solar	800 W/m ²

El **control de calidad de datos procesados** se realiza sobre los valores de los datos instantáneos, es decir, los valores que corresponden a la suma o promedio de las medidas realizadas en un intervalo dado de tiempo. Los valores se marcarán como sospechosos, buenos o faltantes, según el resultado del control.

Dentro de este tipo de control de calidad, la primera etapa es la verificación de los valores respecto a límites elaborados con base en la climatología de la zona. La segunda etapa corresponde a las pruebas de consistencia temporal, cuyo objetivo es verificar la tasa de cambio de los datos instantáneos para detectar saltos poco realistas causados por bloqueo de los sensores. En esta etapa se llevan a cabo diferentes pasos, como la verificación de la variación máxima y mínima permitida de los valores instantáneos. Por ejemplo, para la precipitación diaria, este tipo de pruebas pueden emplearse para la detección de períodos continuos sin precipitación, fuera de las condiciones climatológicas causadas por el taponamiento de los pluviómetros.

Finalmente, la tercera etapa propuesta por la Organización Meteorológica Mundial es la evaluación de la consistencia interna de la serie que se realiza con base en la relación entre dos parámetros, por ejemplo, evaluar que la temperatura mínima diaria sea siempre menor a la temperatura máxima y media. Como requisito mínimo del control de calidad debe obtenerse una respuesta para indicar si se ha aplicado algún control de calidad o no.

Todos los procedimientos de control de calidad aplicados, así como todo el procesamiento básico para el cálculo de datos promedio y acumulados, deben formar parte del metadato de cada estación.

Métodos de control de calidad de información meteorológica

El control de calidad de los datos meteorológicos inicia con la elección adecuada de la localización de cada estación meteorológica; continúa con un correcto mantenimiento de la misma y la calibración periódica de los sensores que se encuentren instalados en ella. La validación de los datos generados incluye un conjunto de técnicas, procedimientos, algoritmos y test que sirven como herramientas para la identificación y detección de errores, y que indican el nivel de calidad de los datos registrados (OMM, 2004).

Las comprobaciones efectuadas para determinar la calidad de una observación pueden ser de varios grados de complejidad (Figura 16):

- Las comprobaciones sintácticas. Por ejemplo, la temperatura del aire debe ser una cifra de no más de un decimal.

- La aplicación de intervalos de valores. Por ejemplo, las temperaturas estarán comprendidas entre 5 y 40 °C en la zona cafetera.
- Las comprobaciones de la franja de valores climáticos. Por ejemplo, ¿es coherente el dato con las características climáticas de la zona?
- La evaluación de la consistencia interna de cada variable. Por ejemplo, la temperatura del aire no deberá ser inferior al punto de rocío.
- La consistencia temporal de las series. Por ejemplo, la diferencia entre dos temperaturas sucesivas en un mismo sitio deberá estar dentro del límite admisible.
- La consistencia espacial. Por ejemplo, no deberán excederse las diferencias tolerables entre los valores de temperatura de una estación y los de estaciones vecinas.

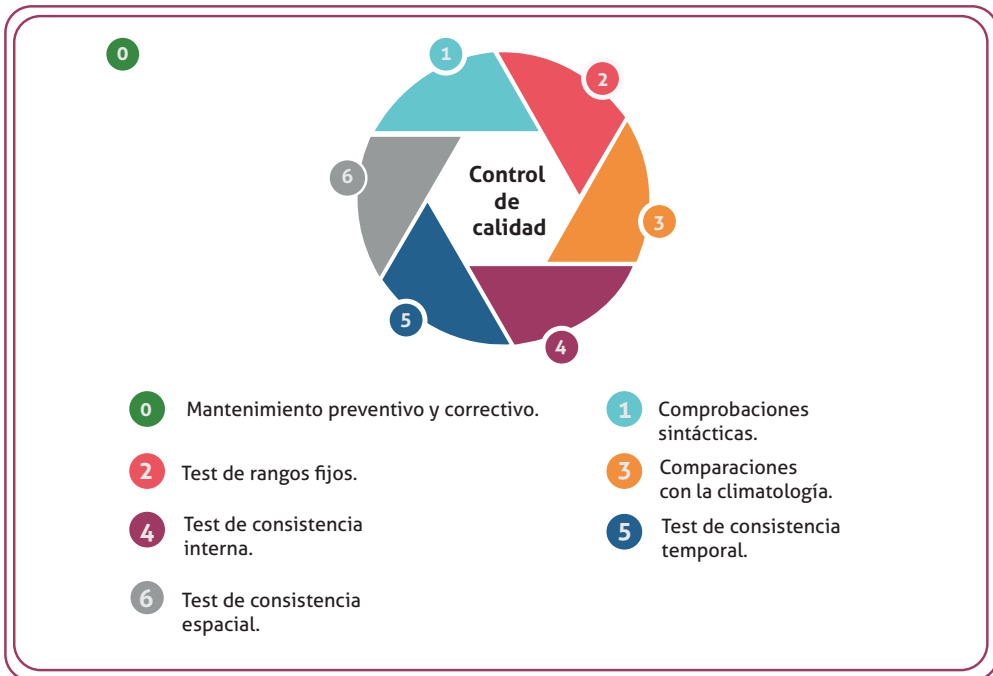


Figura 16. Metodologías para el control de calidad de datos meteorológicos.

Existen básicamente dos categorías dentro de los procedimientos de control de calidad: los procedimientos que utilizan datos de una sola estación y los que emplean datos de varias estaciones. En este último caso se comparan los registros de cada estación con los valores de las estaciones vecinas. Cada elemento climático (temperatura, humedad, radiación solar y velocidad de viento) es muy particular y tiene una variabilidad espacial y temporal distinta, por lo que los mecanismos de control de calidad son diferentes entre sí (Allen *et al.*, 2006). La resolución temporal con la que se registran los valores (diarios, horarios, 30 min, 10 min, entre otros) permite definir los procedimientos que deben emplearse.

Cuando las series climáticas son lo suficientemente largas se implementan técnicas de homogeneización para depurar los datos. Es un procedimiento de gran utilidad cuando hay cambios de instrumentación, y especialmente cuando se presenta el cambio de estaciones convencionales por estaciones automáticas.

Test de rangos fijos

Mediante este test se comprueba si una observación está dentro de un rango predeterminado, que puede ser fijo o dinámico. Los límites fijos pueden ser físicos (por ejemplo, la humedad relativa no puede ser mayor del 100%) o instrumentales (derivados de las especificaciones del sensor); en cambio, los valores dinámicos se fijan por los registros climáticos extremos de cada zona (Reek *et al.*, 1992).

Para validar los registros de radiación solar se utilizan los valores de la radiación solar estimada para cielo despejado (Allen *et al.*, 2006); los valores de radiación solar medida no pueden superar de forma sistemática este valor potencial. En cuanto a la temperatura, se utilizan los límites específicos del sensor y los valores registrados en cada zona.

En la Tabla 7 se muestran los valores diarios generales para las estaciones de la red meteorológica automática.

Variable	Límite inferior	Límite superior
Temperatura del aire	5°C	40°C
Humedad relativa	10%	100%
Velocidad del viento	0 m/s	60 m/s
Radiación solar	0 W/m ²	1.500 W/m ²
Precipitación	0 mm	300 mm

Para la precipitación se utilizan los límites marcados por el sensor y los valores máximos y mínimos registrados en cada estación (Shafer *et al.*, 2000). En el caso de la velocidad del viento suele emplearse el rango de medida del propio sensor y los límites diarios y horarios de la velocidad máxima diaria.

En el caso de la red meteorológica automática, al no contar con registros históricos, los valores máximos y mínimos se establecen mediante test de coherencia espacial para determinar a nivel local los rangos.

Test de consistencia temporal

Mediante este tipo de procedimiento se comprueba si la diferencia entre observaciones sucesivas excede un valor determinado; es decir, se verifica el exceso de variabilidad entre dos registros consecutivos. Si la diferencia supera el valor preestablecido, se genera una alerta para los dos datos. También se comprueba la persistencia en los registros, es decir, la escasa o nula variabilidad entre las observaciones sucesivas en determinados períodos de tiempo. Hubbard *et al.* (2005) desarrollaron un test basado en la hipótesis de que cuando un sensor falla, siempre registra un valor constante, de manera que la desviación típica es menor, pudiendo ser cero si se completa el período de medida. En otros casos, cuando el sensor trabaja intermitentemente se registrarán valores razonables y otros cercanos a cero, obteniéndose una desviación típica muy elevada.

En el caso de la precipitación, al ser el valor cero un valor posible en la medición, la evaluación de la persistencia de días consecutivos sin precipitación se realiza a partir de la aplicación del test de consistencia espacial, para determinar los valores máximos en el número de días consecutivos sin lluvia en las estaciones cercanas que cuentan con información histórica.

Test de consistencia interna

Con este test se busca asegurar la consistencia física o climatológica de cada variable observada o la consistencia entre parámetros. También incluye comprobaciones de la coherencia interna del propio sistema. Por ejemplo, en temperatura, la verificación de valores mínimos que no excedan la media ni los valores máximos o la evaluación del rango diario; en el caso de precipitación, que los valores acumulados de dos horas no excedan el acumulado de cuatro horas.

Test de consistencia espacial

Este método detecta los datos atípicos comparando los datos de una estación con los de las estaciones vecinas (Hubbard *et al.*, 2005). Es de gran utilidad para el control de calidad en estaciones que no cuentan con registros históricos, porque permite establecer patrones a nivel regional del comportamiento de cada variable.

Para el caso de la red meteorológica automática, teniendo en cuenta que su instalación es reciente, el control de calidad se ha apoyado en la información histórica de las estaciones convencionales de la Federación Nacional de Cafeteros y del IDEAM (Figura 17). Se identificaron las cuatro estaciones más cercanas a cada estación automática con base en la distancia, teniendo en cuenta que estén ubicadas en la misma zona hidrográfica, tomando como referencia el estudio de Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas e Hidrológicas de Colombia (2013). Mediante el análisis comparativo a nivel diario y decadiario, se identifican visualmente sobre y subestimaciones de los datos de las estaciones automáticas respecto a las estaciones cercanas. A partir del cálculo de medidas de error, se evalúa si la estación cercana representa adecuadamente las características de cada variable medida por la estación automática. En la Tabla 8 se muestra la estación más cercana identificada para cada una de las estaciones del Proyecto GIA, que ofrecen información de referencia para la variable precipitación.



En la Figura 17 se muestra el caso de la estación Marquetalia (GIA), ubicada en el municipio de Marquetalia, Caldas. Las cuatro estaciones más cercanas son La Esperanza, Marquetalia (IDEAM) en el mismo municipio, y Granja Kennedy en el municipio de Pensilvania.

Tabla 8. Estaciones más cercanas a las estaciones automáticas, distancia y diferencia altitudinal.				
Estación automática	Estación cercana	Entidad	Distancia (km)	Diferencia altitudinal (m)
Vuelta Honda (GIA)	Taminango	IDEAM	1,49	107
Abejorral (GIA)	Abejorral	IDEAM	9,60	-424
Cominales (GIA)	La Sirena	Automática	4,50	-62
El Tambo (GIA)	Apto Antonio Narin	IDEAM	5,13	343
Inzá	Sta Teresa	IDEAM	5,20	179
Pácora (GIA)	San José	FNC	4,53	98
Tuluá (GIA)	Bugalagrande (GIA)	Automática	4,62	-73
Bugalagrande (GIA)	Tuluá (GIA)	Automática	4,62	73
Jardín	Miguel Valencia	FNC	0,47	16
Aguadas (GIA)	El Regazo	FNC	2,23	99
Andes	Ita Andes	IDEAM	5,08	446
El Sauce	El Sauce	FNC	0,00	0
San Gerardo (GIA)	Vuelta Honda (GIA)	Automática	4,60	115
Marquetalia (GIA)	La Esperanza	FNC	0,48	13
Salamina (GIA)	Salamina Conc Barc	IDEAM	2,86	22
Balboa	Balboa	IDEAM	11,07	90
Potosí (GIA)	Caicedonia	Automática	4,50	62
Riosucio (GIA)	La Oriental	FNC	5,51	-282
Salgar (GIA)	Ciudad Bolívar	Automática	7,94	99
Bolívar (GIA)	Hidromayo Camp	IDEAM	11,07	-25
Pueblorrico (GIA)	Pueblorrico	IDEAM	3,35	-164
Buesaco (GIA)	Buesaco	IDEAM	1,65	-117
Sandoná	Sandoná	IDEAM	3,17	-229
Bolívar (GIA)-Valle	Manuel María Mallarino	Automática	20,36	452
Consacá (GIA)	Bomboná	IDEAM	3,75	445
Sotará (GIA)	Rosas	IDEAM	3,18	42
Almaguer (GIA)	Bolívar (GIA)	Automática	18,58	174
Jericó (GIA)	Pueblorrico	IDEAM	3,35	-164
Rosas (GIA)	La Sierra	IDEAM	13,38	-9
Jardín (GIA)	Miguel Valencia	FNC	0,47	16
Páez (GIA)	San Luis	IDEAM	3,34	265
Villaraz	El Medio	FNC	7,62	289

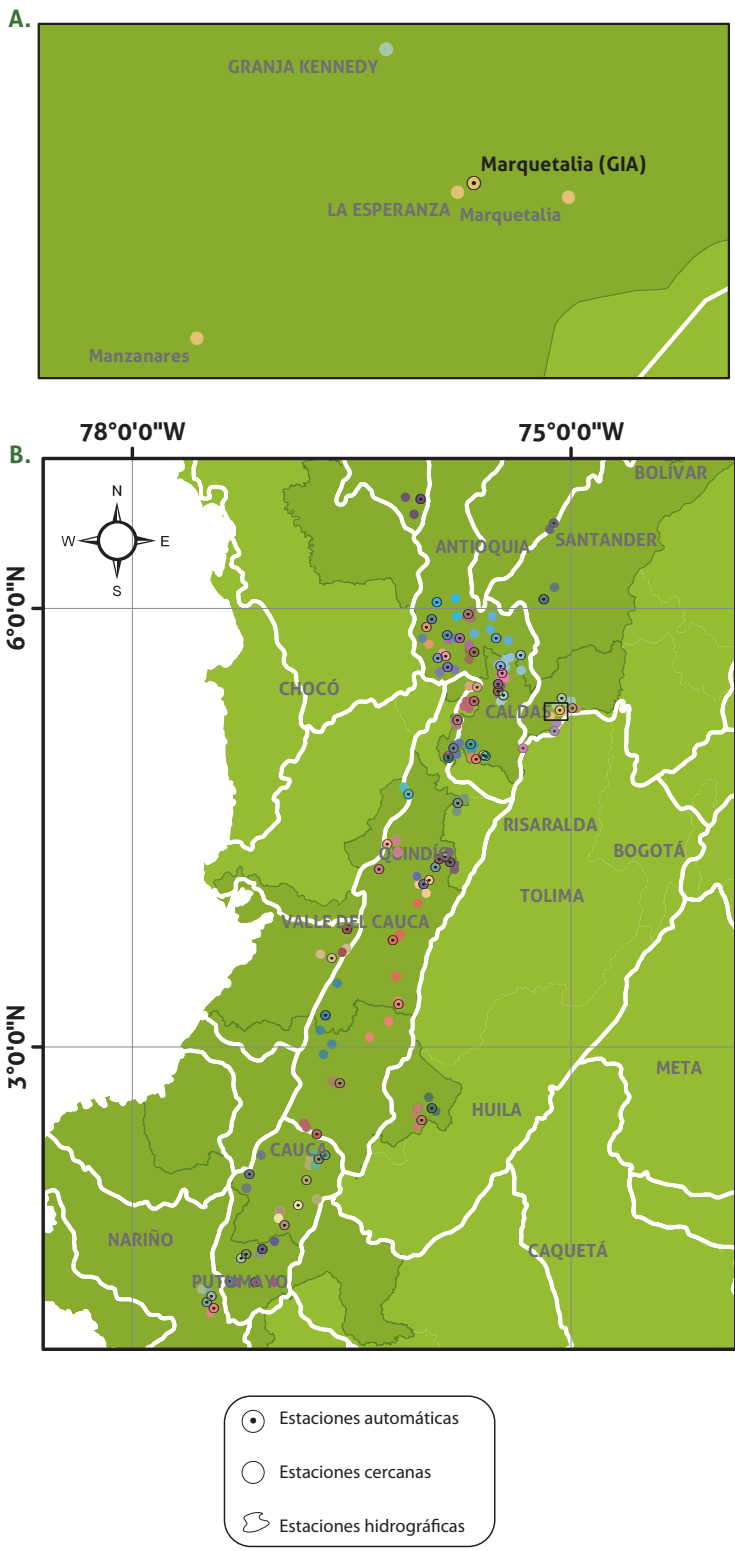


Figura 17. A. Estaciones cercanas a la estación Marquetalia (GIA). B. Colores iguales representan las estaciones seleccionadas como cercanas a una estación automática.

En la Figura 18 se muestra la serie de precipitación de la estación Marquetalia y de la estación La Esperanza, las cuales se encuentran a una distancia de 0,48 km, con una diferencia altitudinal de 13 m. Se observa similitud en el comportamiento de la precipitación registrada por las dos estaciones. A partir del análisis comparativo se encontró un porcentaje de acierto del 88%, distribuido en 34% para el número de días sin lluvia y en 54% de acierto para el número de días con lluvia. Además, a partir de las medidas de error se determinó que la precipitación registrada por la estación La Esperanza representa la precipitación de la estación Marquetalia (GIA). A nivel decadiario el nivel de acierto aumenta y por lo tanto, el error disminuye.

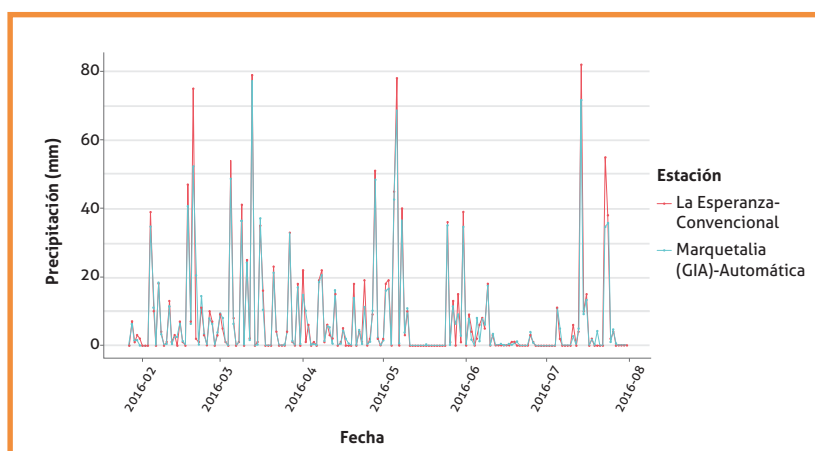


Figura 18. Series de precipitación de las estaciones Marquetalia GIA y La Esperanza.

