



Determinación experimental de la huella hídrica del café de Colombia

Nelson Rodríguez Valencia
Disciplina Poscosecha
Septiembre 21 del 2020



Agradecimientos

FNC-Cenicafé

- Ing. Rodrigo Calderón Correa. Oficina Central FNC.
- Ing. Jhon Félix Trejos Pinzón. Coordinador Estación Central Naranjal. Disciplina Experimentación. Cenicafé.
- Ing. Carlos Mario Ospina Penagos. Coordinador Estación El Rosario. Disciplina Experimentación. Cenicafé.
- Ing. Hernán Darío Menza Franco. Coordinador Estación El Tambo. Disciplina Experimentación. Cenicafé.
- Ing. Luz Adriana Lince Salazar. Investigadora Científico I. Disciplina de Suelos. Cenicafé.
- Ing. Ninibeth Gibelli Sarmiento Herrera. Asistente de Investigación. Disciplina Agroclimatología. Cenicafé.
- Ing. José Raúl Rendón Saenz. Investigador Científico I. Disciplina de Fitotecnia. Cenicafé.
- Ing. Laura Quintero y Aux. Samuel Antonio Castañeda. Disciplina Poscosecha. Cenicafé.

Otras Instituciones

- Dr Miguel Antonio Romero Sánchez, Dra Marcela Quintero. CIAT.
- Dr. Wouter Wolters, Dra Laura Miguel Ayala, Dr Ángel de Miguel García. Wageningen UR - Integrated Water Management.
- Dr. Daniel Chico Zamanillo. WFN.

Datos involucrados en el análisis de los resultados



Datos involucrados en el análisis de los resultados

Grupo	VARIABLES	Frecuencia	Parcelas	Estaciones	Datos Totales
Suelo	6	15 min	6	3	15 millones
Aire	8	diaria	6	3	17520
Agua	10	mensual	6	3	8640



¿Qué es la huella hídrica?



Nacimiento El 16. Reserva Natural
Planalto.
Rodríguez, 2014

Según la WFN es un indicador que cuantifica el volumen de agua usado y el volumen de agua contaminado, involucrados en la producción de un bien o en la generación de un servicio.

Huella Hídrica: Volumen de agua (lluvia, superficial, subterránea) usado en un proceso antrópico que no retorna a la cuenca de donde fue extraída o retorna con una calidad diferente a la original (IDEAM, 2015).

Tiene tres componentes: dos asociados a la cantidad de agua, HH verde y HH azul y uno asociado a la calidad del agua HH gris.

Huella hídrica verde: Volumen de agua lluvia almacenada en el suelo para uso antrópico. ENA, 2014, *Indica el grado de competencia del sector agropecuario con los ecosistemas naturales.*

Huella Hídrica azul: Volumen de agua superficial, subsuperficial y subterránea para uso antrópico que no retorna a la cuenca de origen. ENA, 2014 *señala los conflictos por uso en relación a la oferta hídrica disponible.*

Huella hídrica gris: Volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga contaminante vertida a un cuerpo receptor. *Expresa la reducción de la disponibilidad por afectación a la calidad del agua.*

¿Qué es la huella hídrica?

La HH se basa en el desarrollo amplio de cuatro conceptos previos: agua virtual, agua verde, agua azul y agua gris.

Agua virtual en L/kg

Producto	Agua virtual
Arroz paddy	2291
Arroz con cáscara	2975
Arroz partido	3419
Trigo	1334
Maíz	909
Soja	1789
Caña de azúcar	175
Semilla de algodón	3644
Algodón	8242

Producto	Agua virtual
Cebada	1388
Sorgo	2853
Café (crudo)	17373
Café (tostado)	20682
Carne de vaca	15497
Cerdo	4856
Leche	990
Leche en polvo	4602
Queso	4914

Fuente: FAO, 1999

Agua virtual. Introducida como concepto por Allan (1993) y hace referencia al volumen de agua requerido para la producción de un producto o servicio, medida a lo largo de su cadena de suministro.

Agua verde. hace referencia al agua de la lluvia almacenada en el suelo en forma de humedad. Posteriormente la FAO retomó el concepto como el flujo vertical de agua.

Agua azul. Representa el flujo horizontal del agua (el agua de escorrentía, fuentes de agua superficial y subterránea). Como concepto representa el uso consuntivo del agua (evaporación, incorporación a un producto, transvase).

Agua gris. Representa el agua contaminada (por ingreso de contaminantes generados en procesos antrópicos) que llega a fuentes de agua naturales.

HUELLA HÍDRICA y AGUA VIRTUAL

La huella hídrica es el volumen total de agua usada desde la producción hasta el consumo final de un producto, y la utilizada para disolver sus contaminantes.

El agua virtual es la que se utiliza para producir bienes o servicios; no la vemos físicamente en los productos, pero es necesaria para elaborarlos.

La huella hídrica total es la suma del agua azul, el agua verde y el agua gris que requiere un producto durante todo su proceso de producción y distribución. Puede calcularse por individuo, empresa, región o país, y generalmente se expresa en términos de volumen de agua por año.

En promedio global este es el contenido de agua virtual en algunos productos:



CUIDAR EL AGUA ES RESPONSABILIDAD DE PRODUCTORES Y CONSUMIDORES



Diferencia entre HH y Huella de Agua

La huella por el uso del agua en los procesos productivos puede evaluarse desde distintos puntos de vista o enfoques metodológicos.



Según WFN, la HH es un indicador volumétrico sobre la apropiación de agua dulce por parte del ser humano, cuya contextualización espacial y geográfica es imprescindible para llevar a cabo un análisis de sostenibilidad (Hoekstra *et al.*, 2011).

Para conocer el consumo de agua asociado a una comunidad y tomar decisiones respecto a la asignación de los recursos hídricos de un sitio para satisfacer la demanda de agua directa e indirecta de esa comunidad.



ISO 14046

La norma ISO 14046: "Gestión Ambiental-Huella de agua", publicada en 2014, es una opción metodológica para evaluar el impacto potencial de productos, servicios u organizaciones al agua de manera integral (considera cantidad y calidad del agua y un enfoque de ACV). Evalúa entradas, salidas e IA de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.

Para conocer el impacto que se produce sobre la disponibilidad de agua o la acidificación acuática, o incluso el daño potencial que podría causar sobre la salud humana o los ecosistemas.

¿Para qué se usa el indicador de HH?



...Para **conocer** la apropiación humana del agua.

Lo que se evidencia en el impacto (en términos de consumo y contaminación del agua por parte de los seres humanos, con fines productivos).



...Para **cuantificar** el uso del recurso hídrico en la agricultura.

...Para generar **conciencia** de dónde y cómo se utiliza el agua.

...Para tomar **mejores decisiones** sobre cómo manejar los recursos y gestionar procesos.



...Para identificar **puntos críticos** y de manejo bajo escenarios de variabilidad climática.

...Para generar **políticas públicas** sobre sostenibilidad ambiental y productiva.

Huella hídrica de la producción agrícola por categorías

Cultivo	Huella hídrica (m ³ ton ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Azucarero	130	52	15	197
Forrajes	207	27	20	253
Verduras	194	43	85	322
Raíces y tubérculos	327	16	43	387
Frutas	727	147	93	967
Cereales	1232	228	184	1644
Oleaginosos	2023	220	121	2364
Tabaco	2021	205	700	2925
Fibras	3375	163	300	3837
Legumbres	3180	141	734	4055
Espicias	5872	744	432	7048
Nueces	7016	1367	680	9063
Resinas	12964	361	422	13748
Estimulantes	13731	252	460	14443

Producto	Huella hídrica (m ³ ton ⁻¹)			
	Verde	Azul	Gris	Total
Café Verde	15249	116	532	15897
Café Tostado	18153	139	633	18925

The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra. 2011. Pág 1584-1589.