La persistencia de un valor durante un período determinado se evalúa mediante la validación de la consistencia espacial. Se considera como un ejemplo la serie de precipitación de la estación Rosas (GIA), ubicada en el municipio de Rosas, Cauca, la cual presenta un período de dos meses con registros consecutivos iguales a cero. Al no contar con registros históricos de esta estación, se tomó como referencia la estación Rosas del IDEAM, ubicada a 3,17 km y 42 m de diferencia altitudinal.

Como se observa en la Figura 19, las series de las dos estaciones tienen comportamientos similares en la precipitación registrada, sin embargo, en los meses de noviembre y diciembre de 2016 la estación Rosas de IDEAM tiene registros de precipitación diferentes de cero. Por lo anterior, y teniendo en cuenta que en esta región el período de precipitación inicia en el mes de octubre y finaliza en el mes de mayo, los registros de la estación Rosas (GIA) durante noviembre y diciembre son erróneos y deben ser marcados como registros sospechosos.

Además de las metodologías descritas anteriormente, la plataforma de almacenamiento de datos de las estaciones automáticas debe contar con un sistema de control de los errores de formateo, transmisión y decodificación según la forma de transmisión que se esté utilizando.

Es importante tener en cuenta que en el proceso de validación siempre hay una labor final de monitorización o análisis manual que debe ser efectuada por personal cualificado, con capacidad para decidir si ciertos valores marcados como sospechosos, que son potencialmente erróneos, están asociados a fenómenos meteorológicos poco habituales como tormentas u olas de calor, entre otros (Graybeal *et al.*, 2004).

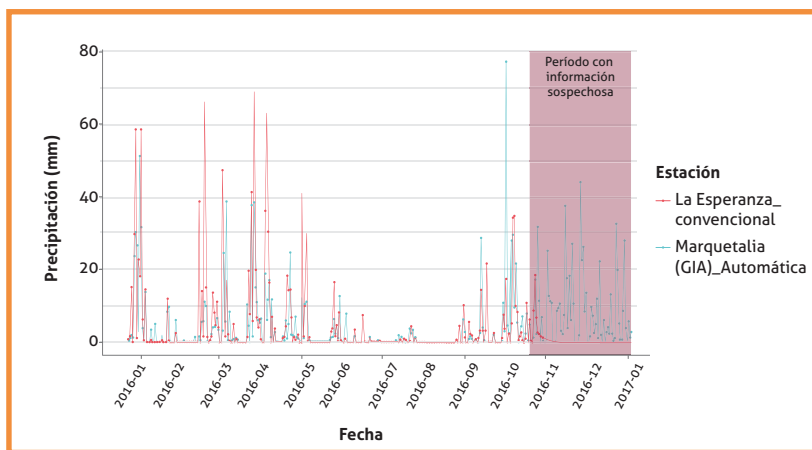


Figura 19. Persistencia de registros consecutivos en cero en la serie de precipitación de la estación Rosas (GIA) y su comparación con la estación más cercana.

Metodologías de estimación estadística de los datos meteorológicos

Uno de los problemas recurrentes en las series meteorológicas es la información faltante; esto puede deberse a diferentes causas como daño de los instrumentos, mal funcionamiento, fallas en la transmisión o en el sistema de alimentación de energía y como resultado del control de calidad.

Para el análisis de variables como la evapotranspiración de referencia y el cálculo del balance hídrico se requiere información completa en el período de estudio, por lo que se hace necesario emplear técnicas para completar los registros. Como resultado del test de consistencia espacial se obtiene no solo una condición de validación de los datos a nivel regional, sino que permite identificar cuáles son las estaciones cercanas y se puede validar si estas presentan un comportamiento similar en las series meteorológicas.

Algunos autores (Shafer *et al.*, 2000; Allen *et al.*, 2006a) proponen el uso de estaciones cercanas para sustituir los datos faltantes, calculando un valor estimado para cada estación como una media ponderada de estaciones vecinas o mediante un análisis de regresión. El error en la estimación decrece con la distancia a la estación que está siendo evaluada. Se compara la diferencia entre valor observado y estimado con la desviación típica de los valores de todas las estaciones consideradas; si este excede en más de dos desviaciones típicas, el valor se descarta.

Para el caso de la red meteorológica automática cafetera, la red de estaciones convencionales y las estaciones meteorológicas del IDEAM ofrecen información de referencia para el control de calidad y llenado de datos faltantes. Según los análisis realizados para los departamentos en los que intervino el Proyecto GIA, de 68 estaciones operando en esta zona, para la variable precipitación, 40 estaciones presentan entre el 0% y el 5% de información faltante, nueve entre el 5% y el 10%, nueve estaciones entre el 10% y el 30% y diez estaciones más del 30% de información faltante en el período comprendido entre la fecha de instalación y el 30 de junio de 2017. Así mismo, de las 68 estaciones, 22 estaciones automáticas trabajan en paralelo con una estación convencional, 27 estaciones tienen una estación cercana ya sea convencional

o automática a una distancia menor de 5 km, 14 estaciones entre 5 y 10 km, y cuatro estaciones entre 10 y 15 km.

En la Figura 20, a manera de ejemplo, se presenta la serie de precipitación de la estación Pueblorrico (GIA) y la estación Pueblorrico de IDEAM, en el departamento de Antioquia. La serie de la estación Pueblorrico (GIA) presenta dos períodos con información faltante, que limita el uso de la información para aplicaciones como el cálculo del balance hídrico. En este caso, en los períodos con información se evidencia similitud en el comportamiento de la precipitación y según el análisis estadístico, la estación Pueblorrico de IDEAM representa las características de la precipitación registrada por la estación GIA. Esto indica que es posible realizar un llenado de datos faltantes para llevar a cabo las aplicaciones requeridas, más no para completar la serie histórica de la estación.

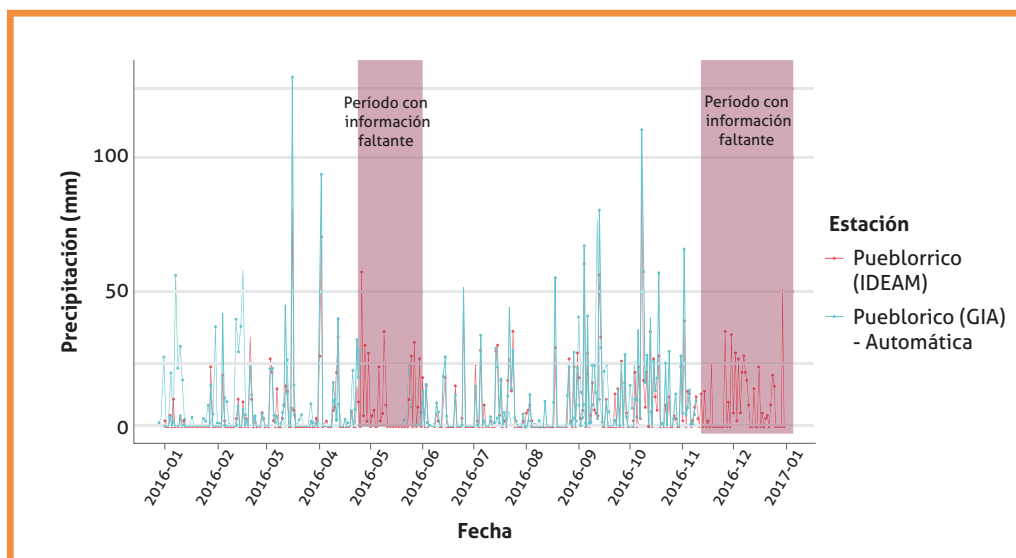


Figura 20. Serie de precipitación de la estación Pueblorrico (GIA) y la estación Pueblorrico de IDEAM.

Dependiendo de la orografía de la región, de la variabilidad y naturaleza de cada elemento, no siempre la estación más cercana es la que registra un valor parecido al valor medido en la estación que se evalúa.

Recientemente se han desarrollado otras técnicas para la estimación de datos faltantes, como son el test de regresión espacial (Hubbard *et al.*, 2005) o los procesos de interpolación espacial, entre otras técnicas estadísticas. La aplicación de las mismas dependerá de las necesidades de información que se tengan y el uso que se le vaya a dar sin embargo, **no puede olvidarse que un dato estimado mediante cualquier técnica tendrá error.**





Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

**BALANCE HÍDRICO
COMO HERRAMIENTA DE
MONITOREO EN LOS
SISTEMAS DE CAFÉ**

El ciclo hidrológico es el principio fundamental de la hidrología y representa la circulación del agua en nuestro planeta, distribuida en el océano, en la tierra y en la atmósfera. El ciclo hidrológico puede ser imaginado como una gigantesca bomba de agua que involucra un proceso de transporte circulatorio y permanente, el cual es potenciado por la radiación solar y la gravedad. Cada molécula de agua en la Tierra hace parte de este ciclo y cualquier modificación en uno de sus componentes lo afecta en su totalidad.

El balance hídrico es de gran importancia para el seguimiento de la dinámica del agua en los ecosistemas agrícolas y naturales. Indica, en el espacio y tiempo, las condiciones de humedad bajo las cuales las plantas crecen y se desarrollan, siendo útil en la interpretación del comportamiento de la planta durante períodos que difieren de las condiciones climáticas normales del lugar en cuestión, tales como períodos de exceso de agua o déficit (Silva, 2006).

Para el cálculo del balance hídrico del cultivo de café, Cenicafé utiliza la metodología desarrollada por Thornthwaite y Mather, adaptada por Jaramillo (1982, 2002) para la zona cafetera colombiana, la cual tiene en cuenta las características físicas del suelo, algunas variables de intercambio gaseoso del cultivo (evapotranspiración real y potencial) y las condiciones climáticas de la zona (radiación solar, lluvia, humedad relativa y temperatura).

Componentes del balance hídrico agroclimático

Lluvia efectiva

Una parte de la precipitación total en un ecosistema con cafetales es retenida por las copas y tallos de los árboles (**interceptación** del dosel) y reintegrada a la atmósfera por **evaporación** (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948). Del agua que alcanza el suelo (**lluvia efectiva**), la cual corresponde a la diferencia entre la lluvia externa y la lluvia interceptada, una fracción proviene del goteo de las hojas o directamente a través del dosel (precipitación directa); el resto llega al suelo mediante los tallos (**escurrimiento** fustal) (Hanchi y Rapp, 1997).

De la **lluvia efectiva** una parte vuelve a la atmósfera por **evaporación**, una proporción forma el caudal en los ríos (**escorrentía**) y otra es retenida por el suelo (**humedad del suelo**) o pasa a través del perfil del suelo llenando los poros y fisuras (**percolación**) (Jaramillo y Chávez, 1999). En cafetales con sombrío y en los suelos de origen volcánico, la percolación está alrededor del 47% y en cafetales a libre exposición solar es del 45%.

La conservación de la humedad en el suelo depende de la textura del suelo, la materia orgánica y el tipo de cobertura vegetal, entre otros. En estudios realizados por Velásquez y Jaramillo (2009), se estimó la distribución de los componentes del balance hídrico en diferentes sistemas de producción, encontrando que el porcentaje de interceptación es bajo, con valores cercanos al 8% en cafetales a libre exposición, al 14% en sistemas agroforestales con café, al 8% en un bosque y al 3% en potreros.

En la Figura 21 se presenta un resumen de la redistribución de la lluvia en diferentes ecosistemas, incluyendo la interceptación en la capa superficial del suelo y la percolación.

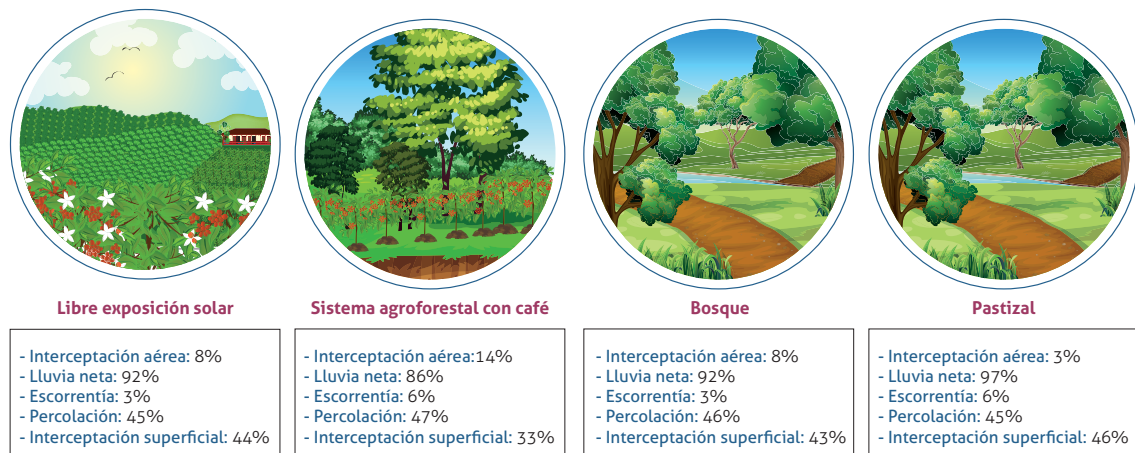


Figura 21. Redistribución de la lluvia (%) dentro de los diferentes ecosistemas.

La interceptación en un sistema de producción puede hallarse por medio de las funciones de acuerdo al tipo de cobertura, generadas por Jaramillo y Cháves, (1999), a partir de las relaciones entre lluvia efectiva y lluvia externa (Ecuaciones <1> a la <3>):

Bosque	$Lle = 61,00 / (1 + 10,40 * \exp(-0,038 * Ll))$ <1>
Cafetal bajo sombrero de guamo	$Lle = 45,05 / (1 + 9,46 * \exp(-0,049 * Ll))$ <2>
Cafetal a libre exposición	$Lle = 69,13 / (1 + 12,45 * \exp(-0,040 * Ll))$ <3>

Lle = lluvia efectiva

Ll = lluvia externa

Con el uso de las expresiones de cálculo **“Se obtiene una aproximación más ajustada a la realidad de la influencia que ejerce la cobertura vegetal en la redistribución del agua lluvia en los diferentes componentes del ciclo hidrológico”** (Figura 22).

En general, en los procesos nombrados anteriormente el agua vuelve a la atmósfera por evaporación o puede absorberse por las raíces de las plantas para luego ser transpirada; como en la práctica no es fácil separar ambos fenómenos, suelen englobarse en el término **evapotranspiración** (Campos, 1984; Penman, 1948; Thornthwaite, 1948).

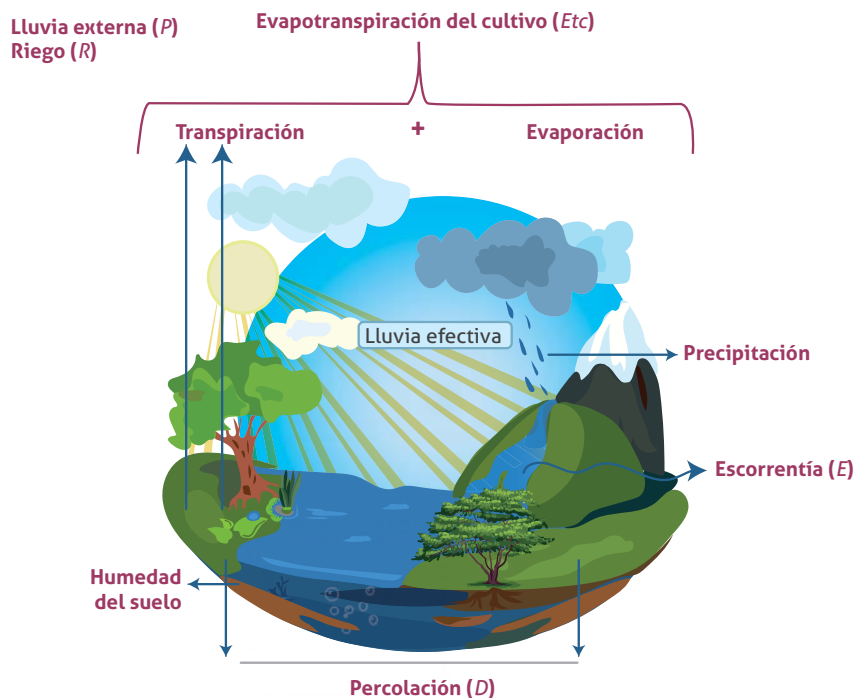


Figura 22. Representación del ciclo hidrológico.

Evapotranspiración de referencia y de cultivo

La **evapotranspiración** es un proceso que combina la evaporación desde el suelo y la transpiración a través de las estomas de las plantas.

La **evapotranspiración de referencia (ET_o)** es la cantidad de agua evaporada desde una superficie cubierta totalmente de pasto con una altura entre 8 y 10 cm sin restricciones de agua y de nutrientes. Los únicos elementos que afectan la evapotranspiración de referencia son los climáticos y por lo tanto puede ser calculada a partir de los datos meteorológicos. El método de Penman-Monteith es el único método recomendado para determinar la evapotranspiración de referencia de cualquier localidad: tiene bases físicas sólidas e incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Allen *et al.*, 2006).

La **evapotranspiración de cultivo (ET_c)** se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo que puede ser determinada directamente a través de los métodos de transferencia de masa, de un balance de energía, a partir de la medición de los componentes del balance de agua en el suelo en terrenos cultivados o mediante el uso de lisímetros. Estos métodos generalmente exigen precisión en las mediciones, requieren de equipos especializados y de largos períodos de medición, que generalmente son costosos, de manera que su uso se limita a determinaciones para algunos cultivos de interés y a nivel de investigaciones.

Por lo tanto, para la mayoría de los cultivos, la evapotranspiración de cultivo (ET_c) se estima como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (k_c) (Allen *et al.*, 2006), como se presenta en la Ecuación <4>.

$$ET_c = K_c * ET_o \text{ <4>}$$

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K_c = coeficiente del cultivo

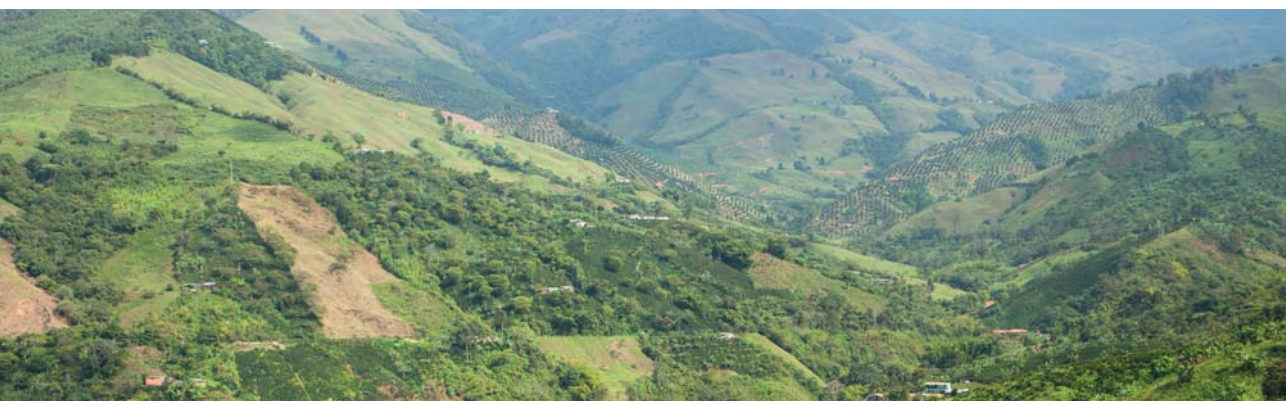
ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)

Los K_c se determinan experimentalmente mediante la medición de algunos componentes del balance de agua en un volumen de suelo cultivado (Allen *et al.*, 2006). Una vez obtenidos los valores de K_c para las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo, estos se multiplican por la ET_o calculada mediante uno de los métodos mencionados y se obtiene la ET_c para ser aplicada en el balance hídrico (Allen *et al.*, 2006).

Según estudios realizados en Brasil, el K_c es de 0,80; 0,95 y 1,05 para cafetales de uno, dos y más de tres años de edad respectivamente y con una densidad mayor a 6.000 plantas por hectárea (Allen *et al.*, 2006; Marín, 2003). En Colombia se evaluaron los valores de K_c en dos sistemas de producción de café (a libre exposición y bajo sombra) durante la etapa vegetativa, encontrando valores de 0,50 y 0,55 respectivamente (Cenicafé, 2015).

Pueden emplearse otros métodos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, según la disponibilidad de información de las variables meteorológicas. Jaramillo (2007) estimó las variaciones temporales y altitudinales de la ET_o (Penman-Monteith) y propuso una expresión empírica aplicable en los estudios de zonificación climática de las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, localizadas en la región andina de Colombia, para altitudes entre 170 y 3.700 m. En la Figura 23 se muestra la distribución de la ET_o determinada a partir de la Ecuación <5>.

$$ET_o \left[\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right] = 4,21 * \exp(-0,0002 * \text{Altitud}[m]) \text{ <5>}$$



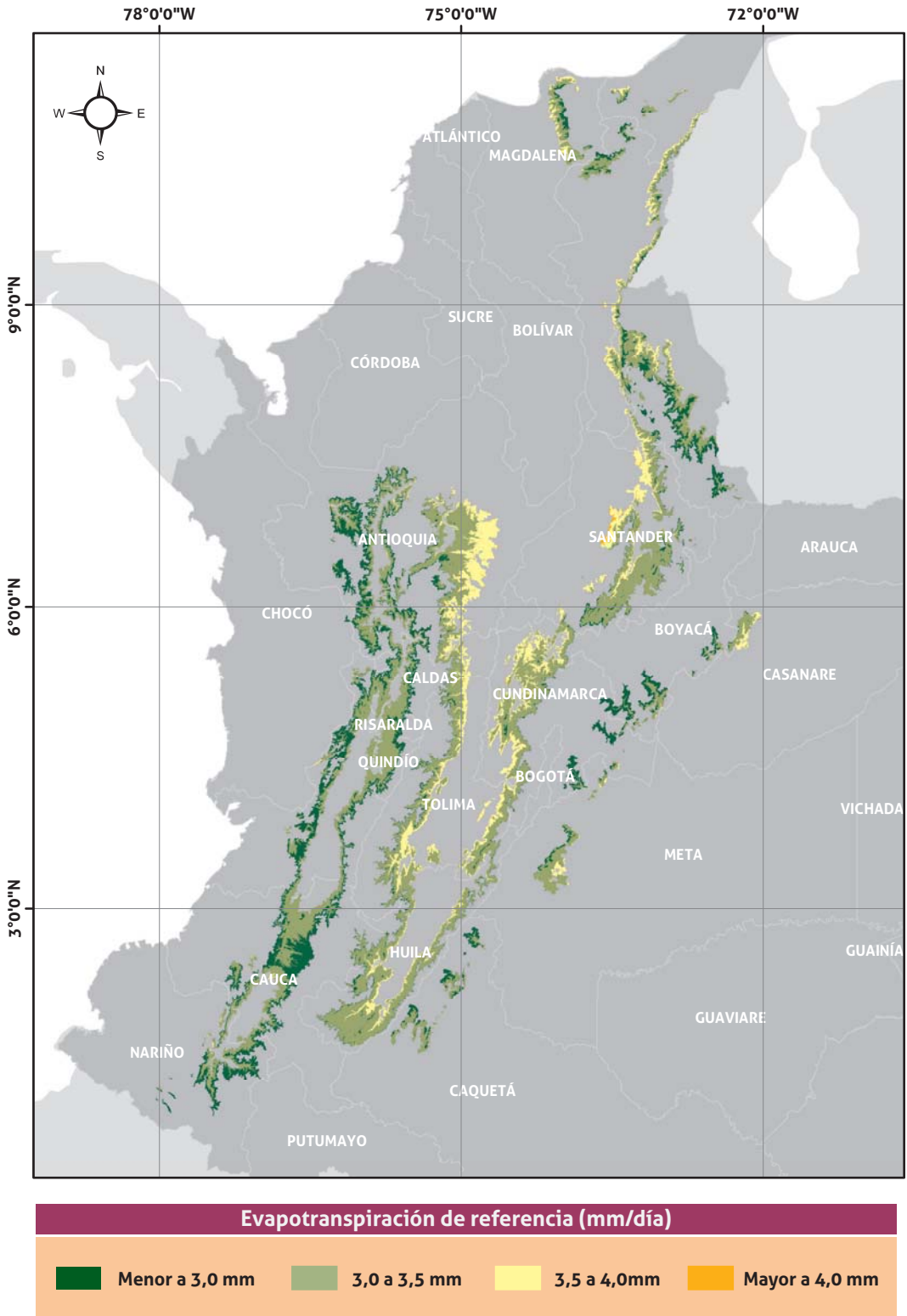


Figura 23. Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (mm/día) determinada por la expresión propuesta por Jaramillo (2007).

Capacidad de retención de humedad

El suelo actúa como una esponja para retener agua y proveer un reservorio para las plantas. Está compuesto por minerales (arcilla, limo y arena), materia orgánica, organismos vegetales y animales, gases (especialmente aire) y agua. Debido a las diferencias en forma y tamaño, se producen espacios entre las partículas de suelo denominados poros.

Los poros que varían entre 0,0002 y 0,0500 mm de diámetro retienen agua que puede ser absorbida por los cultivos y se los llama poros de almacenamiento, mientras que los poros más pequeños o poros residuales, retienen tan fuertemente el agua que las plantas no la pueden extraer de los mismos. Los poros mayores de 0,05 mm de diámetro, conocidos como poros de transmisión, permiten que el agua drene a través del suelo y la entrada de aire a los mismos a medida que el agua es drenada. Los espacios de poros también son necesarios para que las raíces penetren libremente en el suelo a fin de tomar nutrientes y agua (Shaxson y Barber, 2003).

Después de un evento de lluvia fuerte el suelo comienza a drenar el agua hasta alcanzar la capacidad de campo, que representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de la fuerza de gravedad y corresponde a una succión de 1/3 bar. En ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reduce como resultado del consumo de agua por el mismo cultivo. A medida que el consumo de agua aumenta, el agua es retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, haciendo más difícil la extracción por parte de la planta, hasta el punto en que no la puede extraer. Este punto corresponde al punto de marchitez permanente y se refiere al contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente (Allen *et al.*, 2006).

La humedad del suelo describe la cantidad de agua en el suelo, la cual puede ser cuantificada en base gravimétrica, que relaciona el peso del agua con el peso del suelo, o en base volumétrica, que relaciona el volumen del agua con el volumen de suelo.

Las fuerzas (o succiones) con las cuales esta agua es retenida varía de acuerdo al tamaño de los poros. Los poros más grandes retienen agua a una tensión de cerca de un décimo a un tercio de la presión atmosférica (0,10 a 0,33 bares), dependiendo de qué succión corresponde a la capacidad de campo del suelo. La succión máxima que pueden ejercer muchos cultivos para extraer agua del suelo varía con el cultivo, pero el valor generalmente aceptado es de cerca de 15 veces la presión atmosférica (15 bares) (Shaxson y Barber, 2003).

Los contenidos de humedad por encima de la capacidad de campo no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y se drenan. Los contenidos de humedad por debajo de punto de marchitez permanente no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, por lo tanto la humedad del suelo disponible para la planta se estima con la diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo y la humedad a punto de marchitez permanente (Figura 24).

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se determina a partir de la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y la densidad aparente. Las propiedades de retención de agua de cada suelo varían según su textura, contenido de materia orgánica y profundidad efectiva.

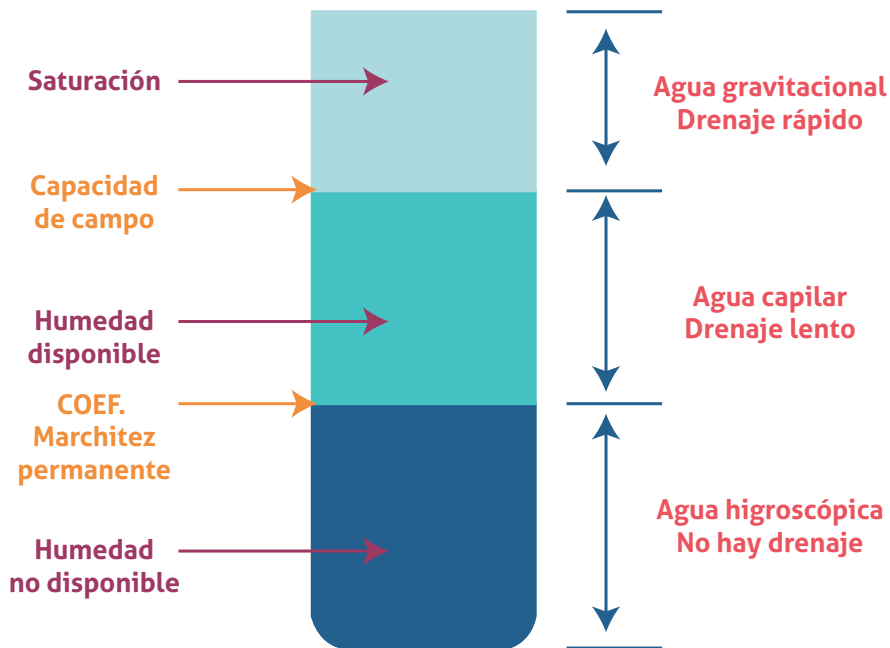


Figura 24. Saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

El almacenamiento máximo o lámina de agua aprovechable del suelo representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular, cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular, y se determina mediante la siguiente expresión (Ecuación <6>):

$$A_{max}[mm] = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * Pr[cm] * 10 \quad <6>$$

Donde: A_{max} es el almacenamiento máximo en la zona radicular del suelo (mm); θ_{cc} es el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} es el contenido volumétrico de humedad en el punto de marchitez permanente; Pr es la profundidad de las raíces (cm) y 10 corresponde al factor de conversión a milímetros (mm).



Para la determinación de la capacidad de retención de humedad de los suelos de la zona cafetera se han empleado diferentes fuentes de información: la toma de muestras de suelo en el área en la que están instaladas las estaciones meteorológicas para la evaluación de propiedades físicas, la información disponible de las unidades de suelo y los estudios de ecotopos cafeteros.

Se realizaron muestreos de suelo en los sitios adyacentes a las estaciones meteorológicas automáticas instaladas en el área de las microcuencas GIA (Figura 25). Mediante pruebas de laboratorio se determinaron textura, densidad aparente, densidad real, porosidad, capacidad de retención a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) a 15 y 30 cm de profundidad.

El estudio de ecotopos cafeteros (Gómez *et al.*, 1991) definió 86 agrupaciones en la zona cafetera de Colombia, con base en la predominancia del tipo de suelo, el comportamiento anual de la lluvia y su distribución, y en la longitud normal de los períodos de crecimiento del cultivo de café, a través de balances hídricos.

En la Figura 26 se muestra el agua aprovechable (en mm), a 30 cm de profundidad en los puntos muestreados, y la distribución espacial de los ecotopos cafeteros y las unidades de suelo. Esta información, además de otras propiedades físicas del suelo, se utiliza para el cálculo del balance hídrico.

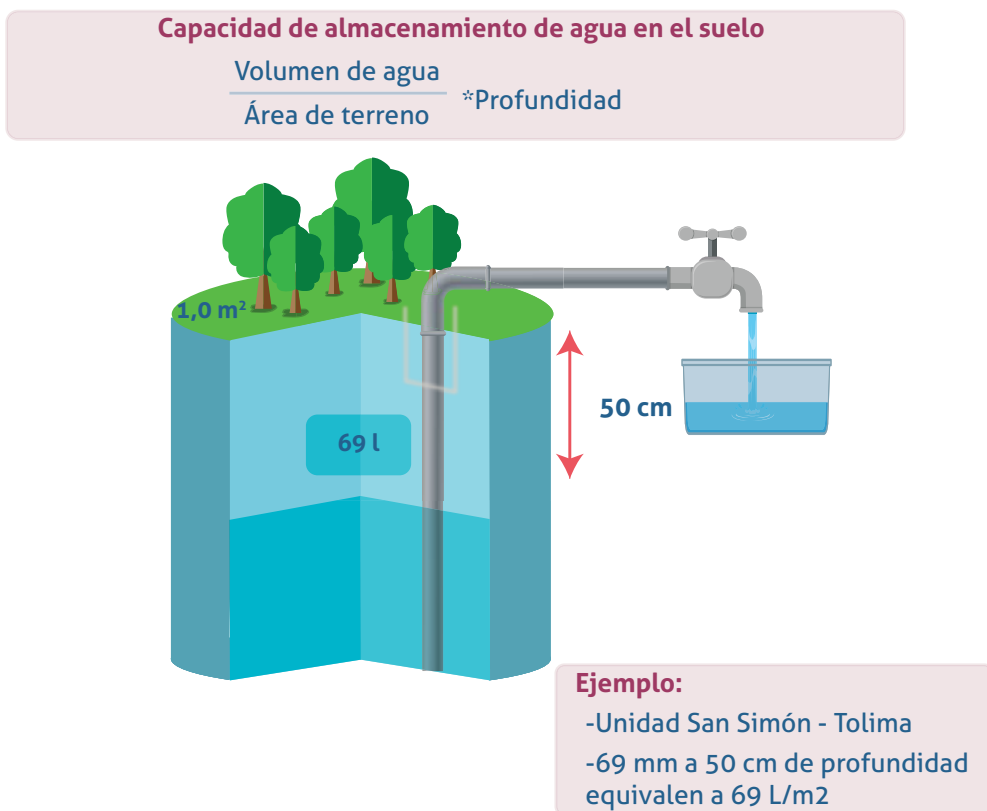


Figura 25. Representación de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

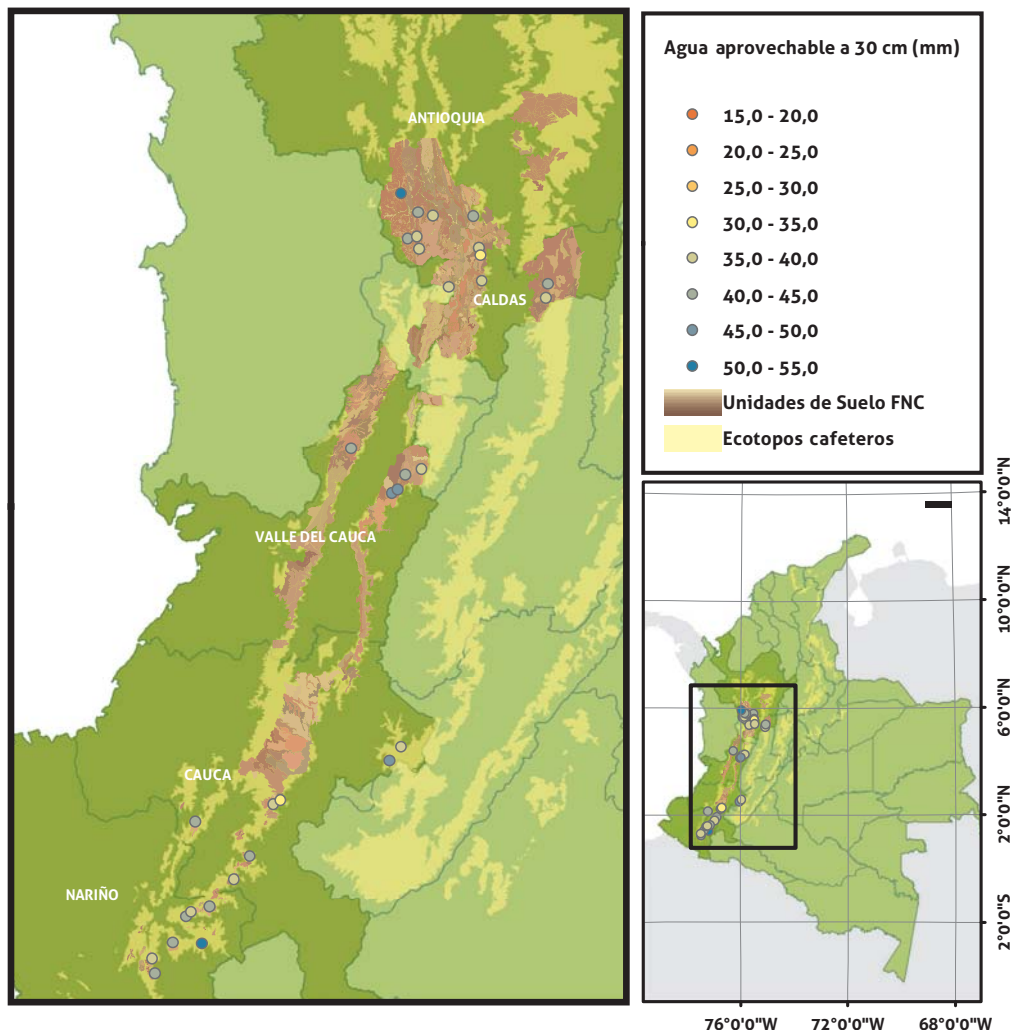


Figura 26. Agua aprovechable a 30 cm de profundidad en los puntos de muestreo y distribución espacial de los ecotopos cafeteros y unidades de suelo en los departamentos intervenidos por el proyecto GIA.