Huella Hídrica Nacional. Cultivos Permanentes

PRODUCTO	HH Verde (Hm3/año)	% del total
Café	10786,5	25,5
Plátano	6488,7	15,3
Palma	6280,3	14,8
Caña	6206,2	14,7
Cacao	2554,1	6,0
Yuca	2211,2	5,2
Banano	1168,6	2,8
Coca	1001,8	2,4
Cítricos	805,4	1,9
Aguacate	719,1	1,7
Caucho	485,7	1,1
Ñame	453,6	1,1
Mango	447,3	1,1
Naranja	266,1	0,6
Piña	261,7	0,6
Coco	226,4	0,5
Guayaba	180,3	0,4
Mora	161,1	0,4

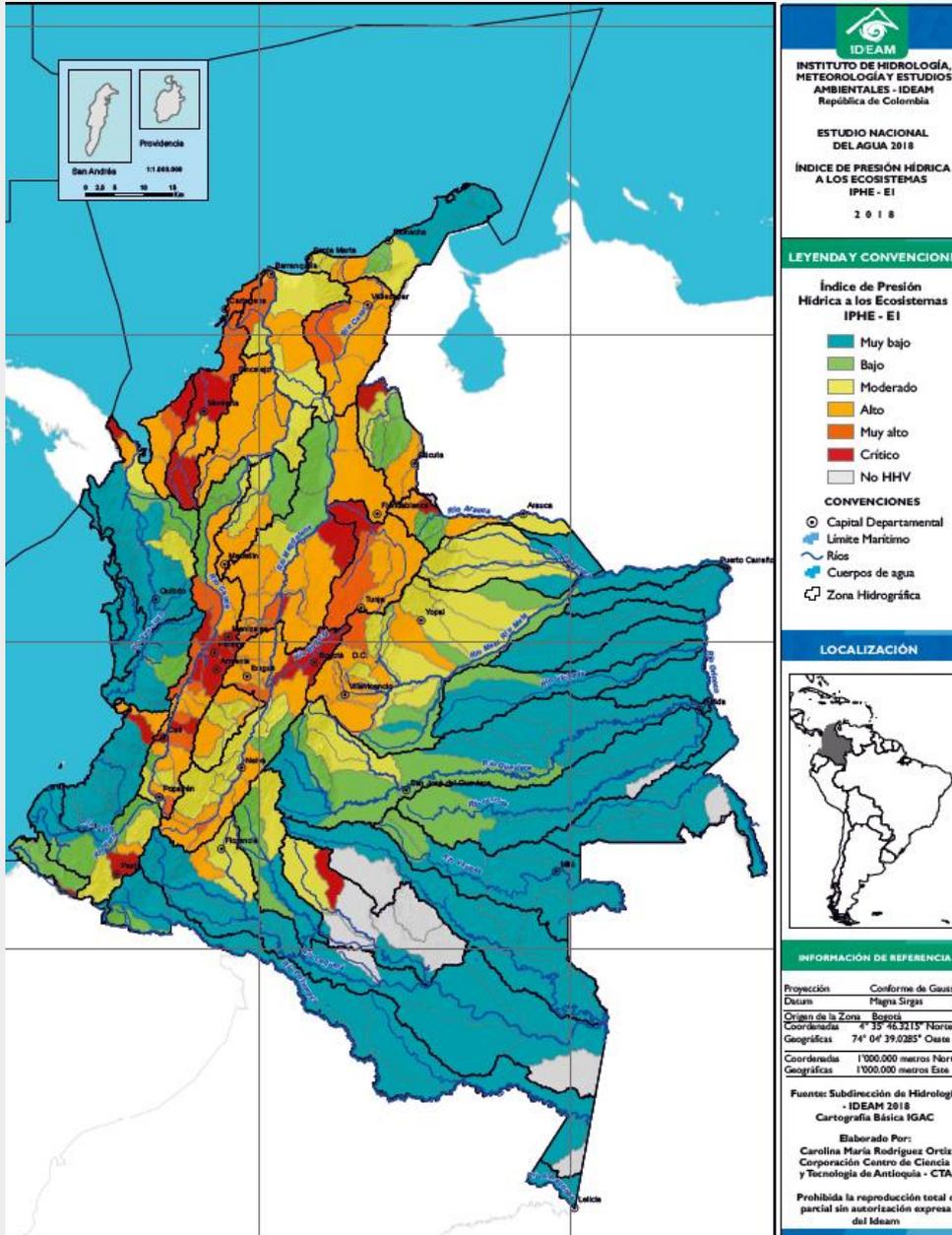
ENA, 2018

PRODUCTO	HH Azul (Hm3/año)	% del total
Plátano	1279,6	25,7
Palma	1000,6	20,1
Caña	639,6	12,8
Yuca	574,8	11,5
Cacao	335,1	6,7
Banano	291,5	5,9
Ñame	231,5	4,6
Mango	161,4	3,2
Cítricos	81,9	1,6
Piña	43,7	0,9
Aguacate	43,3	0,9
Naranja	32,5	0,7
Flores	30,2	0,6
Mora	24,9	0,5
Tomate de árbol	19,2	0,4
Guayaba	16,0	0,3
Café	0,6	0,0

ENA, 2018

PRODUCTO	HH Gris (Hm3/año)	% del total
Café	1.151	54,9
Arroz	400	19,1
Maíz	237	11,3
papa	151	7,2
Cacao	45	2,2
Palma Africana	33	1,6
Algodón	21	1,0
Caña de azúcar	20	0,9
Tomate	16	0,8
Zanahoria	9	0,4

Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia. Sector Agrícola. Arévalo, Lozano, Sandoval. WWF. 2011



Índice de presión hídrica a los ecosistemas

El cálculo de Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE) se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$IPHE = \frac{\sum HH_{verde}}{DAV}$$

Donde:

$\sum HH_{verde}$: Suma de todas las huellas hídricas verdes al interior de la cuenca en un periodo de tiempo "t", en volumen/tiempo.

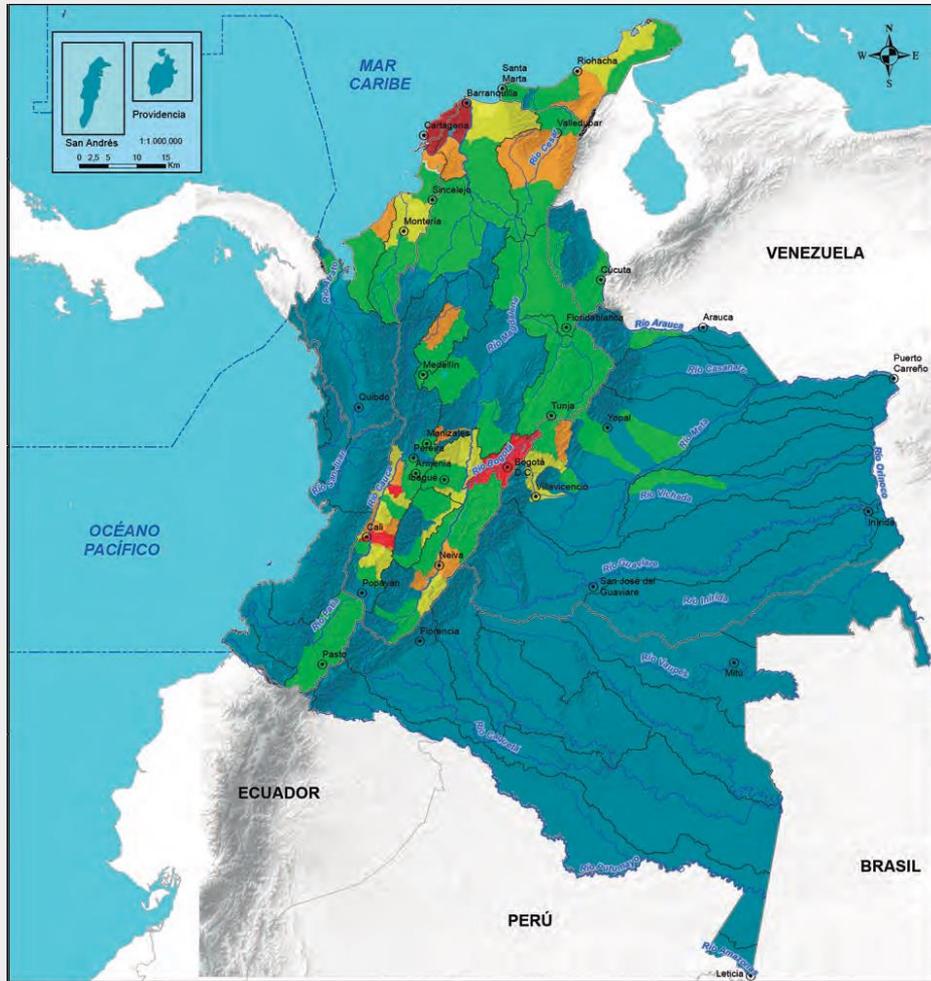
DAV: Disponibilidad de agua verde en la cuenca para el periodo de tiempo "t", en volumen/tiempo.