Método del balance hídrico para el cultivo de café

Siguiendo la metodología adaptada por Jaramillo (1982, 2002) para la zona cafetera colombiana, el modelo de balance hídrico (Figura 27) tiene como entradas las variables meteorológicas, los parámetros de cultivo y las propiedades físicas del suelo. La humedad relativa, temperatura, radiación solar y velocidad del viento, son empleadas en el cálculo de la evapotranspiración de referencia, mientras que la precipitación se utiliza para el cálculo de la lluvia efectiva.

En cuanto a los parámetros del cultivo de café, según el sistema de producción (café a libre exposición o café bajo sombrío), varía el cálculo de lluvia efectiva. La profundidad radicular y el coeficiente de cultivo están en función de la edad del cultivo.

Las propiedades físicas del suelo como el contenido de humedad en capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la densidad aparente, se utilizan para el cálculo de la capacidad de retención de humedad.

Se realizaron rutinas en *R* con la implementación de los algoritmos de cálculo del balance hídrico y de la evapotranspiración de cultivo.

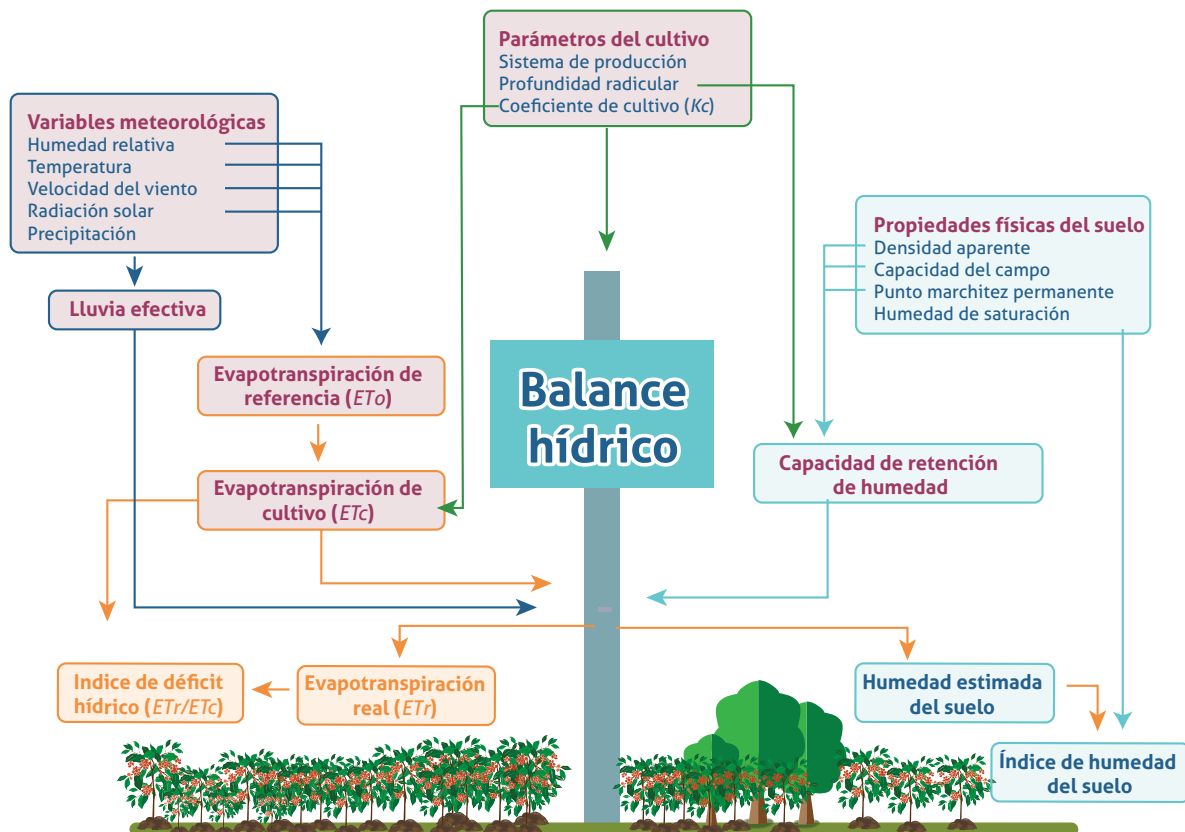


Figura 27. Metodología de cálculo del balance hídrico.

Según la escala temporal que se quiera evaluar, sea diaria, decadiaria o mensual, se parte de una condición inicial en la que se asume que el suelo está a su máxima capacidad de almacenamiento y que con el transcurso del tiempo, según el consumo de la planta y las entradas de agua por la precipitación, va variando. Para el caso del Proyecto GIA, el balance hídrico se calcula a escala decadiaria, es decir, que se evalúa la condición del cultivo cada 10 días.

Como resultado del balance hídrico se tienen: la magnitud del exceso o el déficit, y los índices de déficit y exceso hídrico.

El exceso se presenta cuando la lluvia efectiva es mayor a la evapotranspiración de referencia, es decir, cuando la entrada de agua al sistema es mayor que el requerimiento del cultivo. Por su parte, el déficit expresa la condición contraria, es decir, cuando el requerimiento hídrico del cultivo es mayor al agua que entra al sistema.

El índice de déficit hídrico (IDH), es un indicador del desempeño del cultivo con base en la disponibilidad de agua en el suelo durante un período de crecimiento. Para una etapa de crecimiento del cultivo de café, el IDH es estimado como la relación entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración de referencia. Evapotranspiración real es la cantidad de agua evaporada desde el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas presentes.

Los valores del índice de déficit hídrico varían entre 0 y 1, alcanzando su máximo valor cuando se ha suplido todo el requerimiento hídrico del cultivo. La disminución de este valor representa que parte del requerimiento hídrico del cultivo no fue suplido.

Por su parte, el índice de humedad del suelo (IHS) describe cuál es la cantidad de agua almacenada en la zona de raíces en relación a la máxima capacidad de almacenamiento del suelo. Para calcularlo debe conocerse la humedad a saturación del suelo y la humedad volumétrica actual. Valores por encima de 0,6 representan limitaciones por exceso hídrico; valores por debajo de 0,3 representan limitaciones por déficit hídrico. Cuando el valor es igual a 1,0 el suelo está saturado; cuando es cero, el suelo está seco (Ramírez *et al.*, 2010a).

Se estableció que 20 días consecutivos corresponde al tiempo a partir del cual la continuidad en la condición de déficit o exceso genera afectación sobre el cultivo de café, según la etapa fenológica en la que se encuentre. Según la continuidad de la condición deficitaria o de exceso, se definieron cinco estados que describen la condición de humedad, a partir de los cuales pueden generarse recomendaciones para el manejo del cultivo, según la edad, la etapa fisiológica y la labor a realizar. Cuando el índice de humedad se encuentra entre 0,3 y 0,6, el suelo se encuentra en una condición **normal**, es decir, que es adecuada para el cultivo (Figura 28).

Para dos períodos decadiarios continuos en que el índice esté por debajo de 0,3, se considera que el suelo está **moderadamente seco**; pero si esta condición continúa, el suelo en el siguiente período tendrá una condición **muy seca**.

En cuanto al exceso, dos períodos decadiarios continuos que presenten un valor de IHS mayor a 0,6 se define como una condición **moderadamente húmeda**; y si persiste, como una condición **muy húmeda**.

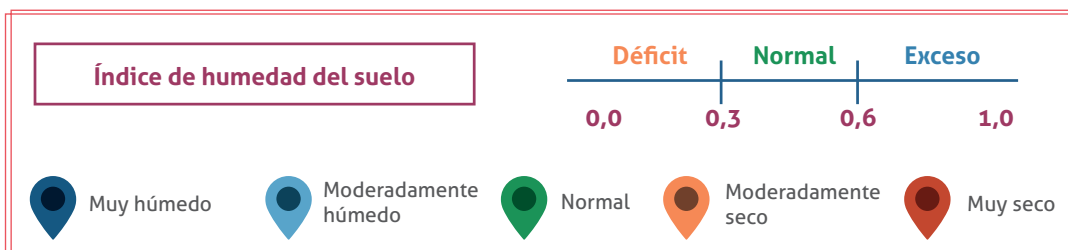


Figura 28. Estados que describen la condición de humedad del suelo según su continuidad.

Por ejemplo, para el período comprendido entre los meses de junio y noviembre de 2017 en la estación Cominales (GIA), ubicada en el municipio de Sevilla, Valle del Cauca, se presentó una condición muy húmeda durante el mes de junio que se extendió hasta la segunda década del mes de julio; posteriormente se presentó una condición moderadamente seca a seca, relacionada con la ocurrencia de un período de baja precipitación que inició en el mes de julio y finalizó en el mes de agosto. A partir del mes de septiembre, la ocurrencia del período lluvioso del segundo semestre del año acentuó la condición muy húmeda en el suelo para esta zona (Figura 29).

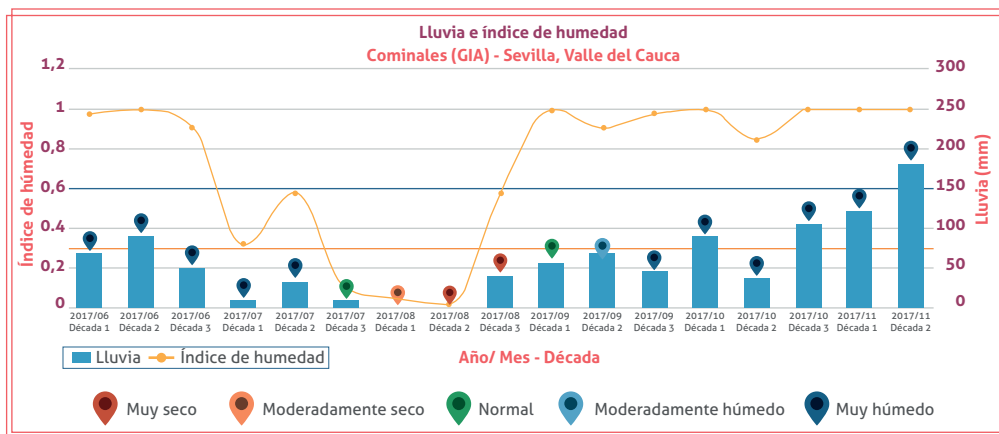


Figura 29. Balance hídrico para la estación Cominales (GIA) ubicada en el municipio de Sevilla, Valle del Cauca. La línea azul indica el valor de IHS de 0,6 y la línea roja el valor de 0,3, para el exceso y déficit, respectivamente.

Otro ejemplo se muestra en la estación Marquetalia (GIA), en el departamento de Caldas, en la cual la condición moderadamente seca se presentó en la última década del mes de julio y primera década del mes de agosto, seguida de una condición normal a muy húmeda, con alta ocurrencia de precipitación. Como se observa en la Figura 30, pese a que la disminución de precipitación se presentó desde la segunda década del mes de mayo, el índice de humedad del suelo presentó una disminución significativa solo hasta la primera década de julio, es decir que la precipitación durante estos meses fue suficiente para abastecer las necesidades del cultivo.

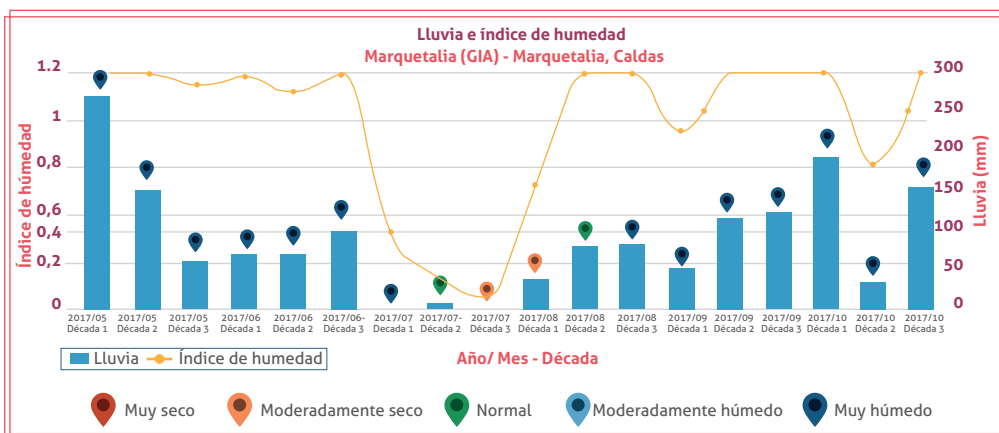


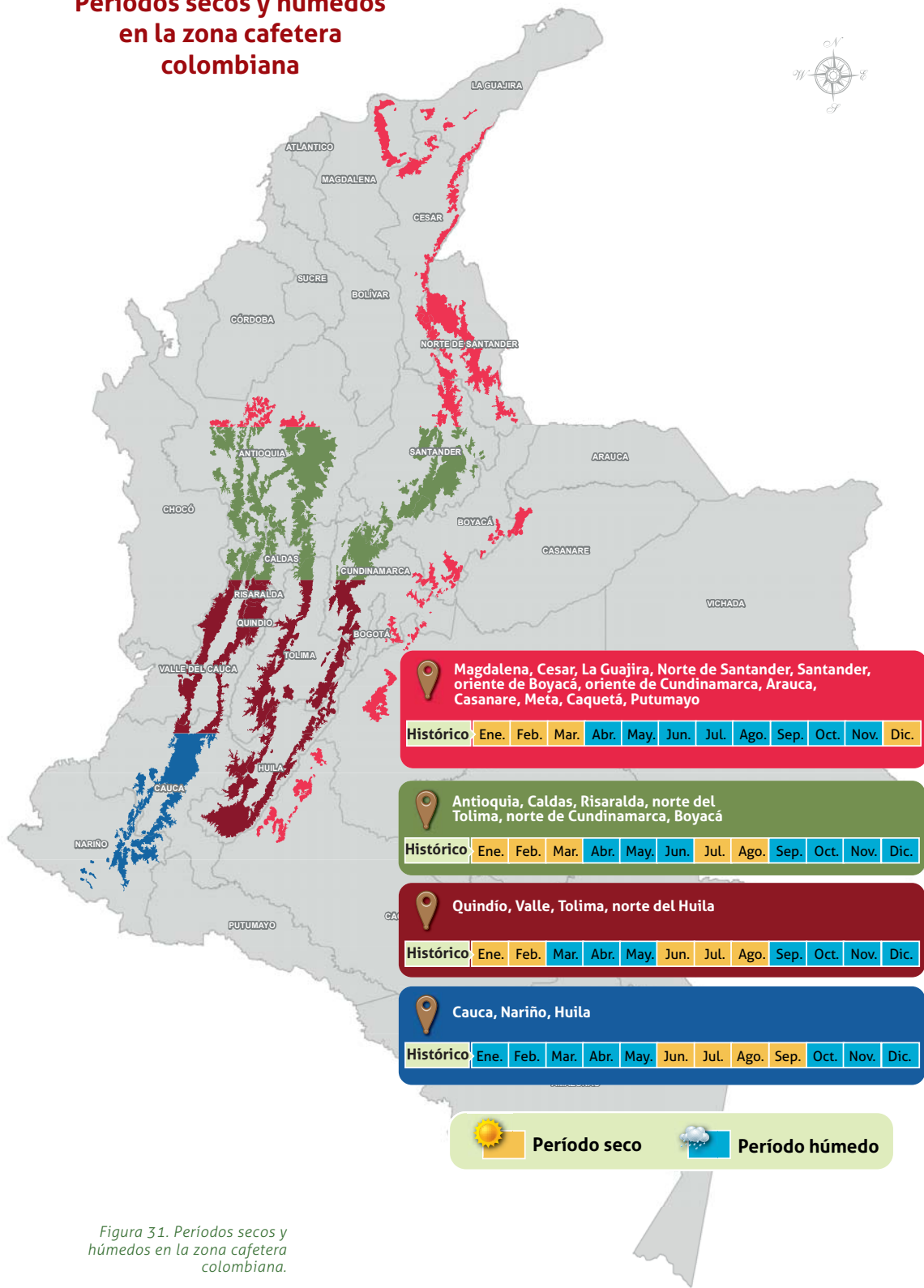
Figura 30. Balance hídrico para la estación Marquetalia (GIA) ubicada en Marquetalia, Caldas.

Los estudios de balance hídrico han permitido comprender la distribución de los períodos secos y húmedos, que a su vez determinan las épocas de crecimiento, floración, desarrollo del fruto y producción durante el año (Figura 31). Así, hoy en día se conoce que la distribución inter-anual de la precipitación en la zona cafetera del centro y parte del sur, se caracteriza por la ocurrencia de dos períodos secos y dos lluviosos en el año, mientras que en las zonas norte, oriente y sur, se caracteriza por una única estación lluviosa en el año (Jaramillo *et al.*, 2013).

La ocurrencia de estos períodos está determinada principalmente por el movimiento latitudinal de la zona de confluencia intertropical (ZCIT), la cual influencia en la nubosidad y la cantidad de precipitación. Los cambios en la temperatura superficial del océano Pacífico relacionado con la ocurrencia de los fenómenos El Niño o La Niña, alteran los patrones de distribución de la lluvia y pueden acentuar los períodos secos o húmedos.



Períodos secos y húmedos en la zona cafetera colombiana



Magdalena, Cesar, La Guajira, Norte de Santander, Santander, oriente de Boyacá, oriente de Cundinamarca, Arauca, Casanare, Meta, Caquetá, Putumayo

Histórico	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Antioquia, Caldas, Risaralda, norte del Tolima, norte de Cundinamarca, Boyacá

Histórico	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Quindío, Valle, Tolima, norte del Huila

Histórico	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Cauca, Nariño, Huila

Histórico	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Período seco **Período húmedo**

Figura 31. Períodos secos y húmedos en la zona cafetera colombiana.





Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

ÍNDICES DE DÉFICIT
Y EXCESO HÍDRICO

5

Los sistemas naturales y humanos se afectan por episodios meteorológicos extremos, los cuales pueden ocurrir por períodos de tiempo específicos; dentro de estos se consideran los originados por exceso y déficit hídricos (IPCC, 2014). El cultivo de café estará más propenso a ser afectado, de acuerdo con la ubicación altitudinal, longitudinal y altitudinal del sistema de producción, las condiciones biofísicas, la variedad, y en general, el manejo agronómico. El riesgo de un sistema de producción de café estará representado por condiciones de amenaza específicas, como aquellas relacionadas con eventos de variabilidad ENOS y su interacción con el sistema de producción (Cenicafé, 2013). La posibilidad de conocer de manera temprana los efectos por cambios en los patrones climáticos, por ejemplo en la precipitación, le permitirá al caficultor realizar los ajustes de manera oportuna.

En este capítulo se hará referencia a las relaciones entre el déficit y el exceso hídricos con las etapas fisiológicas del cultivo. El cultivo de café tiene la mayor demanda de agua durante la fase vegetativa (hasta los 11 meses después de siembra) y en la etapa de desarrollo del fruto (entre los 60 y 170 días). Adicionalmente, la distribución de las épocas secas y húmedas determinan los períodos de floración y cosecha y definen las épocas de planificación de labores como la siembra, renovación, fertilización, manejo fitosanitario y de arvenses, entre otros.

Supuestos para la construcción del déficit y exceso

Como se mencionó anteriormente, la medición de los componentes del balance hídrico como precipitación, almacenamiento de humedad en el suelo y evapotranspiración del cultivo hacen uso de los datos registrados por las estaciones meteorológicas. Estos a su vez permiten la construcción de un indicador objetivo para determinar los resultados, el impacto ambiental y la efectividad del Proyecto Gestión Inteligente de Agua, en este caso, enfocados a la generación de alertas.

Para el cálculo de este índice debe conocerse la humedad a saturación del suelo, es decir el agua retenida a una presión de succión de 0 bar, y la humedad del suelo a capacidad de campo indica el agua retenida a una succión de -1/3 bar. Algunos de los rangos de los valores a las condiciones de humedad se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Rangos de humedad volumétrica del suelo en función de la presión de succión.

Nombre	Notación	Presión de succión bares	Valores típicos de agua* cm ³
Contenido de agua a saturación	θ_s	0	0,27-0,94
Capacidad de campo	θ_{cc}	-1/3	0,22-0,65
Punto de marchitamiento permanente	θ_{pmp}	-15	0,13-0,42

*Valores promedio de 32 muestreos de suelos de la zona cafetera colombiana.

La E_t se calcula a partir de la metodología de “dos pasos” propuesta por FAO-56 (Allen *et al.*, 2006) utilizando la Ecuación <4>, descrita en el capítulo 3.

Donde: E_t es la evapotranspiración de referencia y K_c es el coeficiente del cultivo (Tabla 10), que depende de la etapa fenológica del cultivo (Allen *et al.*, 2006). La E_{t_0} se calcula por el método FAO Penman – Monteith; los parámetros climáticos para determinarla son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Para fines del análisis de zonas potencialmente en riesgo al déficit y el exceso hídrico, se tomó un K_c promedio de 1, equivalente a cafetales en producción y para densidades de siembra medias.

Tabla 10. Valores de K_c propuestos por Santinato <i>et al.</i> , (1996) en Brasil para café (Silva, 2006)		
Edad (Años)	Espaciamiento entre plantas	Valores de K_c
Adulto > a 3 años	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	1,0
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	1,1
	c) 2,0 a <3,0x 1,0 = 6.666 plantas/ha	1,2
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	1,3
Nuevo 1 a 3 años	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	0,8
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	0,9
	c) 2,0 a <3,0x1,0 = 6.666 plantas/ha	1,0
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	1,1
Nuevo 0 < 1 año	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	0,6
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	0,7
	c) 2,0 a <3,0x1,0 = 6.666 plantas/h	0,8
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	0,9

Una vez definido el IHS, se determinaron los niveles críticos para el cafeto, partiendo del trabajo desarrollado por Gómez (2000), quien encontró a nivel de campo que la fotosíntesis del cafeto se reducía por condiciones de déficit y de exceso hídricos. Gómez (2000) determinó como niveles críticos para los índices de déficit hídrico el IHS <0,35 y para exceso hídrico el IHS >0,55 (Figura 32); a partir de estos puntos la fotosíntesis se reduce en más del 25%. En este mismo estudio se encontró que la máxima actividad fotosintética en café se observa cuando la humedad volumétrica está en 35%, lo que equivale a un IHS = 0,50.

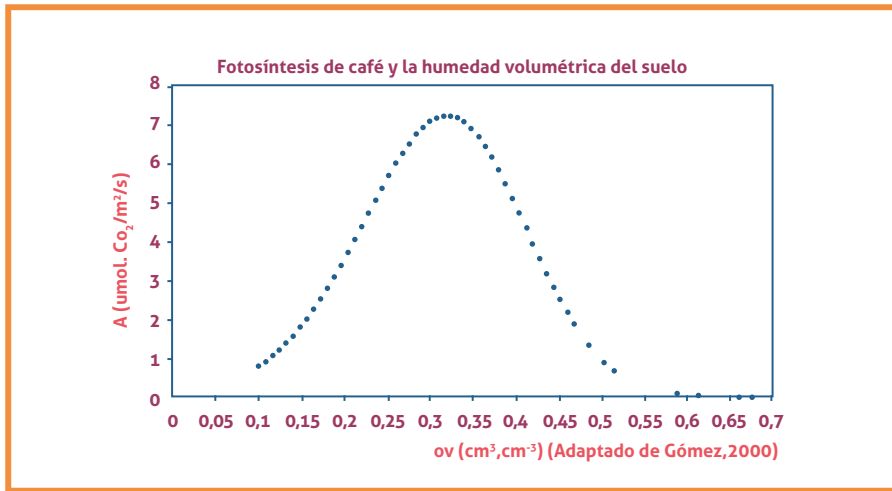


Figura 32. Relación entre la fotosíntesis A y la humedad volumétrica (OV) del suelo.

Estos índices con un criterio fisiológico fueron evaluados por Ramírez *et al.* (2010); de esta manera se encontró que el número de días con IHS >0,6, se relaciona con la disminución en el número de botones florales, siendo este, por lo tanto, un indicador del efecto negativo del exceso hídrico sobre la productividad, que se puede emplear como criterio de vulnerabilidad al exceso hídrico.

Para evaluar el efecto del déficit hídrico sobre un componente de productividad del cultivo, se realizaron varios muestreos en diferentes localidades del país en los meses de marzo y septiembre (durante los años 2010 y 2011). En ellos se observó el efecto acumulado del déficit hídrico de los meses de diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto, lo que mostró una relación directa entre el número de días con IHS <0,3 y el daño en los frutos por déficit hídrico. Esto indica que la vulnerabilidad del sistema productivo de café ante el déficit hídrico se explica sobre el efecto de la falta de agua en el llenado de frutos y la reducción de la cosecha por aumento en el número de frutos de mala calidad como frutos negros, vanos y parcialmente llenos, entre otros.

Déficit hídrico vs. etapa fisiológica del cultivo de café

Del sistema de raíces, el 89% se encuentra en los primeros 30 cm de profundidad, por lo cual el agua debe estar disponible en esta zona; algunas condiciones físicas del suelo como la alta pedregosidad, el mal drenaje, la poca aireación y la baja retención limitan el desarrollo radical (Arcila *et al.*, 2007).

La mayor parte de la caficultura colombiana se desarrolla sin riego, por lo cual la mayor vulnerabilidad se asocia al déficit hídrico (Cenicafé, 2013). A partir de la continuidad de los períodos decadiarios con déficit se puede afectar o beneficiar el cultivo, de acuerdo a la etapa fisiológica. Ramírez (2014) identificó las unidades de suelo más vulnerables al déficit y determinó que en algunas de ellas la condición crítica de humedad se inicia antes de 15 días continuos de déficit (muy vulnerables), otros la experimentan entre los 15 y 30 días (vulnerables), y otros la presentan después de 30 días (poco vulnerables). En las fases de germinador y almácigo debe suplementarse riego, además las condiciones del sitio deben favorecer un rápido drenaje. En almácigo es importante la humedad para realizar prácticas como la fertilización y favorecer el desarrollo de raíces.

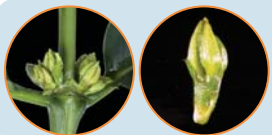
En la etapa de crecimiento vegetativo, el déficit hídrico en períodos continuos afecta las condiciones físicas y químicas de suelo, altera el desarrollo y distribución de raíces, limita el anclaje y ocasiona debilitamiento de la planta que puede trascender al amarillamiento foliar, secamiento de ramas y hasta la muerte de la planta (Arcila, 2007).

Durante el crecimiento, en los procesos de formación de nudos, ramas y hojas, la poca disponibilidad hídrica puede afectar la tasa de emisión de estos, como ocurre en zonas con períodos secos, acentuados al norte y sur del país (Arcila, 2007). Adicionalmente, después de estos períodos secos las plantas experimentan amarillamiento y posterior defoliación si el sistema de producción no se encuentra adaptado, por ejemplo, con sombrío (Arcila, 2007; Cenicafé, 2013).

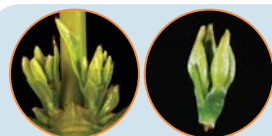
Durante la floración se presentan cinco etapas (Figura 33): la inducción floral (30 a 35 días), el desarrollo de botones florales hasta la condición conocida como "comino" (45 días), la latencia (30 días), la preantesis (6 a 10 días) y la antesis (3 días). El agua juega un papel importante en cada una. En la primera etapa, la baja disponibilidad de agua, junto con la poca oferta de brillo solar, son determinantes en cambios hacia estados intermedios de desarrollo floral. En la tercera etapa debe existir un período seco de magnitud moderada que permita la maduración de los botones y la ruptura de la latencia, la cual ocurre al presentarse un evento lluvioso al final de esta etapa. Si después de iniciada la preantesis continúa un déficit hídrico o los aguaceros son esporádicos y de baja intensidad, dentro de un período seco prolongado, puede presentarse la anomalía denominada flor estrella (Arcila, 2007).



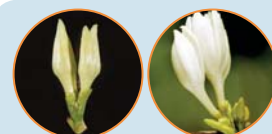
Iniciación de la inflorescencia (BBCH-53). Los botones florales de color verde presentan un tamaño promedio de 2 mm, y se encuentran recubiertos por una capa delgada de mucilago de color ámbar, cuya función parece estar ligada a conservar la humedad del botón durante este estado (Drinnan, 1992; Camayo *et al.*, 2003; Arcila, 2004).



Desarrollo de los botones florales (BBCH-57). Se observan botones florales de color verde con un tamaño promedio de 2,6 mm completamente adheridos entre sí, aún sin abrir, que sobresalen por debajo de las estípulas, emergiendo de la inflorescencia. Esta etapa tiene una duración de 45 días aproximadamente (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).



Latencia (BBCH-58). Botones florales verdes e individuales, con un tamaño aproximado de 4-6 mm que cesan su crecimiento y entran a una fase de reposo inducido por la exposición continuada de la yema a estrés hídrico. Los botones en este estado se denominan "cominos" (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003).



Preantesis (BBCH-59). Botones florales definidos, blancos, con pétalos cerrados. En este estado son flores completamente desarrolladas y próximas a abrir. Las lluvias repentinas, la reducción súbita de la temperatura y las variaciones en el contenido de hormonas a nivel del nudo, estimulan al crecimiento del botón floral latente, que aumenta su longitud entre tres y cuatro veces. En este estado los botones florales son conocidos como "velones" (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).



Antesis o apertura floral (BBCH60-69). Botones florales completamente abierto, de aproximadamente 20 mm de longitud, que dejan al descubierto pétalos, estambres y pistilo (Arcila *et al.*, 2001; Arcila, 2004). Son flores maduras y funcionales (Adaptado de Wormer y Gituanja, 1970; Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003).

Figura 33. Etapas principales de la floración de café.

Durante el desarrollo del fruto ocurren cuatro etapas: la primera, entre 0 y 50 días después de la floración, de crecimiento lento; la segunda, entre 50 y 120 días después de floración, de crecimiento acelerado, donde el fruto adquiere su tamaño final, pero de consistencia gelatinosa; la tercera entre 120 y 180 días después de la floración, en la que la almendra completa su desarrollo y adquiere consistencia sólida; la cuarta, entre 180 y 240 días después de la floración, cuando alcanza su madurez fisiológica e inicia la madurez de cosecha (Arcila y Jaramillo, 2003). La deficiencia hídrica en cada una de las etapas afecta el desarrollo del fruto (Figura 34), por ejemplo, en una condición severa de déficit hídrico en la primera etapa, los frutos tiernos pueden secarse. Cuando el déficit sucede en la segunda y tercera etapas puede originarse que uno o ambos lóculos no formen el endospermo, lo que se conoce como grano vano, o que uno o ambos lóculos se formen parcialmente, conocido como grano averanado. En condición severa de déficit, en estado de desarrollo de fruto avanzado, puede ocasionar que las almendras adquieran una coloración café oscura o negra, conocidas como pasillas. Un defecto final que puede ocurrir por déficit hídrico en estas dos etapas, corresponde al desarrollo de un fruto de menor tamaño (Arcila *et al.*, 2007; Arcila y Jaramillo, 2003).

El período de déficit hídrico también se relaciona con el desencadenamiento de eventos fisiológicos, esenciales para la planificación de algunas labores de cultivo.

Un período de déficit prolongado durante la latencia de la flor, seguido por un período húmedo, favorece la floración del cultivo, la cual ocurre en marzo o abril en zonas del norte y oriente de Colombia, donde se registra un período seco entre diciembre y marzo. Por el contrario, en el sur de Colombia en octubre ocurre un período seco entre junio y septiembre. En el centro del país prevalecen dos períodos secos, uno entre enero y febrero o marzo y otro entre junio o julio y agosto, después de los cuales se registran las mayores floraciones.

Relacionado con la floración se encuentran los períodos de cosecha, los cuales ocurren aproximadamente 240 días después de las floraciones principales. Adicionalmente, a partir de la floración se planifican acciones relacionadas con el manejo de broca y roya. Para la broca, a partir de los 100 días posteriores a la floración se establece un plan de monitoreo y manejo, debido a que coincide con el cambio de la consistencia del fruto en el cual la broca puede penetrar el fruto, encontrarse en el canal de entrada (posiciones A, B) e iniciar su acceso a la almendra (posiciones C, D). En el caso de roya, después de 100 días a partir de la floración, para iniciar las evaluaciones de monitoreo de la enfermedad en variedades susceptibles y, dependiendo del grado de infección, se toman las medidas de manejo.

En los períodos secos se recomienda realizar labores de renovación por zoca o podas. En la zona sur de Colombia y, en general, con cosecha principal entre mayo y junio, se recomienda realizarlas entre julio y agosto. En el norte del país, después de la cosecha principal que finaliza en diciembre o enero, la actividad se realizaría en enero o febrero, y en las zonas con dos cosechas se realizará después de la cosecha principal, que puede finalizar o en mayo o en diciembre.

Otra práctica de cultivo que se realiza en épocas seca, corresponde a la regulación de sombríos, que coincide con épocas de renovación por zoca o podas.

Labores como la siembra o resiembra de cafetos, la fertilización del cultivo, el establecimiento de sombrío transitorio pueden afectarse considerablemente.

Cuando se presenta un déficit hídrico muy prolongado, como el marco de un evento El Niño, se acentúa el período seco, lo cual genera un alto riesgo para la siembra de

café por muerte de las plantas en el campo; por lo tanto, deben anticiparse los efectos críticos por este evento y con anterioridad establecer sombríos transitorios en los lotes donde se pretenda establecer el cafetal (Jaramillo, 2016).

La condición de déficit hídrico además de limitar los requerimientos de agua, afecta la disponibilidad de los nutrientes. En condiciones severas de déficit, la práctica de fertilización puede no realizarse, lo cual puede reducir la producción en más del 50% (Ramírez *et al.*, 2014). Las localidades con déficit hídrico severo deben programar su fertilización con suficiente anterioridad a este evento, de tal manera que las plantas absorban la mayor cantidad de nutrientes. Cuando se requiere aplicación de cal para corregir la acidez del suelo, el período de déficit hídrico no es impedimento para realizarlo, siempre y cuando se realice dos meses después de una fertilización (Ramírez *et al.*, 2014).

*Más información consulte el libro *Sistemas de producción de café en Colombia* (Arcila *et al.*, 2007).

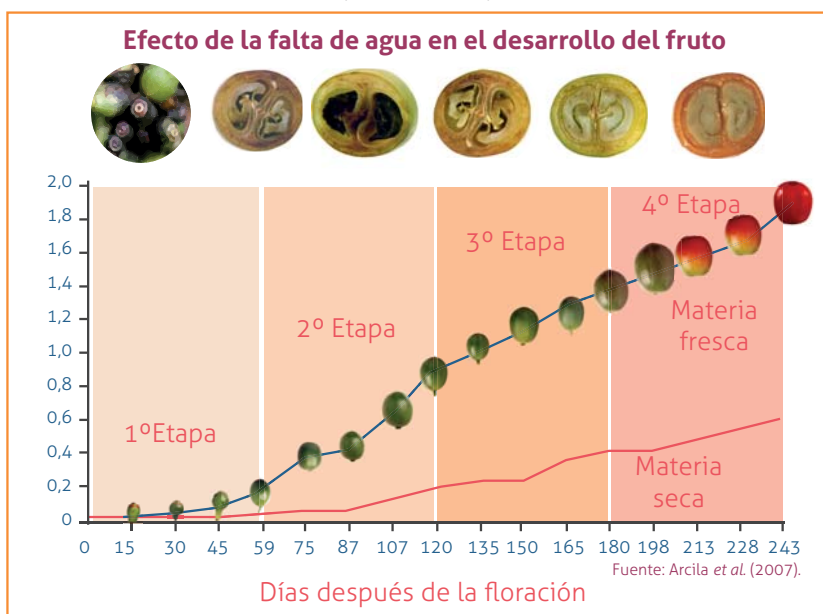


Figura 34. Efecto del agua en el desarrollo del fruto de café.

Exceso hídrico vs. etapa fisiológica del cultivo de café

Durante la fase de crecimiento vegetativo, el exceso hídrico ocasiona encharcamientos, la proliferación de arvenses y favorece la presencia de hongos que afectan la planta y el sistema de raíces. En cultivos con esta condición es necesario favorecer la circulación de aire, realizar drenaje, limitar el crecimiento de arvenses en el plato y recurrir al manejo de hongos. Las condiciones físicas del suelo, como la distribución de los poros y la aireación, se limitan con el exceso hídrico, lo que obliga a las raíces del cafeto a desplazarse hacia la superficie originando su deterioro en el ápice y la muerte de una gran cantidad de ellas; esto se manifiesta en la parte externa como clorosis, marchitamiento, síntomas de deficiencias nutricionales, defoliación y secamiento de ramas (Cenicafé, 2013).

Durante el crecimiento reproductivo los excesos alteran los patrones fisiológicos, principalmente la floración. En esta fase, durante la etapa previa a la diferenciación de la yema, el exceso hídrico promueve la proliferación de yemas vegetativas en lugar de botones florales. En la etapa de latencia o reposo, después de superar el estado de "comino", se necesita un período seco de mediana duración; cuando el exceso hídrico se prolonga, el reposo se extiende por más tiempo, lo que determina una continuidad de formación de yemas florales y como consecuencia favorece anomalías como la flor estrella (Arcila *et al.*, 2007). Otro efecto corresponde a la pudrición de yemas florales, por incremento de poblaciones de hongos que regularmente no son patogénicos, que ocasionan lesiones y secamiento posterior de las yemas (Cenicafé, 2013).