IPHE = Huella hídrica verde/Disponibilidad agua verde

Rangos	Categoría
<0,1	Muy baja
0,1 - 0,3	Baja
0,3 - 0,5	Moderada
0,5 - 0,8	Alta
0,8 - 1,0	Muy alta
>1,0	Crítica

En el ENA 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la HH verde del café de 10.786,5 Hm³/año y una disponibilidad de agua verde de 1.008.965,7 Hm³/año. Con los datos anteriores se obtiene un índice de presión hídrica de los ecosistemas, para el cultivo del café de 0,011 (categoría de muy baja).

Índice de agua no retornada a la cuenca



$$IARC = \frac{\sum HH_{Azul}}{OHD_{Año_Medio}}$$

En donde:

$\sum HH_{Azul}$: suma de todas las huellas hídricas azules multisectoriales al interior de la cuenca en un periodo de tiempo "t", en volumen/tiempo.

$OHD_{Año_Medio}$: oferta hídrica disponible en año medio que determina la disponibilidad de agua azul en la cuenca para el periodo de tiempo "t", en volumen/tiempo.

IARC = Huella azul / Oferta hídrica	
Rangos	Categoría
<0,01	Muy baja
0,01 - 0,1	Baja
0,1 - 0,2	Moderada
0,2 - 0,5	Alta
0,5 - 1,0	Muy alta
>1,0	Crítica

En el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2019) se presenta un valor de la HH azul del café de 0,6 Hm³ y un valor de la oferta hídrica disponible de 151.875 Hm³, por lo que el índice de agua no retornada a la cuenca fue de 4*10⁻⁶, que lo sitúa en la categoría de muy baja.

IARC categoria por subzona hidrográfica

- Muy bajo
- Bajo
- Moderado
- Alto
- Muy alto
- Crítico
- Sin información

Convenciones

- Capital Departamental
- Limite Internacional Marítimo
- ~ Rios
- + Cuerpos de agua
- Área Hidrográfica
- Zona Hidrográfica
- Subzona Hidrográfica

Información de Referencia

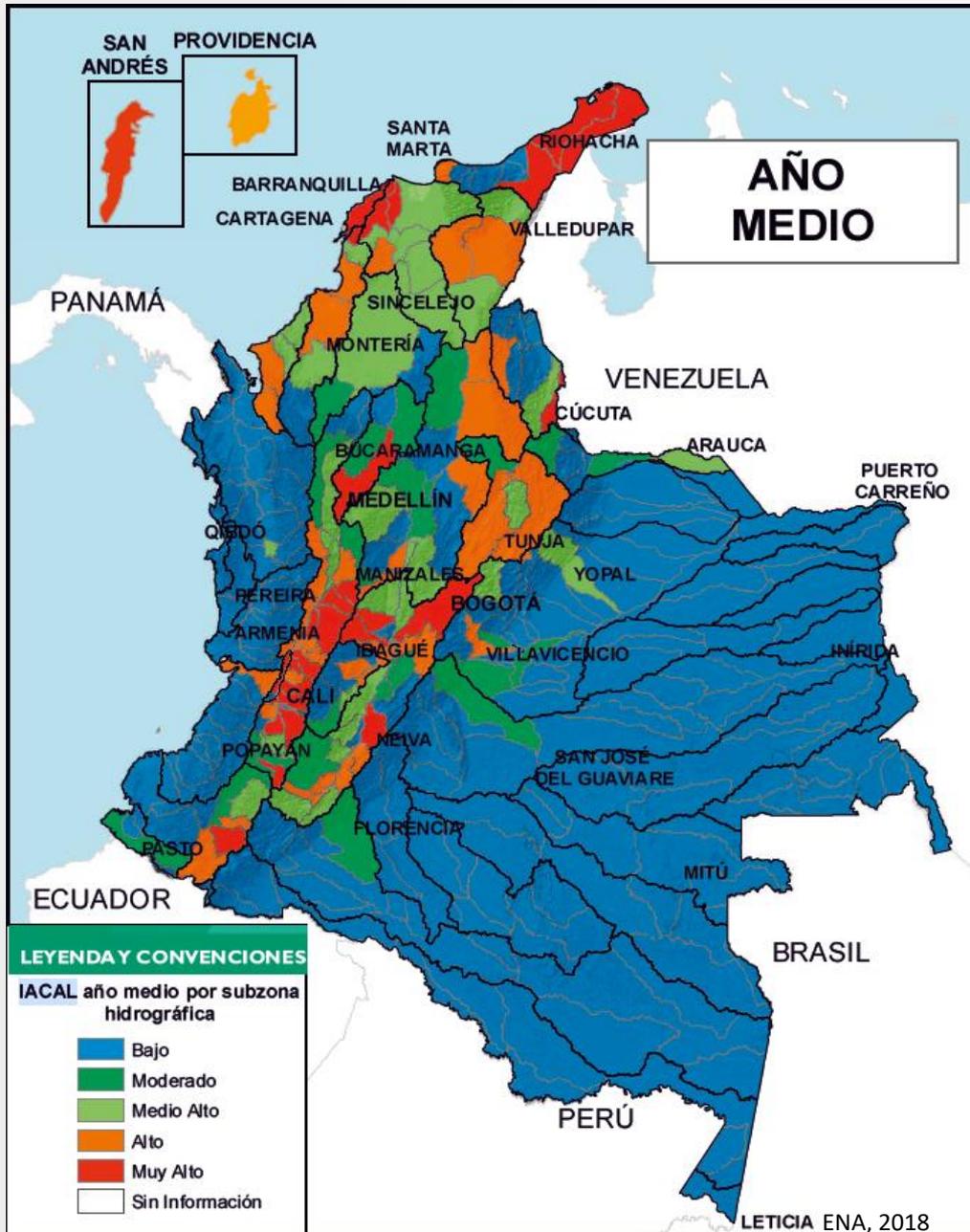
Escala: 1:11.000.000

PROYECCION: Conforme de Gauss
 DATUM: MAGNA - SIRGAS
 COORDENADAS: 4° 35' 46,32" Lat N, 74° 04' 39,02" Lon W
 Fuente: COSUDE - CTA 2014, IDEAM 2014
 Cartografía Básica IGAC

Índice de alteración potencial de la calidad del agua

IACAL, es el referente de la presión sobre las condiciones de calidad de agua en los sistemas hídricos superficiales del país.

Se evalúa a partir del promedio de las jerarquías asignadas a las cargas contaminantes de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes ejercidas por el sector doméstico de 1099 municipios, el industrial de 186 municipios y el agrícola (café y cultivo de coca).



Rangos $LACAL_{jt-año med}$ $LACAL_{jt-año sec}$	Categoría de clasificación	Calificación de la presión
$1,0 \leq IACAL \leq 1,5$	1	Baja
$1,5 < IACAL \leq 2,5$	2	Moderada
$2,5 < IACAL \leq 3,5$	3	Media-Alta
$3,5 < IACAL < 4,5$	4	Alta
$4,5 \leq IACAL \leq 5,0$	5	Muy Alta

Huella hídrica café de Colombia.

Países	Requerimiento de agua para la cosecha	Rendimiento en café verde	Contenido de agua virtual del café verde	Contenido de agua virtual del café tostado	Producción promedio (1995-99)	Peso relativo en la producción
	mm	ton/ha	m ³ /ton	m ³ /ton	ton/año	
Brasil	1277	0.68	18925	22530	1370232	0.262
Colombia	893	0.74	12139	14451	689688	0.132
Indonesia	1455	0.55	26650	31727	466214	0.089
Vietnam	938	1.87	5086	6054	384220	0.073
Mexico	1122	0.46	24347	28985	329297	0.063
Guatemala	1338	0.90	14940	17786	240222	0.046
Uganda	1440	0.84	17139	20404	229190	0.044
Ethiopia	1151	0.91	12749	15177	227078	0.043
India	754	0.81	9312	11086	220200	0.042
Costa Rica	1227	1.47	8424	10028	157188	0.030
Honduras	1483	0.78	19028	22652	154814	0.030
El salvador	1417	0.85	16789	19987	138121	0.026
Ecuador	1033	0.32	32616	38828	121476	0.023
Peru	994	0.61	16335	19446	116177	0.022
Tailandia	1556	1.12	13993	16658	75814	0.015
Venezuela	1261	0.35	35923	42766	67802	0.013
Nicaragua	1661	0.73	22797	27139	65373	0.013
Madagascar	1164	0.33	35521	42287	63200	0.012
Tanzania	1422	0.38	37219	44308	44540	0.009
Bolivia	1093	0.94	11733	13968	22613	0.004
Togo	1409	0.34	41447	49341	14416	0.003

Chapagain y Hoekstra, 2003

Huella hídrica café de Colombia.