Los excesos hídricos relacionados con precipitaciones superiores a 2.500 mm por año están correlacionados con la disminución de la oferta de brillo solar, lo cual afecta negativamente la producción de los cafetos. Así mismo, las tasas de desarrollo del cultivo se reducen por efecto de la disminución de la temperatura media del aire, situación que incrementa el número de días para lograr el máximo desarrollo foliar (Gaitán *et al.*, 2016). Al igual que en la fase vegetativa se favorece el desarrollo de hongos en hojas y frutos, los síntomas de deficiencias nutricionales, defoliación, paloteo, disminución de la producción y baja calidad de frutos pueden generalizarse (Arcila *et al.*, 2007).



Anteriormente se mencionó la relación entre las condiciones secas y la oportunidad de realizar algunas labores de cultivo; en este caso, la condición húmeda es el principal factor determinante de las épocas de siembra y resiembra de cafetos y la fertilización.

En condiciones de exceso hídrico, como en eventos La Niña, los períodos de siembra se ajustan a las recomendaciones por zona (Jaramillo, 2016), definidos por el inicio de las lluvias. En almácigos es recomendable en condiciones de excesos hídricos prolongados, que se incremente el número de plantas, ya que aumentan los sitios perdidos en el campo.

Con relación a la fertilización, el exceso hídrico en condiciones de La Niña, en suelos muy arenosos y con bajo contenido de materia orgánica, se propicia la pérdida de elementos esenciales por lixiviación, situación que además de mover los nutrientes por debajo de la zona de raíces de las plantas, es una de las causas de la acidez de los suelos y puede ocasionar contaminación de las fuentes de agua. En otros suelos, como los arcillosos y con bajo contenido de materia orgánica, se propicia el encharcamiento, que también afecta la disponibilidad de los nutrientes. En estos casos es importante que las necesidades de los nutrientes se establezcan con base en los resultados de un análisis de suelo; y de requerirse, puede fraccionarse la fertilización hasta cuatro veces en etapa vegetativa o tres veces en etapa reproductiva (Sadeghian y Jaramillo, 2017)

En la Tabla 11 se resume el detalle de las afectaciones potenciales en el cultivo del café en las condiciones de déficit y exceso hídricos.



Tabla 11. Determinantes de afectación según la condición de humedad para el cultivo de café en Colombia.

Afectación	Determinantes de afectación según la condición	
	Muy seca	Muy húmeda
Desarrollo radical	Alta pedregosidad, mal drenaje, poca aireación y baja retención de humedad. En este último aspecto el origen del suelo es clave, ya que algunas unidades de suelos experimentan condiciones de humedad críticas antes de finalizar un período de 15 días sin lluvias.	Mal drenaje, poca aireación, suelos con mala distribución de poros.
Germinador y almácigo de café	Acceso a riego, rápido drenaje, condiciones de humedad adecuadas.	Condiciones de humedad altas, manejo con sombra excesiva, drenaje lento, encharcamiento.
Etap a vegetativa del café	La afectación de las condiciones físicas y químicas del suelo altera el desarrollo y distribución de raíces, limita el anclaje y ocasiona debilitamiento de la planta que puede trascender al amarillamiento foliar, el secamiento de ramas y hasta la muerte de la planta.	El exceso hídrico obliga a las raíces del café a desplazarse hacia la superficie, lo que origina su deterioro en el ápice y genera la muerte de una gran cantidad de ellas, lo cual se manifiesta en la parte externa como clorosis, marchitamiento, síntomas de deficiencias nutricionales, defoliación y secamiento de ramas.
Tasa de emisión de nudos, ramas y hojas	La poca disponibilidad hídrica puede afectar la tasa de emisión de nudos, ramas y hojas, como ocurre en zonas con períodos secos, acentuados al norte y sur del país.	Al disminuirse la temperatura y la oferta de brillo solar, se afectan las tasas de desarrollo y se incrementa el número de días por fase de cultivo.
Floración	En la fase de inducción floral, una condición seca extrema determina cambios hacia estados intermedios de desarrollo floral; si la condición extrema se presenta después de la formación del botón floral, pueden originarse anomalías florales.	En la etapa previa a la diferenciación de la yema, el exceso hídrico promueve la proliferación de yemas vegetativas en lugar de botones florales.
Desarrollo del fruto	Una condición severa de déficit en los primeros 30 días de desarrollo ocasiona secamiento; si la condición crítica se presenta entre los 60 y 180 días de desarrollo, puede originar granos vanos o averanados; y si sucede al final, entre 180 y 240 días, se generan pasillas o el grano reduce su tamaño.	En la etapa de latencia o reposo, después de superar el estado de "comino", existe la necesidad de un período seco de mediana duración; cuando el exceso hídrico se prolonga, el reposo se extiende por más tiempo, lo cual favorece anomalías florales. En situaciones de excesiva humedad prolongada, la pudrición de yemas florales por incremento de poblaciones de hongos que regularmente no son patogénicos, ocasionan lesiones y secamiento posterior de las yemas.
Luminosidad	En zonas con períodos secos pronunciados y sin sombra, se afecta la etapa de desarrollo vegetativo del café.	En zonas con fuertes vientos, sin barreras que los limiten, se favorece la presencia del hongo que ocasiona la muerte descendente.
Distancia de siembra	Las altas poblaciones dificultan las operaciones del manejo agronómico.	La disposición del cultivo en altas densidades favorece la concentración de la humedad.
Renovaciones por siembra y zoca	En condiciones de períodos acentuados con déficit hídrico, los riesgos de siembras nuevas se incrementan. Es necesario anticipar estas situaciones extremas y prevenir el establecimiento de sombrero. Las labores de renovación por poda o zoca no tienen riesgos, ya que se recomienda realizarlas en época seca.	Siembras muy densas, con calles cortas, sin seguir el contorno o a través de la pendiente, generan ambientes más húmedos y riesgos de erosión.
Manejo de la acidez	La mejor forma de detectarla es mediante análisis de suelo. La acidez se origina por pH inferior a 5,0; en café el rango adecuado se encuentra entre 5,0 y 5,5.	La mejor forma de detectarla es mediante análisis de suelo. La acidez se origina por pH inferior a 5,0; en café el rango adecuado se encuentra entre 5,0 y 5,5. El lavado de bases intercambiables originadas por exceso hídrico es parte de la causa de la acidez, que además se manifiesta por el incremento del aluminio.

Tabla 11. Determinantes de afectación según la condición de humedad para el cultivo de café en Colombia.

Afectación	Determinantes de afectación según la condición	
	Muy seca	Muy húmeda
Manejo de la fertilización	Es necesario determinar las cantidades de fertilizante necesario, con base en análisis de suelo. En períodos secos prolongados se reduce la eficiencia de la fertilización, debido a que no ocurre la solubilización de los nutrientes y se limita la absorción.	El movimiento de los nutrientes por debajo de la zona de raíces es parte del problema causado por exceso de humedad, más crítico en suelos muy arenosos o con alta presencia de macroporos. Otra condición limitante sucede en suelos muy arcillosos con bajos contenidos de materia orgánica, que favorecen encharcamientos y afectan la disponibilidad de los nutrientes.
Manejo integrado de arvenses y coberturas vegetales	El control de arvenses de manera generalizada e indiscriminada potencia el efecto perjudicial de una sequía extrema.	Al acelerarse el crecimiento de las arvenses, estas compiten por el espacio, la luz y los nutrientes; además propician un ambiente húmedo que favorece la presencia de enfermedades.
Conservación de suelos	Intervenciones que limiten las arvenses, la hojarasca, la temperatura y la humedad, potencializan el efecto de una sequía extrema.	De acuerdo con la susceptibilidad, cada unidad cartográfica de suelo tiene definido un grado de erosión, en especial en lotes sin cobertura vegetal y fuerte pendiente, los cuales son vulnerables por lluvias de alta intensidad o por lluvias ligeras, constantes y persistentes en un largo período.
Manejo integrado de plagas	La broca del café, como producto de aumentar su reproducción y acortar el ciclo de vida, aumenta el nivel de infestación, situación que se hace más prevalente por encima de 20°C, ya que la condición térmica puede superar en 1°C la temperatura media del aire. En el caso de minador, su daño se potencializa con el control de arvenses de manera generalizada e indiscriminada. La araña roja se incrementa en áreas endémicas, en las cuales, además del incremento en la temperatura, es frecuente la acumulación de polvo, y por condiciones ambientales favorables como erupciones volcánicas.	La chinche de la chamusquina se focaliza en zonas con altitudes superiores a 1,500 m (Antioquia, Cauca, Nariño, Huila y Valle del Cauca), con manejo no selectivo de las arvenses y poca o nula presencia de árboles nativos.
Manejo integrado de enfermedades	— Al generarse una condición más seca y cálida que la normal, en condiciones de libre exposición se inhibe el metabolismo de varios hongos, mientras en sistemas de producción bajo sombra se favorece la presencia de roya del café, mal rosado y gotera. — El control indiscriminado de arvenses favorece la presencia de crespeta, causada por un fitoplasma que transmiten insectos citadélidos. — Otra enfermedad recurrente en eventos secos es la mancha de hierro, por cuenta de la baja eficiencia de la fertilización y la mayor oferta de brillo solar. — Los factores que predisponen la planta a la muerte descendente en zonas altas, corresponden a diferenciales térmicos diarios amplios y corrientes frías de aire nocturnas.	En el caso de las cochinillas, en épocas de exceso hídrico estas se concentran en el cuello y a lo largo de la raíz; la fuente de control corresponde a enemigos nativos que se refugian y alimentan en arvenses.
Recolección y beneficio húmedo de café	Con la continuidad de días secos se incrementa la presencia de frutos sobremaduros y secos en el árbol, en el suelo y en la masa cosechada, que favorecen la dispersión de broca y afectan la calidad en el proceso.	La condición de poca aireación y mayor humedad favorece el desarrollo del mal rosado. En cafetales bajo sombra excesiva, con bajo brillo solar, bajas temperaturas y humedad permanente, se configuran las condiciones ideales para gotera.
Secado del café	En zonas en las que el café recolectado concentra altos volúmenes, por efecto de la concentración en las floraciones, la capacidad instalada no es suficiente para realizar los secados por tandas completas de recolección.	Por condiciones de incremento de la humedad relativa y disminución de la temperatura del aire, se retrasa el proceso normal de fermentación.
Manejo de los subproductos del beneficio	En fosas con exposición solar directa no se regula la temperatura y la humedad y tiene posibles riesgos de lixiviación por lluvias súbitas y fuertes.	En ocasiones, por la baja calidad de la cosecha, con heterogeneidad de granos en diferentes estados de madurez, con mayor presencia de frutos sobremaduros y secos, el tiempo de fermentación puede reducirse.
		Por efecto de la mayor presencia de días con lluvia y la baja disponibilidad de brillo solar, la infraestructura de secado puede ser insuficiente.
		En fosas con exposición solar directa no se regulan la temperatura y la humedad y se tiene riesgo de lixiviación.

Con base en una revisión de los resultados de investigación de Cenicafé, en la Tabla 12 se consolidan las estrategias de adaptación que deberán implementarse ante condiciones de humedad críticas para el cultivo (Cenicafé, 2013, 2015, 2016, 2017; Gaitán *et al.* 2016; Ramírez *et al.*, 2013; Arcila, 2007). Teniendo en cuenta los aspectos de vulnerabilidad descritos, el Servicio de Extensión y los caficultores podrán relacionar la mejor estrategia a implementar según las condiciones del sistema de producción, la fase de desarrollo, las condiciones de suelo y clima, entre otros. La información referida solo se construye con los casos más comunes, por lo cual debe tomarse como guía. Cenicafé tiene dispuesto un repositorio digital, el cual permitirá ampliar el conocimiento sobre temas específicos relacionados con las condiciones extremas de humedad aquí citadas (<http://biblioteca.cenicafe.org/>).



Tabla 12. Prácticas de adaptación por condición de humedad para el cultivo de café en Colombia.

Prácticas de adaptación por condición de humedad	
Etapa o labor de cultivo	Muy húmeda
Elección de material genético	Variedades resistentes a la roya del café con adaptación general o específica, adquirida en los Comités de Cafeteros.
Germinadores	<ul style="list-style-type: none"> -Favorecer el suministro de riego. -Construir el germinador nivelado y elevado del piso, y cubrir la semilla con una capa de arena de espesor igual a su tamaño. -Procurar el correcto control contra hongos como mal del talluelo, con productos biocontroladores. -Establecer un umbráculo ajustado a la condición de nubosidad.
Almácigo de café	<p>Proveer que las condiciones del suelo mantengan la humedad y fertilidad adecuadas, incorporando materia orgánica al sustrato.</p> <p>Asegurar que el sustrato esté libre de plagas como cochinilla.</p> <p>El umbráculo debe garantizar el sombrío necesario.</p>
Almácigo de sombríos	En zonas muy secas con limitaciones de suelo, determinar la especie de sombrío local de mejor adaptación y disponer la cantidad para mantener la cobertura según la nubosidad de la región.
Fecha de siembra	Se deben considerar las fechas de siembra conforme a los periodos húmedos, después de una cosecha principal.
Densidad de siembra y arreglo espacial	La disposición del cultivo debe favorecer la aireación y el uso eficiente del terreno; pueden utilizarse distancias amplias de la calle y cortas entre plantas. La densidad no debe ser inferior a 7.000 plantas por hectárea.
Época de renovación por podas	La intervención debe realizarse en el período seco, inmediatamente después de una cosecha principal. Los cortes deben protegerse. Debe fomentarse el incremento de los tallos a partir de la selección de más chupones por zoca y reemplazar los sitios perdidos.

Tabla 12. Prácticas de adaptación por condición de humedad para el cultivo de café en Colombia.		
Etapas o labor de cultivo	Prácticas de adaptación por condición de humedad	
	Muy seca	
	Muy húmeda	
Establecimiento de sombrero transitorio o intercalamiento con otros cultivos	<p>En zonas con períodos secos pronunciados que afecten la etapa de desarrollo vegetativo del café, debe establecerse sombrero transitorio con leguminosas. Estas plantas permanecerán entre 14 y 24 meses, y deben adaptarse a podas y raleos, producto que servirá para incorporar al terreno para favorecer la humedad.</p> <p>En el caso de cultivos intercalados, se ha demostrado que el maíz es una opción técnica, que favorece la eficiencia de uso de energía y de agua.</p>	<p>En zonas con fuertes vientos, el sombrero transitorio suple las necesidades de barreras mientras se establecen los árboles permanentes.</p> <p>El sombrero transitorio debe podarse y ralearse de acuerdo al desarrollo.</p>
Manejo de la acidez		<p>El lavado de bases intercambiables, originadas por exceso hídrico, es parte de la causa de la acidez, que además se manifiesta por el incremento del aluminio. En la situación anterior es necesario incorporar la cal al suelo en almácigos y al momento de la siembra, previo análisis de suelos.</p> <p>En plantaciones establecidas debe limpiarse el plato para encalar y esta actividad debe realizarse dos meses después de una fertilización. Debe evitar mezclarse con fertilizantes nitrogenados y fosfóricos.</p>
Manejo de la fertilización	<p>En períodos secos prolongados se reduce la eficiencia de la fertilización ya que no ocurre la solubilización y se limita la absorción de nutrientes.</p> <p>Debe preverse el efecto de período crítico seco y anticipar la fertilización, cuando la condición de humedad lo permita.</p>	<p>Las principales prácticas de adaptación corresponden al uso de abonos orgánicos y al diseño de estrategias que reduzcan la erosión, que en conjunto ayudan a mejorar la estructura y porosidad del suelo.</p> <p>Debe fraccionarse la aplicación de fertilizantes hasta tres veces en un año; en algunos casos puede incrementarse la cantidad del nutriente a aplicar.</p>
Manejo integrado de arvenses y coberturas vegetales	<p>Las arvenses en el plato del árbol deben ser controladas y propiciar en esta zona la cobertura muerta.</p> <p>Deben promoverse las arvenses de interferencia baja o media; en calles estas no deben crecer por encima de los árboles porque al momento del corte pueden ocasionar golpe de sol.</p>	<p>Su manejo se basa en impedir su crecimiento excesivo, definir la prevalencia de arvenses de interferencia baja, las cuales ayudarán a disminuir la erosión hídrica, lavado de nutrientes y disminución de los riesgos por erosión.</p>
Conservación de suelos	<p>Todas las acciones que permitan mantener la humedad del suelo, como presencia de coberturas vivas o muertas, la presencia de árboles o sombríos transitorios que por efecto natural o por procesos de intervención proporcionan hojarasca y aplicación de materia orgánica.</p> <p>Evitar las quemadas.</p>	<p>En las condiciones de lluvia abundante, sembrar el cultivo en contorno, favorecer la presencia de coberturas, establecer barreras vivas con plantas tipo limoncillo o vetiver, para disminuir el riesgo de pérdida de suelo.</p> <p>Deben mantenerse protegidos los drenajes naturales.</p>
Manejo integrado de plagas	<p>Con base en los picos de floración, el período crítico del ataque de la broca se presenta después de 90 a 120 días; debe monitorearse y evitar que se sobrepose el 2% de infestación.</p> <p>En cosecha, la condición seca favorece la presencia de frutos sobremaduros y secos en el árbol y en el suelo, por lo cual los costales deben permanecer tapados, la tolva debe tener tapa e impregnarse con pegante, y en los sitios de secado deben limitarse los escapes, en lo posible con cubrimiento con plástico por 48 horas.</p>	<p>En condiciones muy húmedas se favorecen la chinche de la chamusquina y las cochinitas de las raíces del café.</p> <p>La chamusquina, por su control natural, el manejo selectivo de las arvenses y el mantener la presencia de árboles nativos como aguacate, cacao y guayaba, promueven la fauna benéfica (enemigos nativos) y brindan fuentes primarias de alimentación a la plaga.</p>

Tabla 12. Prácticas de adaptación por condición de humedad para el cultivo de café en Colombia.