HH verde m ³ /t cv	HH azul m ³ /t cv	HH gris m ³ /t cv	HH total m ³ /t cv	Referencia
13033	0	1533	14566	Adaptado de Mekonnen y Hoestra (2010).
-	-	-	11113	Arévalo <i>et al.</i> , 2012.
7460	0	147	7607	Builes, 2013.
25444	0	-	-	Adaptado de IDEAM, 2015.
4378,48	-	13,87	-	Adaptado de Barragán y Siachoque, 2017.
7973	20,28	-	-	Adaptado de Ariza y Arévalo, 2018
7973	13,61	133661	-	Adaptado de Mild Coffee Company Huila <i>et al.</i> , 2018.
12632	0,703	-	-	Adaptado de IDEAM, 2019.

Rodríguez *et al.*, 2020

Las variaciones en los valores de la HH no siempre se deben a la localización o manejo del cultivo, sino que en muchas ocasiones se deben a cuestiones metodológicas y al uso de distintas fuentes de información o incluso por asumir distintas hipótesis de partida.

El uso de información local como el clima, el rendimiento, el manejo del cultivo, la tipología del sistema de beneficio o el tratamiento de efluentes, es esencial para obtener un valor representativo de la HH.

Una clara definición de los elementos incluidos en el análisis, especialmente en el caso de la HH gris, es imprescindible para obtener valores comparables con otros trabajos.

Objetivo de la investigación



General

Cuantificar experimentalmente la HH para el ciclo de producción del café de Colombia (hasta obtener cps) y realizar su análisis de sostenibilidad con el fin de generar estrategias en torno a una eficiente gestión del recurso hídrico en las fincas cafeteras.

Específico

Cuantificar en 3 estaciones experimentales de Cenicafé: El Rosario (Venecia, Antioquia), Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas) y El Tambo (Tambo, Cauca), la huella hídrica directa del café de Colombia en sus 3 colores (Verde, Azul y Gris) y en las etapas de germinador, almácigo, levante, producción y beneficio, para una densidad de siembra de 10000 árboles/ha.

Alcance de la investigación

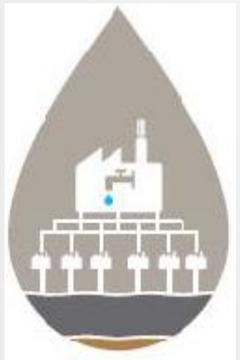


La presente investigación tuvo como alcance: *la medición experimental de la HH directa en todo el ciclo de producción de café en la finca, desde la germinación de la semilla hasta la obtención del café pergamino seco y ciclo completo (siembra nueva a renovación por primera zoca) , teniendo en cuenta los componentes verde, azul y gris de la HH.*



No se contempla en el alcance de la investigación las siguientes operaciones, al considerarse como parte de la HH indirecta de la producción de café:

- La HH de los insumos para el cultivo del café (fertilizantes, agroquímicos).
- La HH de cualquier insumo utilizado en el beneficio.
- La HH de la energía empleada en los procesos.
- La HH de la maquinaria empleada en los procesos
- La HH asociada al transporte del café dentro o fuera de la finca.
- La HH para la comercialización y consumo final.
- La HH asociada a la satisfacción de necesidades básicas de la familia cafetera.
- La HH asociada a los residuos proveniente de los insumos utilizados (como bolsas para almácigo, envases y empaques de agroquímicos, etc.)
- Cualquier actividad posterior a la obtención del café pergamino seco.



Ecuaciones utilizadas



$$HH_{Total}(L/kg) = HH_{directa_{fase\ de\ cultivo}} + HH_{directa_{fase\ de\ beneficio}}$$

$$HH_{fase\ de\ cultivo}(L/kg) = HH_{Verde_{cultivo}} + HH_{Azul_{cultivo}} + HH_{Gris_{cultivo}}$$

$$HH_{fase\ de\ beneficio}(L/kg) = HH_{Azul_{beneficio}} + HH_{Gris_{beneficio}}$$



$$HH_{verde}(L/unidad\ de\ producto) = \frac{ET_{agua\ verde} + Incorporación}{Rendimiento}$$



$$HH_{azul}(L/unidad\ de\ producto) = \frac{ET_{agua\ azul} + Incorporación + Evaporación(A,A,T)}{Rendimiento}$$

$$HH_{gris} = \frac{(E_{ffl} \times c_{effl} - Abstr \times c_{act})}{(C_{max} - C_{nat})}$$



Contaminante	Valor Límite (ppm)	Referencia
DQO	25	IDEAM, 2013
SST	100	IDEAM, 2013
N-NO ₃	45	Decreto 1594 de 1984
P-PO ₄	6	Normativa Europea
N-NH ₃	2	Decreto 1594 de 1984

Determinación Huella Hídrica

Etapa de germinador



Determinación Huella Hídrica. Etapa de germinador. Metodología



- Se construyeron 3 germinadores, con un área de 1,5 m² cada uno.
- Se sembró 1 kg de semilla de café Castillo (Naranjal, El Rosario, El Tambo)
- Protocolos de Cenicafé (FNC, Cartilla Cafetera No. 4, 2004).
- Se realizó un registro diario de la pluviosidad (HHv) y se caracterizó el agua de lluvia.
- Se cuantificó el agua utilizada en el riego del germinador (HHa) y se caracterizó .
- Se recolectaron, midieron y caracterizaron los drenados generados (HHg). Se unieron muestras por quincenas y se caracterizaron en los parámetros pH, Turbidez, DQO, Sólidos Suspendedos Totales, P-PO₄, y N-NO₃ (Standard Methods, 1992).
- Se determinó la humedad del sustrato antes y después del proceso.
- Una vez obtenidas las chapolas, se tomaron muestras para determinar su peso y humedad y calcular el agua incorporada a la biomasa.

Balance hídrico

$$P + R = D + INC + ET$$

Resumen de entradas, salidas, ET etapa de germinador

Variable	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Entradas (L)	1186,20	873,35	1157,50	1072,35
Salidas (L)	255,86	420,58	289,89	322,11
ET Total (L)	930,34	452,77	867,61	750,24
Tiempo de germinación (d)	96	92	91	93
ET diaria (L)	9,69	4,92	9,53	8,05
ET diaria (mm)	6,46	3,28	6,36	5,37
ETo diaria (mm)	3,24	3,57	3,40	3,40
Kc	1,99	0,92	1,87	1,59

Salidas en la etapa de germinador

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/germinador)
	Naranjal	El Tambo	El Rosario	
Drenados(L)	224,31	377,36	261,71	287,79
Agua Incorporada en el sustrato (L)	29,63	41,86	26,90	32,80
Agua Incorporada en la biomasa (L)	1,92	1,36	1,28	1,52
Total (L)	255,86	420,58	289,89	322,11



Eficiencia Naranjal: 81,91%



Eficiencia Tambo: 84,62%



Eficiencia Rosario: 88,01%

HH verde y HH azul en la etapa de germinador

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
Huella Hídrica Verde	863,58 L/kg semilla germinada	379,76 L/kg semilla germinada	594,82 L/kg semilla germinada	612,72 L/kg semilla germinada
	575,72 L/m ² de germinador	253,17 L/m ² de germinador	396,55 L/m ² de germinador	408,48 L/m ² de germinador
	0,190 L/chapola	0,084 L/chapola	0,131 L/chapola	0,135 L/chapola
Huella Hídrica Azul	310,74 L/kg semilla germinada	206,38 L/kg semilla germinada	423,01 L/g semilla germinada	313,38 L/kg semilla germinada
	207,16 L/m ² de germinador	137,59 L/m ² de germinador	282,01 L/m ² de germinador	208,92 L/m ² de germinador
	0,068 L/chapola	0,045 L/chapola	0,093 L/chapola	0,069 L/chapola



Caracterización de los drenados generados en la etapa de germinador

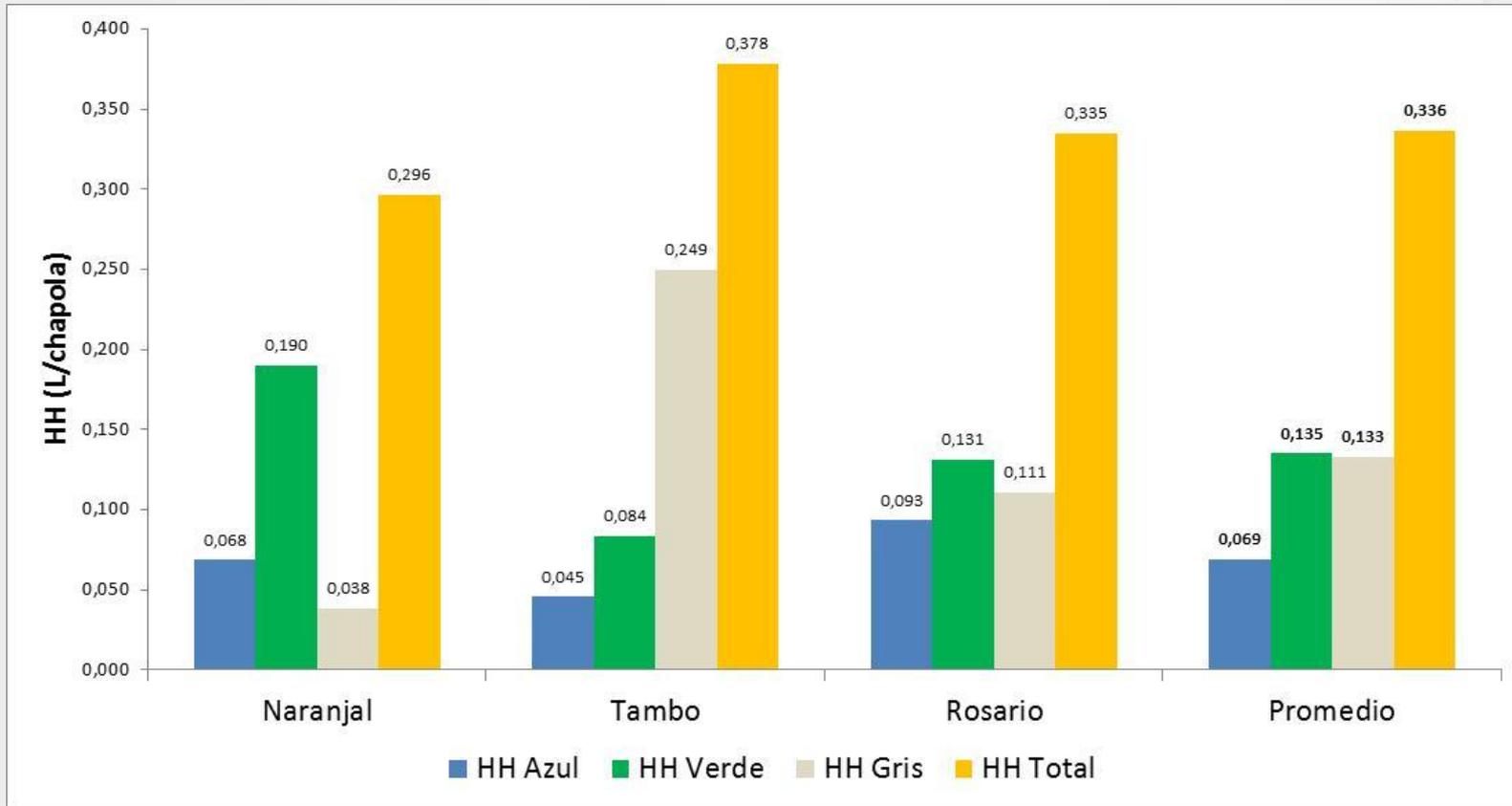
Promedio de las 3 Estaciones						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (ppm)	DQO (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)
Promedio	6,73	22	93	79	3,20	6,97
Máximo	9,49	148	183	193	8,06	15,40
Mínimo	4,89	2	51	40	0,76	1,40
Datos	108	108	108	108	108	108
DE	1,19	22,97	22,59	29,76	1,64	3,52
CV	17,66	101,07	24,37	37,66	51,18	50,54
IC	0,22	4,33	4,26	5,61	0,31	0,66



HH gris en la etapa de germinador

HH gris	Estación experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
HH gris (L/kg semilla germinada)	141,40	959,49	442,24	514,38
HH gris (L/m ² de germinador)	94,27	639,66	294,83	342,92
HH gris (L/chapola)	0,038	0,249	0,111	0,133

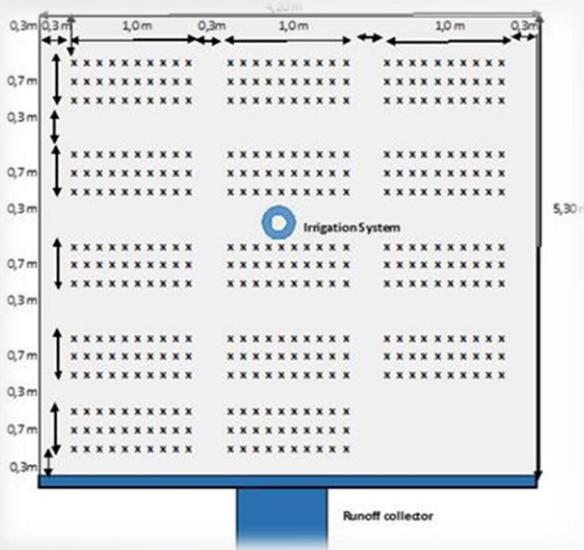
Huella hídrica de una chapola de café



Determinación Huella Hídrica

Etapa de almácigo





- Se llenaron 1260 bolsas de 17*23 cm de acuerdo con los protocolos de Cenicafé (FNC, Cartilla Cafetera No. 4, 2004). Estas bolsas se distribuyeron en tres micro-lotes de 420 bolsas cada uno.
- Se colocaron sobre un plástico que permitiera la recolección de los lixiviados.
- Se realizó un registro diario de la pluviosidad (HHv) y se caracterizó el agua de lluvia.
- Se cuantificó el agua utilizada en el riego del germinador (HHa) y se caracterizó .
- Se recolectaron, midieron y caracterizaron los drenados generados (HHg). Se unieron muestras por mes y se caracterizaron en los parámetros pH, Turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, y N-NO₃ (Standard Methods, 1992).
- Se determinó la humedad del sustrato antes y después del proceso.
- Una vez obtenidos los colinos, se tomaron muestras para determinar su peso y humedad y calcular el agua incorporada a la biomasa.

Balance hídrico

$$P + R = D + INC + ET$$

Resumen de entradas, salidas, ET etapa de almácigo

Variable	Estación Experimental			Promedio
	Naranja	El Tambo	El Rosario	
Entradas (L)	8450,46	4866,86	9400,04	7572,45
Salidas (L)	1947,45	1583,13	2293,65	1941,41
ET Total (L)	6503,01	3283,72	7106,39	5631,04
Tiempo de almácigo (d)	226	182	195	201
ET diaria (L)	28,77	18,04	36,44	27,75
ET diaria (mm)	2,94	1,84	3,72	2,83
ETo diaria (mm)	3,46	3,21	3,92	3,53
Kc	0,85	0,57	0,95	0,79



Eficiencia Naranja: 96%



Eficiencia Tambo: 94%



Eficiencia Rosario: 92%

Salidas en la etapa de almácigo

Variable	Estación Experimental			Promedio (L/almácigo)
	Naranja	El Tambo	El Rosario	
Drenados(L)	1424,74	965,98	1860,17	1416,96
Incorporada en el sustrato (L)	491,01	597,16	410,81	499,66
Incorporada en la biomasa (L)	31,70	19,99	22,67	24,79
Total (L)	1947,45	1583,13	2293,65	1941,41

Determinación Huella Hídrica. Etapa de almácigo. Resultados



Colino. EE Naranjal



Colino. EE Rosario



Colino. EE Tambo



HH verde y HH azul en la etapa de almácigo

Tipo de Huella	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
Huella Hídrica Verde	5711,89 L/bloque	3203,23 L/bloque	3957,34 L/bloque	4290,82 L/bloque
	1165,69 L/m ²	653,72 L/m ²	807,62 L/m ²	875,68 L/m ²
	13,60 L/colino	7,63 L/colino	9,42 L/colino	10,22 L/colino
Huella Hídrica Azul	1606,57 L/bloque	946,63 L/bloque	4238,17 L/bloque	2263,79 L/bloque
	327,87 L/m ²	193,19 L/m ²	864,93 L/m ²	462,00 L/m ²
	3,83 L/colino	2,25 L/colino	10,09 L/colino	5,39 L/colino