Etapa o labor de cultivo	Prácticas de adaptación por condición de humedad	Muy húmeda
	Muy seca	
Manejo integrado de plagas	<p>En el caso de minador, no deben controlarse las arvenses de manera generalizada; debe promoverse la presencia de arvenses nobles, con flores ricas en polen y que faciliten el refugio de enemigos naturales.</p> <p>La araña roja se incrementa en áreas endémicas, en las cuales, además del incremento en la temperatura, es frecuente la acumulación de polvo y por condiciones ambientales favorables como erupciones volcánicas. Las acciones deben enfocarse a limitar estos factores que la potencian.</p>	<p>En el caso de las cochillias, que en épocas de exceso hídrico se concentran en el cuello y a lo largo de la raíz, las acciones de manejo deben dirigirse a mantener la oferta de alimento de los enemigos naturales, que la proporcionan las arvenses; y en caso de aplicaciones de insecticidas, evitar la generalización y promover la rotación de moléculas, con diferentes modos de acción.</p>
Manejo integrado de enfermedades	<p>Una enfermedad recurrente en eventos secos es la mancha de hierro. Para su manejo deben implementarse el uso racional de sombrero y las actividades que favorezcan la absorción de los nutrientes. Para reducir el efecto de la muerte descendente en zonas altas, con altos diferenciales térmicos diarios y corrientes frías de aire nocturnas, deben mantenerse barreras vivas.</p>	<p>Favorecer la entrada de luz, la circulación de aire y realizar poda sanitaria son acciones de manejo cultural efectivas para el manejo de mal rosado; de requerirse aplicación de fungicida, debe establecerse a partir del monitoreo, con base en la floración principal.</p> <p>El manejo de la gotera se basa en prácticas agronómicas que favorezcan la aireación (manejo de arvenses, podas de los cafetos), el mejoramiento de la luminosidad (densidad de café adecuada y regulación de la sombra) y la reducción de encharcamientos (drenajes).</p>
Recolección y beneficio húmedo de café	<p>En eventos muy secos son importantes las acciones en cosecha que eviten la presencia de frutos sobremaduros y secos tanto en el árbol como en el suelo. Adicionalmente, las actividades mencionadas en el manejo de la broca que eviten la dispersión después de la recolección.</p>	<p>La condición de humedad altera las condiciones ambientales del sitio, por lo cual se recomienda utilizar la tecnología del fermaestro para identificar el momento adecuado de lavado.</p>
Secado del café		<p>En condiciones muy críticas de mayor flujo con cosecha, con lluvias frecuentes y condición de alta humedad que limitan el secado solar, se puede considerar la alternativa de conservar el café en los tanques de lavado, con agua limpia, la cual debe cambiarse diariamente hasta un máximo de 4 días, o reducir la humedad del café hasta seco de agua (entre 40% y 45% de humedad), en túneles de secado, con cuatro volteos mínimo por día, o combinar la estrategia con silos mecánicos.</p>
Manejo de los subproductos del beneficio	<p>La pulpa debe estar en fosas bajo techo; en estas condiciones deben reducirse los volteos y aumentar los riegos, sin generar lixiviados, lo cual regula la condición de humedad y temperatura.</p>	<p>Para regular la temperatura y la humedad del sustrato en un lombricultivo bajo techo, es necesario que se minimice la entrada de agua por deriva y se reduzcan los riegos para evitar generación de lixiviados. Adicionalmente se debe incrementar el número de volteos.</p>
Protección del agua	<p>No deben hacerse quemas, los nacimientos deben protegerse.</p> <p>Deben implementarse acciones para la recolección de agua y su almacenamiento en condiciones de cantidad y calidad.</p>	<p>Ante un efecto de taponamiento por arrastre de sedimentos, las bocatomas deben vigilarse e incrementar acciones preventivas, como la disposición de rejillas, implementación de desarenadores y, en lo posible, de filtros de grava y arena.</p> <p>Los sistemas de tratamiento de aguas domésticas o provenientes del beneficio, deben cerrarse asegurando su estabilidad e intensificando su inspección. Ante inminentes fallas de la captación de agua o su deterioro de calidad en suministro es recomendable la cosecha de agua lluvia.</p>





Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

**SISTEMA DE APOYO
A LA TOMA DE DECISIONES
PARA LA CAFICULTURA**

6

Plataforma Agroclimática Cafetera

La Plataforma Agroclimática Cafetera es una iniciativa de Cenicafé, división de investigación científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, que ha monitoreado el clima de la zona cafetera colombiana durante los últimos 65 años. Esta plataforma es una herramienta básica de apoyo para caficultores, extensionistas e investigadores, en la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo del café.

La Plataforma tiene dos objetivos básicos: el primero es atenuar la incertidumbre al momento de tomar decisiones, motivo por el cual dentro de la plataforma se tienen sistemas de apoyo para la toma de decisiones; y el segundo es propender por atenuar el riesgo de tener pérdidas productivas por efectos del clima, a través de aplicativos de seguimiento del balance hídrico.

Los dos objetivos antes mencionados tienen como base la información climática, razón por la cual se fortaleció, actualizó y amplió la red climática cafetera mediante la instalación de 25 estaciones meteorológicas automáticas en el proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua para toma de datos de variables meteorológicas en nuevos sitios de la geografía nacional.

El ingreso a la Plataforma está abierto al público general, pero también está la opción de registrarse para tener acceso a más aplicaciones como los registros históricos y la solicitud de datos climáticos.

La estructura de la Plataforma Agroclimática Cafetera está dividida en tres secciones:



En **Tiempo y Clima** se encuentran los aplicativos Condiciones actuales, Boletín diario, Registros históricos y Pronóstico de lluvia.



Condiciones actuales presenta los registros a nivel horario de las variables meteorológicas: lluvia (mm), temperatura (°C) y humedad relativa (%), registrada en las últimas 24 horas en las estaciones meteorológicas automáticas instaladas en la región cafetera de Colombia.

Boletín Diario muestra la información consolidada de las variables meteorológicas más representativas para el cultivo del café, de las estaciones que transmitieron en la fecha que se quiera consultar. Esta aplicación permite ordenar de mayor a menor o viceversa la información que se contiene.

Departamento	Municipio	Estación	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
			Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media
Valle del Cauca	Aicará	Arturo Gómez	17,1	31,1	22,7	45,7	94,9	74,6
Valle del Cauca	Argelia	Santiago Gutiérrez	17,8	28,2	20,9	47,2	94,4	79,9
Valle del Cauca	Bolívar	Bolívar (GIA)	16,1	25,3	19,2	57,1	93,9	80,5
Valle del Cauca	Bugigrande	Bugigrande (GIA)	16,2	25,5	19,7	59,7	89,4	77,2
Valle del Cauca	Calcedonia	Calcedonia						
Valle del Cauca	Calcedonia	Patozi (GIA)	16,4	28,4	20,7	54,4	92,5	76,9
Valle del Cauca	Dagua	Dagua	16,5	29,8	20,7	49,2	97,4	81,3
Valle del Cauca	Ginebra	Ginebra	17,4	27,7	21,0	45,5	81,7	69,0
Valle del Cauca	Jamundí	Jamundí	17,2	26,7	20,4	46,5	74,5	62,2
Valle del Cauca	Restrepo	Julio Fernández	17,7	26,9	20,8	56,7	95,1	81,5
Valle del Cauca	Sevilla	Comitales (GIA)	17,3	24,8	20,1	55,2	89,7	79,2
Valle del Cauca	Sevilla	La Serena						
Valle del Cauca	Trujillo	Manuel María Mellarino	16,4	29,0	21,6	48,7	92,2	72,5
Valle del Cauca	Tuluá	Tuluá (GIA)	16,2	27,5	20,2	50,6	90,3	77,5
Tolima	Dolores	Dolores	15,4	22,8	17,9	52,1	80,1	68,4
Tolima	Fresno	Fresno	18,4	28,4	22,5	51,8	79,9	66,6
Tolima	Ibagué	La Esperanza	15,4	27,8	20,8	44,4	88,8	68,3
Tolima	Líbano	La Trinidad	15,7	26,3	20,9	56,8	90,6	73,0
Tolima	Pinedas	El Ruby	17,3	28,6	20,7	41,7	81,7	69,0

"Algunas estaciones aparecen con información vacía, lo cual indica que los sensores no transmitieron la información suficiente para realizar los cálculos diarios"

Registros históricos permite visualizar gráficamente la información de las variables climáticas lluvia, temperatura y humedad relativa, consolidadas a nivel mensual y anual, registradas por la Red Meteorológica Cafetera Convencional.

En **Aplicaciones** se encuentran los aplicativos Épocas de siembra, Vuelos de broca, el Geoportal y Solicitud de datos.



Épocas de siembra permite ver las gráficas de distribución de lluvia y evaporación (mm) para las estaciones convencionales de Cenicafé, y nos indica la fecha óptima de siembra, basada en el Avance Técnico de Cenicafé No. 465. Por medio de esta aplicación puede identificarse el mes más adecuado para realizar la siembra en el campo, para preparar con anticipación los germinadores y almácigos, y tener conocimientos acerca de los meses más húmedos, secos y con posibles déficits.

Vuelos de broca presenta el número de brocas adultas capturadas semanalmente en 20 trampas atrayentes, en las Estaciones Experimentales de Cenicafé. Con esta información pueden identificarse las épocas de vuelo de la broca, relacionarlas con los eventos de clima y el período crítico de ataque a la cosecha. Junto con las evaluaciones de infestación pueden tomarse las decisiones para el manejo integrado de la broca.

El **Geoportal** presenta diversos visores de información geográfica a través de mapas, el cual permite georreferenciar, hacer análisis territorial sobre Colombia, consultar el área cafetera, la ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, la distribución de las cosechas, el estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera (Coesagro EU y Cenicafé, 2013), además el estudio de suelos del IGAC (IGAC, 1995).

Para descargar información de las diferentes variables meteorológicas de la Red Climática Cafetera (Estaciones automáticas y convencionales) a nivel diario, debe crearse una cuenta en la Plataforma Agroclimática Cafetera y acceder a Solicitud de datos. De acuerdo al tipo de usuario podrá acceder a la información inmediatamente o estará sujeta a un costo y aprobación del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

Usuario FNC y Cenicafé: información sin costo.

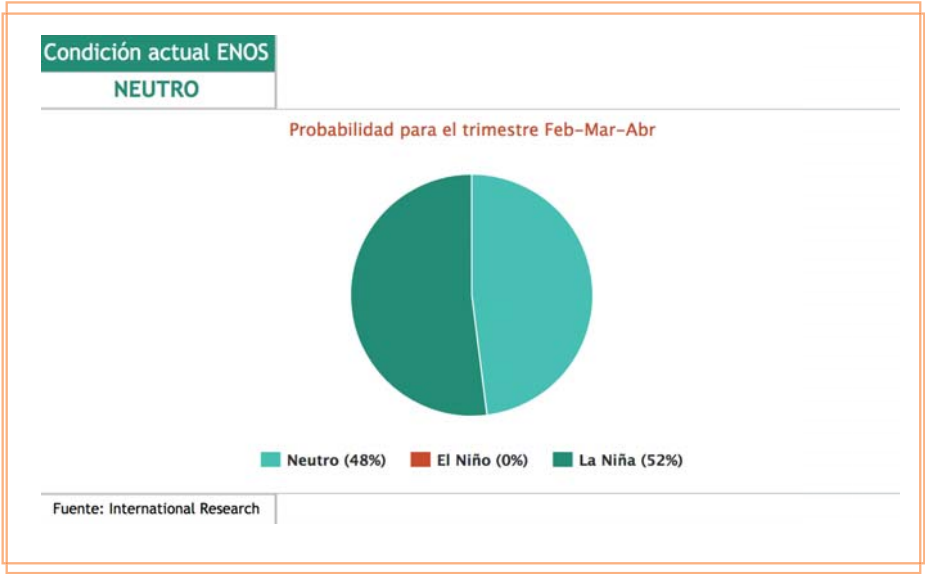
El uso de la información es únicamente para las investigaciones que se encuentran dentro del Plan Operativo del Centro.

Usuario externo: información con costo. El uso de la información es únicamente para el objetivo relacionado en la respectiva solicitud y esta no podrá ser revendida a terceras personas.

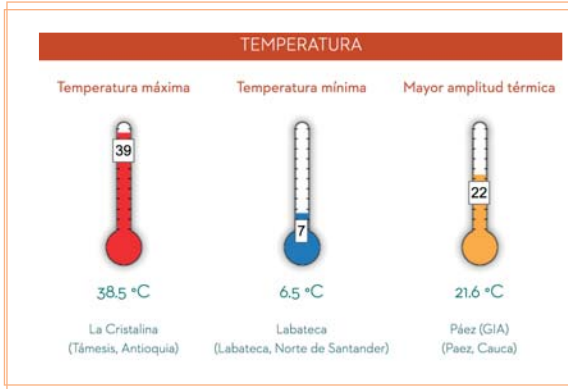
En **Documentación** se encuentra la información correspondiente al Boletín Agrometeorológico Mensual, Publicaciones de clima y Multimedia.



Adicional en la página de inicio se encuentra la **Condición Actual ENOS e Indicadores del tiempo**. En la primera se muestran las probabilidades (%) de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) del siguiente trimestre (El Niño, La Niña, Neutro).



Indicadores del tiempo es una herramienta que permite conocer en qué estación meteorológica automática se presentaron los extremos de las variables meteorológicas temperatura, lluvia y humedad relativa.



El Boletín Agrometeorológico Cafetero, disponible mensualmente, es uno de los principales instrumentos de la Plataforma Agroclimática Cafetera. En este boletín se presentan de manera general las condiciones actuales y la proyección por mes para Colombia. También un contexto histórico de lluvias con información por regiones y recomendaciones sobre el cultivo de acuerdo con la etapa de crecimiento y procesos de producción.

La disciplina de Agroclimatología de Cenicafé participa en la mesa Agroclimática Nacional coordinada desde el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en la cual a partir de las proyecciones según modelos elaborados por IDEAM y la sinóptica de los meses precedentes del mes a proyectar, se definen los eventos climáticos más probables con alcance a un trimestre.

Un grupo de investigadores de Cenicafé, de las disciplinas de Biometría, Entomología, Experimentación, Fisiología Vegetal, Fitopatología, Fitotecnia, Poscosecha y Suelos, se reúnen para ser informados por la disciplina de Agroclimatología sobre las condiciones climáticas del pronóstico del trimestre siguiente y del comportamiento histórico de las variables climáticas en las principales estaciones meteorológicas de la red cafetera. Posteriormente se definen las estrategias que deberán adoptarse por los caficultores.

El boletín se convierte en una estrategia de soporte para las recomendaciones que transmite el Servicio de Extensión a los caficultores.

En este caso, la Plataforma Agroclimática Cafetera complementa de una manera gráfica los análisis del transcurso del tiempo y, en este caso particular, la evolución decadiaria del índice de humedad del suelo, a partir de la cual se presentan las alertas y algunas acciones que deberán implementarse para cada caso.

Es importante señalar que los boletines meteorológicos y agroclimáticos, los aplicativos y alertas que se emitan a través de la plataforma, deberán asumirse como información sujeta de verificar, ya que las condiciones de las estaciones meteorológicas referentes pueden cambiar con respecto a la zona de interés, distante de la estación y ubicada en una condición orográfica diferente.

Aplicativo del balance hídrico

Con el fin de disponer de la información del balance hídrico en las diferentes estaciones meteorológicas, se desarrolló un aplicativo en la Plataforma Agroclimática Cafetera, en el cual pueden consultarse las condiciones hídricas de las decadiarias (10 días) de los últimos meses, expresadas mediante el índice de humedad del suelo, determinado con base en la lluvia y evapotranspiración acumulada, para un cultivo de café en producción.

La visualización del balance hídrico en el aplicativo permite observar en el espacio y tiempo, las condiciones de humedad que influyen en el desarrollo del cultivo de café en las diferentes regiones del país. A partir del balance hídrico, los tomadores de decisiones en torno al cultivo de café, especialmente el Servicio de Extensión y Comités Departamentales y Municipales, pueden relacionar el comportamiento de las plantas durante los diferentes períodos, bajo las condiciones climáticas locales, como períodos acentuados de déficit o exceso, y así definir cuáles son las prácticas agronómicas que se deben realizar, tomando como guía las Tablas 11 y 12.

En la página de inicio del aplicativo el usuario encontrará un mapa con la ubicación de las estaciones activas, cada una identificada por un color que muestra la condición hídrica de la década que se esté consultando (Figura 35). Podrá consultar la información, ubicando la estación automática en el mapa o realizando la búsqueda por estación, departamento o municipio.

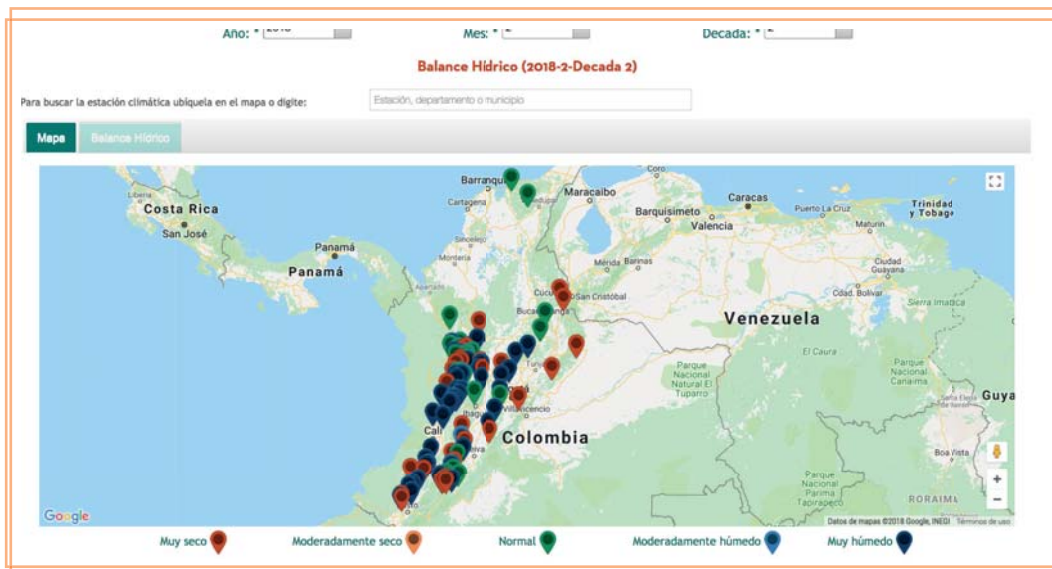


Figura 35. Página de inicio del aplicativo de balance hídrico.

El usuario podrá consultar el balance hídrico a nivel decadiario de los últimos seis meses, haciendo clic en la estación y luego en “Ver balance hídrico”. El aplicativo mostrará una gráfica con el comportamiento del índice de humedad del suelo, la precipitación y la condición definida a partir del IHS para el cultivo (Figura 36).



Figura 36. Visualización del balance hídrico para la estación Abejorral (GIA) en la Plataforma Agroclimática Cafetera.

La investigación desarrollada por Cenicafé con relación al balance hídrico ha sido puesta a disposición de los caficultores a través del Servicio de Extensión, quienes son los encargados de realizar la transferencia de conocimiento y acompañamiento a los productores cafeteros (Figura 37). A lo largo del Proyecto Gestión Inteligente del Agua – Manos al Agua, el Servicio de Extensión representó el canal entre los caficultores y Cenicafé, para la selección de los sitios de instalación de estaciones meteorológicas, así como para comunicar la importancia y utilidad de la implementación de estaciones meteorológicas para la caficultura.