Caracterización de los drenados generados en la etapa de almácigo

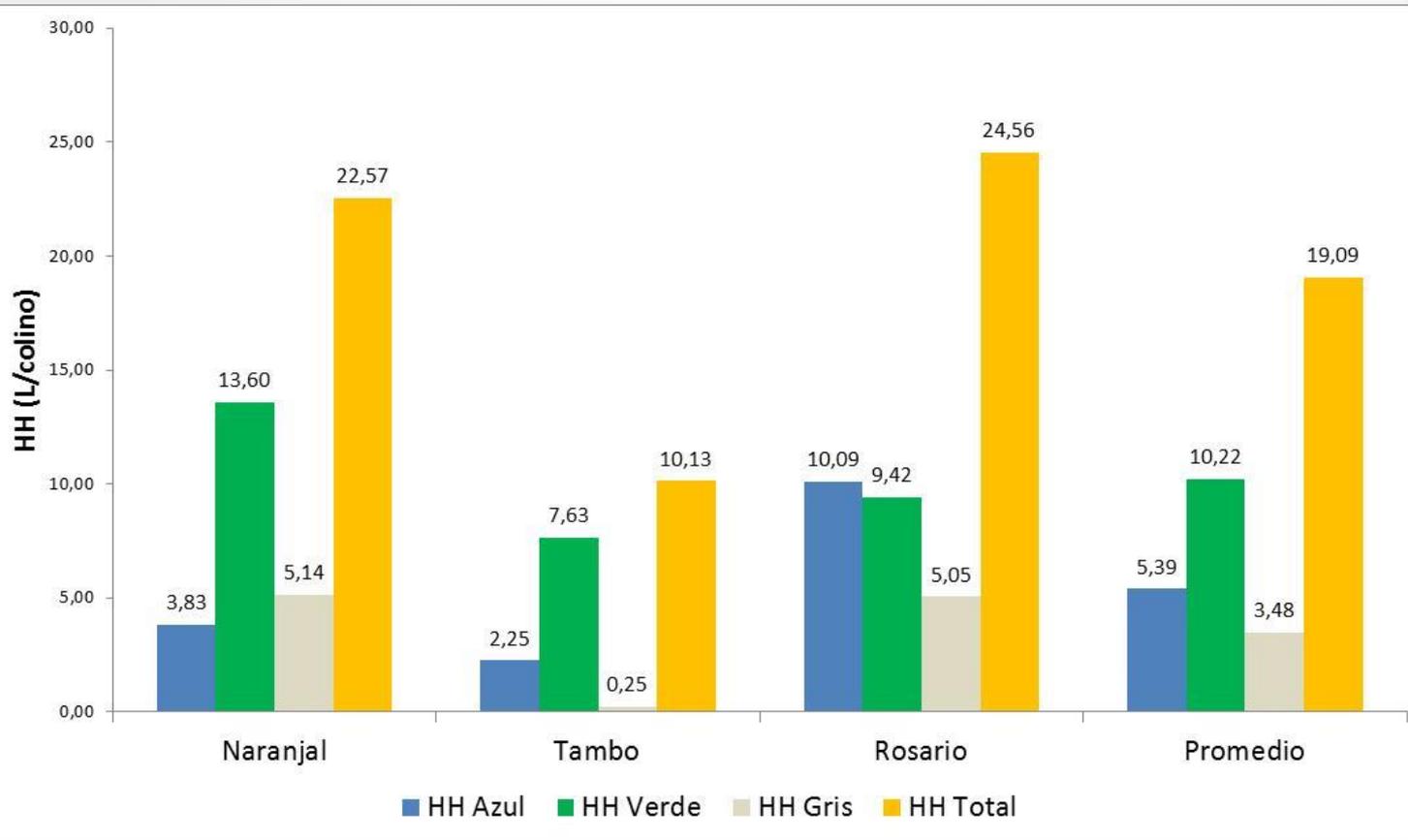


Promedio de las 3 Estaciones						
Parámetro	pH (unidades)	Turbidez (FTU)	SST (ppm)	DQO (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)
Promedio	6,23	111	143	111	2,36	16,61
Máximo	7,55	988	742	254	10,38	52,70
Mínimo	5,14	21	20	14	0,39	0,30
Datos	54	54	54	54	54	54
DE	0,43	139,30	143,07	36,05	2,24	17,16
CV	6,89	125,56	99,71	32,59	94,88	103,34
IC	0,11	37,15	38,16	9,62	0,60	4,58

HH gris en la etapa de almácigo

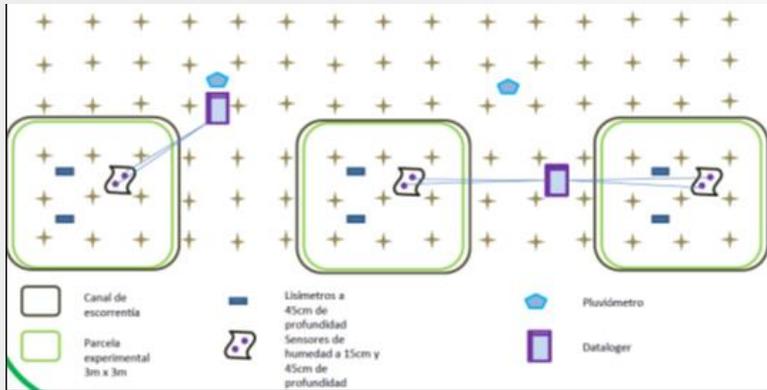
HH gris	Estación experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
HH gris (L/bloque)	2072,50	98,26	1950,41	1373,73
HH gris (L/m ²)	422,96	20,05	398,04	280,35
HH gris (L/colino)	5,14	0,25	5,05	3,48

Huella hídrica de un colino de café



Determinación Huella Hídrica *Etapas de levante y producción*





- En cada Estación se sembraron 1000 colinos (con una densidad de siembra de 10.000 árboles/ha) y se delimitaron 3 parcelas experimentales.
- Cada parcela estuvo conformada por 9 árboles de café. El tamaño de cada parcela fue de 3m x 3m (9 m²) distribuidas en el área de siembra de los colinos y aisladas, por lo menos, 3 m de surcos y caminos, con el fin de evitar el efecto borde.



Pluviómetro de registro automático.
Marca Davis



Sondas de humedad 5TE.
Marca Decagon

- Cada parcela fue instrumentada, de forma que se pudieran determinar las entradas y salidas de agua.
- Para evaluar la entrada de agua a la parcela (por precipitación) se ubicaron pluviómetros a 2,5 m de altura.
- Para determinar la salida de agua (por percolación y evapotranspiración), en cada parcela se instalaron de 2 sondas de humedad tipo Decagon 5TE (humedad, temperatura y conductividad) ubicadas a 15 y 45 cm de profundidad.

Determinación HH. Etapas de levante y producción. Metodología

- Para caracterizar la salida de agua (por percolación), en cada parcela se instalaron 2 cápsulas de succión, ubicadas a 45 cm de profundidad, separadas 1 m de los sensores de humedad (que permiten la obtención del agua percolada para determinar su calidad)
- Para determinar la salida del agua por escorrentía y realizar su caracterización se construyó una parcela de escorrentía de 30 cm de ancho, canalizando las aguas de escorrentía a un tanque para su recolección.
-
- Los sensores de humedad y el pluviómetro se conectaron a un datalogger tipo Decagon EM50 (5 canales) para el registro continuo de la información.



Cápsulas de succión de 90 cm. Marca Hanna



Datalogger 5 canales. Marca Decagon



- Los drenados obtenidos de las parcelas, a través de lisimetría y el agua de escorrentía de las mismas se conservaron antes de su análisis. Posteriormente se unieron muestras por mes y se caracterizaron en los parámetros pH, Turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, N-NO₃, N-NH₃ y N_T (Standard Methods).
- Se realizó un muestreo compuesto al suelo de las para determinar sus características hidráulicas (punto marchitez, capacidad de campo); características físicas (densidad aparente, textura, conductividad) y características químicas (bases de cambio, minerales, materia orgánica, N, P) (IGAC, 2006).
- Con el fin de asegurar la correcta determinación del contenido volumétrico de humedad del suelo, se realizó la calibración, en el laboratorio, de los sensores 5TE de Decagon, con base en el manual del fabricante (Cobos & Chambers, 2009).

$$Humedad = A + (\text{datos sin procesar}) \cdot (\text{Ecuación } 1)$$

$$Humedad = A + (\text{datos sin procesar}) + (\text{datos sin procesar})^2 \cdot (\text{Ecuación } 2)$$

Determinación Huella Hídrica *Resultados Etapa de levante*



Determinación Huella Hídrica. Etapa de levante. Resultados

La etapa de Levante tuvo una duración de 733 días en la Estación Central Naranjal, de 744 días en la Estación El Tambo y de 732 días en la Estación El Rosario, para un promedio de 736 días (24,5 meses) y comprendió el periodo de tiempo entre la siembra en campo y la producción de los primeros frutos.

Coeficientes ecuaciones de calibración sondas de humedad

Estación	Profundidad	Da (g/cm ³)	Coeficientes de la ecuación de calibración			R ²
			A	B	C	
Naranjal	15 cm (20)	0,83	0,1091	3*10 ⁻⁴	-	0,966
	45 cm (21)	0,95	0,01	4*10 ⁻⁴	-1*10 ⁻⁷	0,968
El Tambo	15 cm (20)	0,76	0,0673	2*10 ⁻⁴	-	0,984
	45 cm (20)	0,80	0,0941	2*10 ⁻⁴	-	0,972
El Rosario	15 cm (21)	0,78	-0,0252	7*10 ⁻⁴	-3*10 ⁻⁷	0,967
	45 cm (20)	1,55	0,12	3*10 ⁻⁴	-	0,985

$$\text{Humedad} = A + B * (\text{datos sin procesar del sensor}) \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\text{Humedad} = A + (\text{datos sin procesar}) + (\text{datos sin procesar})^2 \quad (\text{Ecuación 21})$$

Resultados características físicas del suelo

Estación	Sonda	Da (g/cm ³)	Ccampo (%vol) 0,33 Bares	Pto marchitez (%vol) 15,00 Bares	Almacenamiento (%vol)
Naranjal	15 cm	0,90	48,50	46,20	2,3
	45 cm	0,90	44,80	40,40	4,4
El Tambo	15 cm	0,60	42,10	39,90	2,1
	45 cm	0,80	52,50	50,40	2,2
El Rosario	15 cm	1,40	44,60	42,10	2,5
	45 cm	1,60	60,50	57,30	3,2



Determinación Huella Hídrica. Etapa de levante. Resultados



Estación El Rosario. Promedio Parcela 1, 2, 3. Etapa de Levante							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros Suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ /m ³) Sin Corregir	0,351	0,420	0,296	57	0,02	6,46	0,01
Humedad a 15 cm (m ³ /m ³) Corregida	0,374	0,383	0,346	57	0,01	2,20	0,00
Temperatura a 15 cm (°C)	22,32	24,96	20,44	57	1,09	4,90	0,28
Conductividad a 15 cm (mS/cm)	0,096	0,213	0,050	57	0,05	48,56	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ /m ³) Sin Corregir	0,412	0,461	0,352	57	0,03	6,53	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ /m ³) Corregida	0,516	0,603	0,429	57	0,04	8,57	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	22,14	24,44	20,77	57	0,88	3,97	0,23
Conductividad a 45 cm (mS/cm)	0,138	0,353	0,060	57	0,09	65,54	0,02
Parámetros Climáticos							
Velocidad del viento (m/s)	0,97	1,31	0,54	47	0,24	24,74	0,07
Brillo Solar (horas)	6,75	10,60	0,00	57	3,02	44,73	0,78
Radiación (MJ/m ² -d)	18,49	24,20	8,30	57	4,43	23,98	1,15
Temperatura Mínima (°C)	16,72	18,54	14,26	57	0,93	5,55	0,24
Temperatura Máxima (°C)	27,99	32,21	22,35	57	2,08	7,43	0,54
Humedad Relativa (%)	70,17	89,81	58,43	57	7,67	10,94	1,99
ET_o, ET y K_c							
ET _o (mm/d)	3,71	5,03	1,78	57	0,91	24,39	0,24
ET (mm/d)	1,63	9,11	0,20	57	1,43	87,43	0,37
K _c	0,53	4,09	0,06	57	0,65	122,30	0,17

Determinación Huella Hídrica. Etapa de levante. Resultados



Coeficiente de cultivo en la etapa de levante del café de Colombia				
Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Levante_1	Promedio	0,56	0,37	0,95
	Máximo	2,42	0,59	5,09
	Mínimo	0,11	0,21	0,27
	Datos	64	6	93
	DE	0,32	0,12	0,76
	CV	57,20	31,36	79,46
	IC	0,08	0,10	0,15
Levante_2	Promedio	0,57	0,66	0,58
	Máximo	0,80	4,09	4,53
	Mínimo	0,34	0,15	0,06
	Datos	6	35	91
	DE	0,15	0,76	0,81
	CV	26,39	115,09	138,52
	IC	0,12	0,25	0,17
Levante_3	Promedio	0,51	0,29	0,45
	Máximo	0,70	1,40	2,77
	Mínimo	0,41	0,06	0,04
	Datos	4	16	77
	DE	0,11	0,33	0,46
	CV	22,03	111,36	102,94
	IC	0,11	0,16	0,10
3 Parcelas	Promedio	0,56	0,53	0,67
	Máximo	2,42	4,09	5,09
	Mínimo	0,11	0,06	0,04
	Datos	74	57	261
	DE	0,30	0,65	0,73
	CV	54,15	122,30	108,76
	IC	0,07	0,17	0,09
Etapa Levante en las tres estaciones	Promedio	0,63		
	Máximo	5,09		
	Mínimo	0,04		
	Datos	392		
	DE	0,66		
	CV	105,08		
	IC	0,07		

Castaño y García, 2018, reportan un valor de Kc de $0,62 \pm 0,03$ para café (10000 árboles/ha) en la EE Paraguaicito.

$$Huella\ Hídrica\ verde_{Levante} \left(\frac{L}{m^2} \right) = ET \left(\frac{mm}{d} \right) * tiempo\ (d)$$

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)
1	2,08	733	1524,64	3,19	744	2373,36	1,28	732	936,96
2	2,26	733	1656,58	1,66	744	1235,04	2,00	732	1464,00
3	2,26	733	1656,58	1,39	744	1034,16	0,96	732	702,72
Prom. Estación.	2,10	733	1539,30	2,13	744	1584,72	1,63	732	1193,16
Promedio General Etapa Levante (L/m²)					1439,06				



Determinación Huella Hídrica. Etapa de levante. Resultados

$$HH \text{ gris Levante} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}}$$



Volúmenes de agua de Escorrentía. Etapa Levante									
Lote	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Pluviosidad: 6380,40 mm			Pluviosidad: 3347,23 mm			Pluviosidad 3394,92 mm		
	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)
1	124	404,18	3637,62	93	189,72	1707,44	101	207,24	1865,20
2	124	261,13	2350,13	80	112,32	1010,92	101	200,90	1808,12
3	123	294,77	2652,90	69	90,93	818,38	97	216,07	1944,67
Prm	124	320,02	2880,22	81	130,99	1178,91	100	208,07	1872,67
	% de la lluvia		5,02	% de la lluvia		3,91	% de la lluvia		6,13

Volúmenes de agua de Infiltración. Etapa Levante									
Lote	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)
1	0	0	0	0	0	0	20	5,58	50,18
2	0	0	0	0	0	0	40	15,34	138,05
3	0	0	0	0	0	0	104	45,72	411,47
Prm	0						55	22,21	199,90

Determinación Huella Hídrica. Etapa de levante. Resultados

$$HH \text{ gris Levante} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}}$$