Durante la ejecución del proyecto se realizaron diferentes actividades de capacitación al Servicio de Extensión y a los grupos Manos al Agua, sobre la importancia del monitoreo climático, el funcionamiento de las estaciones meteorológicas y cómo consultar la información de la red meteorológica cafetera en la Plataforma Agroclimática. Entre las actividades de capacitación y transferencia de información se encuentran los días de campo, presentaciones ante el Comité Técnico – Científico GIA y capacitaciones con los líderes de los grupos Manos al Agua.

Las visitas de mantenimiento correctivo y preventivo, así como las actividades de muestreo de suelos, representaron también una oportunidad de acercamiento con los caficultores a través del Servicio de Extensión. Para los investigadores de Cenicafé representó un espacio para dar a conocer los objetivos del componente de monitoreo climático y contribuir a la apropiación por parte del caficultor de la estación meteorológica, como fuente de información para la toma de decisiones por parte del Servicio de Extensión. A continuación se relata el testimonio de Alexander Restrepo, Auxiliar de Investigación de Cenicafé, quien estuvo a cargo del mantenimiento de las estaciones meteorológicas.



Figura 37. Caficultor y Extensionista de Salgar, Antioquia.

Testimonio



**Alexander Restrepo
Alzate, 2017**

*Auxiliar de Investigación,
Disciplina de Agroclimatología,
Cenicafé.*



A lo largo de la ejecución del proyecto Gestión Inteligente del Agua - GIA, tuve la oportunidad de visitar 25 familias caficultoras en igual número de municipios a lo largo y ancho de los cinco departamentos participantes. Para mí fue una gran experiencia, enriquecedora desde todo punto de vista; he recorrido diversas cordilleras, cuencas y paisajes, pero nada fue tan significativo como la calidez de los caficultores. En el principio encontré personas con poca o ninguna información acerca de la importancia de las estaciones meteorológicas, pero en cada visita se les explicó acerca de cada uno de los elementos que se encuentran en la estación y su beneficio del cultivo del café.

Al final pude ver un resultado satisfactorio desde el punto de vista técnico, vi como los campesinos se comprometían con el mantenimiento de las estaciones para dar confiabilidad a los datos. También pude ver cómo se involucraban paulatinamente con el uso de los recursos digitales y ellos mismos se encargaban de visualizar los datos en la Plataforma Agroclimática, y a su vez transmitían el conocimiento y la información a sus vecinos.

Gratamente pude observar como cada día mujeres, hombres, adultos mayores y niños se fueron sumando de a poco en todas las labores lúdicas que mis compañeros planificaban; además, cada día iban entendiendo la importancia de la microcuenca y por qué cuidarla. De estas visitas a los departamentos GIA me queda la riqueza de sus recursos naturales, sus hermosos paisajes y la calidez de su gente.



Se ha desarrollado un análisis de los diferentes mecanismos utilizados por los departamentos para transmitir la información desde el Boletín Agroclimático Cafetero hacia los caficultores, para identificar las buenas prácticas y fortalecer la comunicación de los mensajes de alertas tempranas hacia los departamentos.

	Antioquia	Caldas	Cauca	Nariño	Valle del Cauca	
Mecanismo	Frecuencia de uso					Tipo de información enviada
Tablas de anuncios	Mensual	Mensual	Mensual	NA	Mensual	Información agroclimática. Información gremial, técnica, ambiental y social. Alertas tempranas por déficit hídrico, alertas fitosanitarias y campañas educativas.
Boletines impresos	Trimestral	Semanal	Mensual	Bimestrales	Cada dos semanas	Prevención de plagas y enfermedades. Información sobre GIA. Información gremial, técnica, ambiental y social. Alertas tempranas, déficit hídrico, alertas fitosanitarias, campañas educativas, actividades del Comité.
Estaciones de radio	Mensual	Semanal	Semanal	Mensual	Diario	Manejo agronómico del cultivo. Invitación a eventos; información sobre GIA. Información gremial, técnica, ambiental y social. Información sobre GIA y Nespresso.
Boca a boca - A través de líderes comunitarios	Mensual	Mensual	Semanal	Diario	Semanal	Buenas prácticas agrícolas. Información sobre visitas a fincas. Información gremial, técnica, ambiental y social. Reuniones con Comités Municipales de Cafeteros de cada lugar.

	Antioquia	Caldas	Cauca	Nariño	Valle del Cauca	
Mecanismo	Frecuencia de uso					Tipo de información enviada
Boca a boca – A través de profesores	NA	Ocasionalmente	Ocasionalmente	NA	Cada dos semanas	Información gremial y social. Difusión de actividades comunitarias y actividades de capacitación y educación.
Mensajes de texto (SMS)	NA	Ocasionalmente	NA	Dos veces al año (Semestral)	Semanal	Mensajes de GIA- Manos al Agua. Información técnica, ambiental y social.
Periódico Cafetero	Cada 2 meses	Trimestral	Cada dos meses	NA	Cada dos meses	Información gremial, técnica, ambiental y social. Información sobre todos los programas ejecutados como parte del portafolio de servicios.
Redes Sociales (Youtube, Twitter)	NA	NA	NA	NA	Semanal	Información gremial, técnica, ambiental y social.
Página Web (Comité-FNC)	NA	Cada dos semanas	NA	NA	Semanal	Información gremial, técnica, ambiental y social. Información sobre todos los programas ejecutados como parte del portafolio de servicios.
Canales de televisión local	NA	Mensual	NA	Dos veces al año (semestral)	NA	Programas, entrevistas con el personal técnico del programa para informar sobre el progreso, etc.
Altoparlante	NA	NA	Mensual	Mensual		Invitación a eventos.
Memorandos	Diario	Diario	Diario	Diario	Diario	Recomendaciones.
Visitas a fincas	Diario	Diario	Diario	Diario	Diario	Información técnica y sobre el programa GIA.
Actividades grupales	Semanal	Semanal	Semanal	Semanal	Semanal	Educación, capacitación y temas de participación comunitaria.

**Red
Meteorológica
Cafetera**



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
CITA
INAMHI



Monitoreo climático: herramienta al servicio de la caficultura colombiana

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

Conclusiones

Durante los años 2015, 2016 y 2017, se instalaron 25 estaciones meteorológicas automáticas en las microcuencas seleccionadas dentro de los departamentos cafeteros de Antioquia, Caldas, Cauca, Nariño y Valle del Cauca. Con la instalación no solo se generó información climática en el área de las microcuencas, sino que también se fortaleció la Red Meteorológica Cafetera, incrementando la cobertura de monitoreo en los departamentos de intervención.

Se llevó a cabo el seguimiento de los registros meteorológicos, para programar las actividades de mantenimiento preventivo, correctivo y el ajuste de tecnología, para garantizar el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición. Con base en la experiencia adquirida con la implementación de estaciones meteorológicas se generó una metodología tipo manual que permite a usuarios de una red meteorológica advertir las necesidades, dificultades, acciones preventivas y validación de la información, con el fin de garantizar confiabilidad en su funcionamiento y operación.

La información climática registrada por las estaciones meteorológicas automáticas requiere de procesos de verificación y seguimiento, que permitan establecer si los datos medidos representan las condiciones climáticas reales del sitio de monitoreo. Para esto se definieron procedimientos básicos de control de calidad que deben adoptarse para reducir los errores y establecer el nivel de confianza de la data a utilizar. Para cada estación automática se definió una estación de referencia, con base en análisis estadístico y relaciones altitudinales y de distancia.

Se consolidó la información de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en 32 sitios donde están instaladas las estaciones meteorológicas automáticas, en el área de influencia de las microcuencas GIA. Dicha información permite realizar una mejor aproximación a la condición hídrica del cultivo a nivel puntual.

A partir de una revisión rigurosa de los elementos que intervienen en el ciclo hidrológico y su dinámica en los sistemas de café, junto con la información climática registrada por las estaciones meteorológicas automáticas, se implementó la rutina de balance hídrico decadiario para las estaciones automáticas de los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, y se obtuvieron los valores de exceso y déficit hídricos, así como el índice de humedad.

Aprovechando el nivel de diseño funcional con el que hoy cuenta la Plataforma Agroclimática y teniendo en cuenta la necesidad de implementar un sistema experto que integre la información (datos), procesos (algoritmos de programación) y visualización, se diseñó un aplicativo para desplegar los resultados de la rutina de balance hídrico decadiario. En el aplicativo el usuario podrá consultar la condición hídrica de las decadiarias (10 días) de los últimos meses, expresada mediante el índice de humedad del suelo.

Para la estrategia de alertas tempranas para el cultivo de café se construyeron los rangos del índice de humedad que definen los períodos de déficit y exceso y se estableció un límite de 20 días consecutivos, como el tiempo a partir del cual la continuidad en la condición de déficit o exceso puede generar afectación sobre el cultivo de café, según la etapa fenológica en la que se encuentre.

Soportado en un análisis exhaustivo de los principales factores de producción del cultivo de café, se presentan como guía y soporte al aplicativo de balance hídrico los determinantes de afectación por condición de humedad y la posible alternativa de manejo, derivadas del resultado de investigaciones en diferentes disciplinas que integra el proceso productivo.

Recomendaciones

Una buena planeación es esencial. El monitoreo climático no se basa únicamente en la implementación de equipos de medición, sino que está relacionado con diferentes actividades como el levantamiento de información, la selección de variables a medir, la ubicación de la estación y la metodología de comunicación, entre otros. El establecimiento de una red de monitoreo meteorológico parte de la definición del objetivo del cual depende, la ubicación y densidad de estaciones.

Es necesario educar en torno al monitoreo climático. La importancia de los datos, el aseguramiento de su calidad, su utilización y aplicación debe conocerse, tanto por los tomadores de decisión como el personal involucrado en la operación del sistema. Comunicación bidireccional.

Es necesario desarrollar y mantener una estrategia de control de calidad. Deben adoptarse acciones preventivas y procedimientos de control de calidad que garanticen la continuidad en la operación del sistema de monitoreo y la generación de información útil.

Convertir los datos en información útil. La información derivada de la implementación de una red meteorológica debe ser utilizada para la generación de productos como contenidos en gráficos o tablas, aplicaciones y documentos, entre otros, que le permita a un grupo de usuarios determinado tomar decisiones ajustadas a sus necesidades.

Los resultados del balance hídrico describen la condición de humedad del suelo en un período determinado, por lo que **la generación de alertas tempranas a partir de los índices derivados del balance hídrico debe estar soportada en el conocimiento de las condiciones locales, del cultivo y los resultados de investigación derivados del monitoreo climático.**

Sostenibilidad. Deben establecerse alianzas estratégicas para fortalecer el Sistema Nacional de Monitoreo Meteorológico y asegurar los recursos que permitan la continuidad en la operación de la red meteorológica.

LITERATURA CITADA

ALLEN, R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298p.

ARCILA P., J. Anormalidades en la floración del cafeto. Manizales: Cenicafé, 2004. 8 p. (Avances Técnicos No. 320)

ARCILA P., J. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. p. 21-60. En: ARCILA P, J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná: Cenicafé, 2007. 309 p.

ARCILA P., J., BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de fases fenológicas del desarrollo de la planta de café *Coffea sp.* Chinchiná: Cenicafé, 2001. 31 p. (Boletín Técnico No. 23).

ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná: Cenicafé, 2007. 309 p.

ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. Manizales: Cenicafé, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 311)

BATTISTA, P.; MARACCHI, G.; SABATINI, F.; SIVAKUMAR, M.V.K.; ZALDEI, A. Manual on instrumentation and operations for automatic weather stations for agrometeorological application. Ginebra : World Meteorological Organization, 2000. 258 p.

BROWN, P.; RUSSELL, B. Siting and maintenance of weather stations. [En línea]. Tucson: University of Arizona, 2010. 5 p. Disponible en Internet: <https://extension.arizona.edu/pubs/siting-and-maintenance-weather-stations>. Consultado en noviembre 15 de 2017.

CAMAYO V., G.C.; CHAVES C., B.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. Cenicafé 54(1): 35-49. 2003.

CAMPOS A., D.F. Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí: UASLP, 1984. 76 p.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Chinchiná : Cenicafé, 2013. 3 vols.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. Informe Anual Cenicafé 2015. Manizales: Cenicafé, 2015. 159 p.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ - CENICAFÉ. Guía: Más agronomía más productividad. Manizales: Cenicafé, 2016. 96 p.

CHANDLER, D.; SEYFRIED, M.; MURDOCK, M.; MCNAMARA, J.P. Field calibration of water content reflectometers. Soil Science Society of America Journal 68:1501-1507. 2004.

COESAGRO; CENICAFÉ; MADR. Recopilación, organización, digitalización y análisis de la información de suelos de los estudios de zonificación y uso potencial de las zonas cafeteras. Bogotá: MADR: FNC: CENICAFÉ, 2013. Volúmenes I, VII, VIII, XI, XIII.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P. Quality control procedures in the Agroclimatic Stations Network of Andalusia. Lisboa: Proceedings of the 4th International Conference on Experiences with Automated Weather Stations, 2006. 24-26.

GAITÁN B., A.L.; FLÓREZ R., C.P.; GARCÍA L., J.C.; BENAVIDES M., P.; GIL P., Z.N.; SADEGHIAN K., S.; LINCE S., L.A.; SALAZAR G., L.F.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; PEÑUELA M., A.E.; RODRÍGUEZ V., N.; QUINTERO Y., L.V.; LÓPEZ N., J.C. Evento de La Niña en Colombia: Recomendaciones para la caficultura. Manizales: Cenicafé, 2016. 12 p. (Avances Técnicos No. 467).

GÓMEZ G., L.; CABALLERO R., A.; BALDION R., J.V. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá: Cenicafé: FNC, 1991. 138 p.

GÓMEZ, O. Efecto del estrés hídrico sobre la actividad fotosintética en la planta de café (*Coffea arabica* L. c.v. Colombia). Manizales: Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2000. 67 p. (Trabajo de Grado: Ingeniero Agrónomo).

GRAYBEAL D., Y.; DEGAETANO A., T.; EGGLESTON K., L. Improved Quality Assurance for Historical Hourly Temperature and Humidity: Development and Application to Environmental Analysis. Journal of Applied Meteorology, 43(11), 1722-1735. 2004.

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Cambio climático 2014:

Impactos, adaptación y vulnerabilidad: Resumen para responsables de políticas. [En Línea]. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014. 32 p Disponible en internet: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgl_spm_es.pdf. Consultado en diciembre 3 de 2017.

HANCHI, A.; RAPP, M. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management* 97(3): 231-235. 1997.

HUBBARD, K. G.; GODDARD, S.; SORENSEN, W. D.; WELLS, N.; OSUGI, T. T. Performance of Quality Assurance Procedures for an Applied Climate Information System. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(1), 105–112. 2005.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá: IDEAM. 2013. 47 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. Suelos de Colombia. Bogotá: IGAC, 1995. 632 p.

JARAMILLO R., A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. 4 p. Chinchiná: Cenicafé, 1999. (Avances Técnicos No. 262).

JARAMILLO R., A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná: Cenicafé, 2005. 192 p.

JARAMILLO R., A. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):288-298. 2006.

JARAMILLO R., A. Épocas recomendadas para la siembra del café en Colombia. Manizales: Cenicafé, 2016. 12 p. (Avances Técnicos No. 465).

JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 49(2):129-135. 1998.

JARAMILLO R., A.; CHÁVES C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2): 97-105. 1999.

MARÍN, F.R. Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado. Piracicaba : Universidade de São Paulo, 2003. 118 p. (Trabajo de grado: Doutor em Agronomia)

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations. CIMO, OPAG-SURFACE. WMO. 2004.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guide to agricultural meteorological practices. [En línea]. Ginebra: WMO, 2010. Disponible en Internet: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/documents/WMO_No134_en.pdf. Consultado en noviembre 2 de 2017.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guide to climatological practices. [En línea]. Ginebra: WMO, 2011. Disponible en Internet: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_en.pdf. Consultado en octubre 24 de 2017.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guide to meteorological instruments and methods of observation: CIMO guide. [En línea]. Ginebra: WMO, 2014. Disponible en Internet: https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4147. Consultado en noviembre 2 de 2017.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A. Mathematical, Physical and Engineering Science* 193(1032):120-145. 1948.

RAMÍREZ B., V.H. Vulnerabilidad de algunos suelos de la zona cafetera colombiana al déficit hídrico. Manizales: Cenicafé, 2014. 8 p. (Avances Técnicos No. 449).

RAMÍREZ B., V.H.; GAITÁN B., A.L.; BENAVIDES M., P.; CONSTANTINO C., L.M.; GIL P., Z.N.; SADEGHIAN K., S.; GONZÁLEZ O., H. Recomendaciones para la reducción del riesgo en la caficultura de Colombia ante un evento climático de El Niño. Manizales: Cenicafé, 2014. 12 p. (Avances Técnicos No. 445).

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé* 61(1):55-66. 2010.

REEK, T., DOTY, S. R.; OWEN, T. W. A Deterministic Approach to the Validation of Historical Daily Temperature and Precipitation Data from the Cooperative Network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(6), 753–762. 1992.

SADEGHIAN K., S.; JARAMILLO R., A. Nutrición de los cafetales en Colombia, en escenarios de La Niña. Manizales: Cenicafé, 2016. 12 p. (Avances Técnicos No. 473).

SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.; FENEDES, D.R. Irrigação na cultura do café. Campinas: Arbore, 1996. 146 p.

SHAFFER, M.A.; FIEBRICH, C.A.; ARNDT, D.S.; FREDRICKSON, S.E.; HUGHES, T.W. Quality Assurance Procedures in the Oklahoma Mesonet. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17(4):474-494. 2000.

SHAXSON, F.; BARBER, R. Optimizing soil moisture for plant production: The significance of soil porosity. [En línea]. Rome: UN: FAO, 2003. Disponible en Internet: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/65454>. Consultado en diciembre 10 de 2017.

SILVA, A.L. DA. Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: Um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006. 72 p. (Trabajo de grado: Doutor em Agronomia)

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1):55-94. 1948.

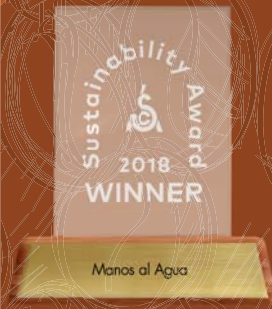
VELÁSQUEZ F., S.; JARAMILLO R., A. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009.





WORMER, T.M.; GITUANJA, J. Floral initiation and flowering in *Coffea arabica* L. in Kenya. *Experimental Agriculture* 6:157-170. 1970.

ISBN: 978-958-8490-29-8



9 789588 1490298



-  /Manos-al-Agua-803495479773162
-  /ManosAlAgua
-  /manosalagua
-  Manos al agua