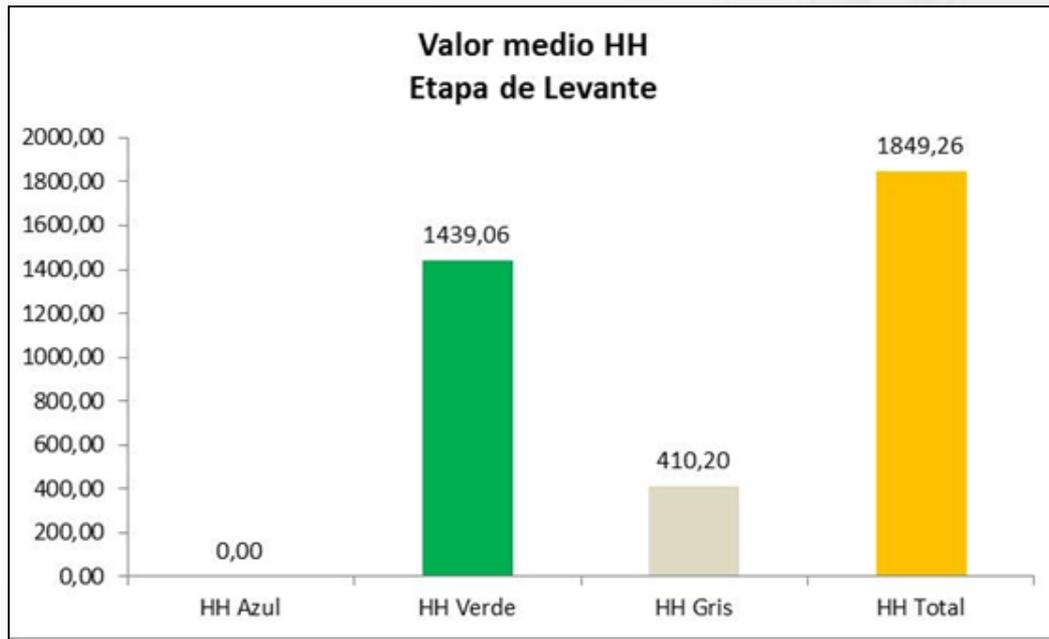
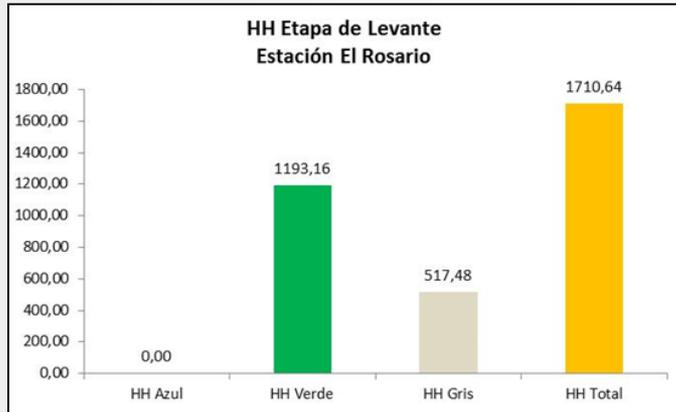
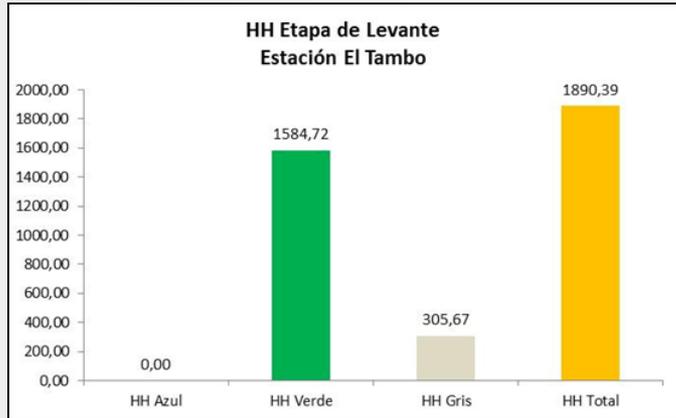
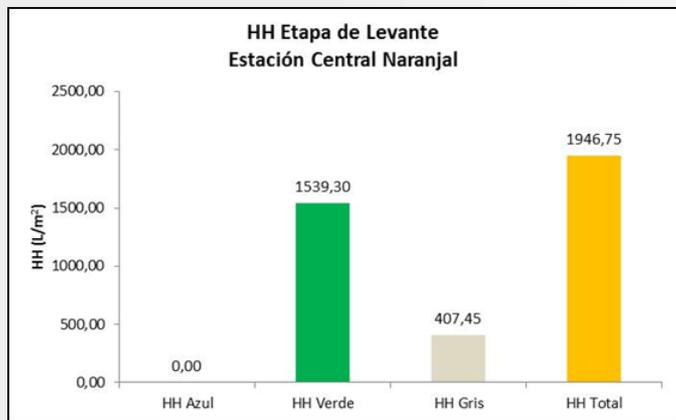


Caracterización. Drenados. Escorrentía. Etapa Levante. Promedio. 3 Estaciones.										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (ppm)	SST (ppm)	ST (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	5,79	206	84	214	108	286	1,82	7,65	85,17	10,26
Máximo	7,86	554	904	984	586	2290	6,26	37,80	236,60	32,10
Mínimo	3,41	83	2	42	4	56	0,12	1,30	28,00	4,10
Datos	190	190	190	190	190	190	190	190	65	65
DE	0,78	61,71	129,58	140,82	99,42	253,51	1,27	5,06	43,54	5,58
CV	0,13	0,30	1,53	0,66	0,92	0,89	0,70	0,66	0,51	0,54
IC	0,11	8,77	18,42	20,02	14,14	36,05	0,18	0,72	10,58	1,36

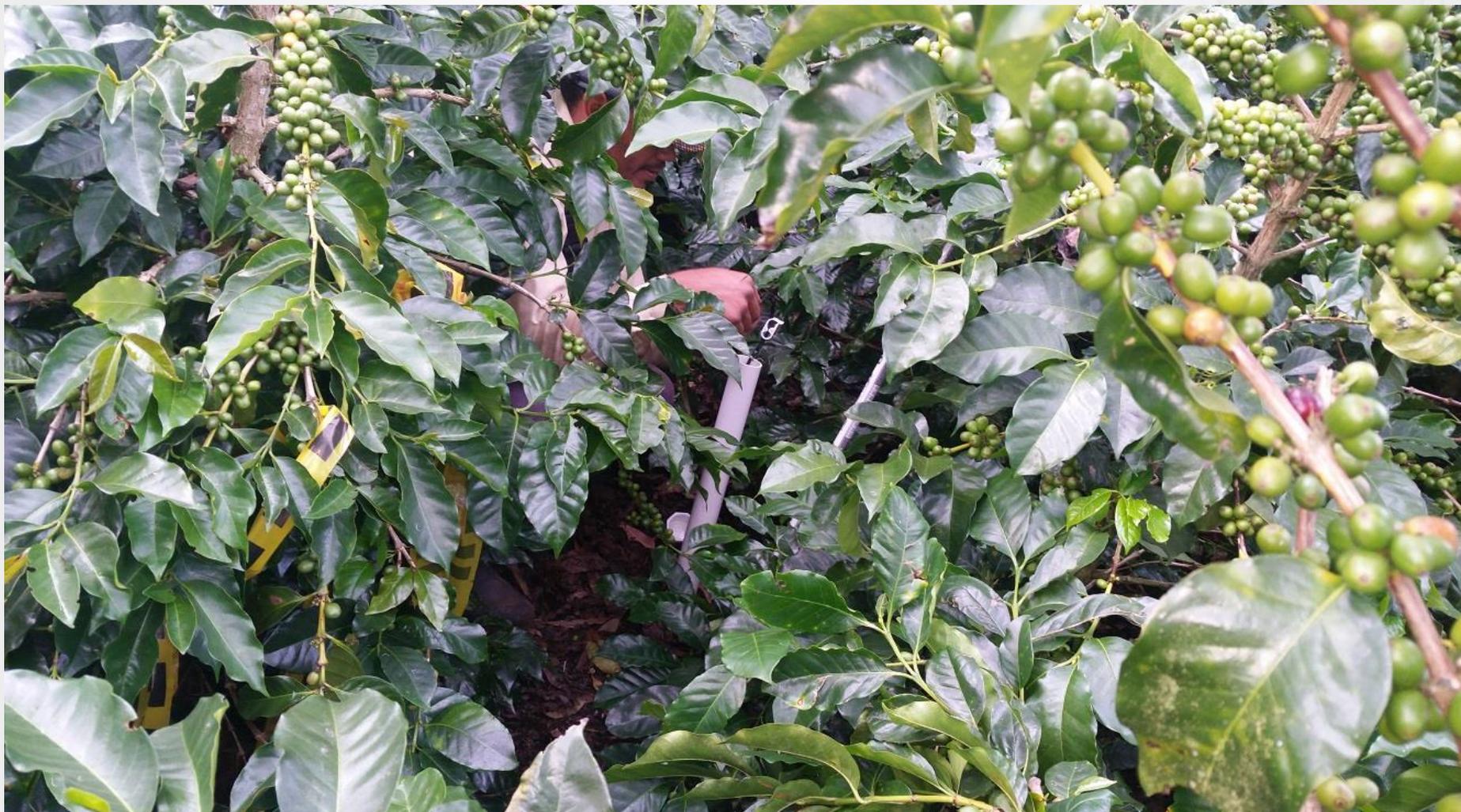
Caracterización. Drenados. Infiltración. Etapa Levante. Promedio. 3 Estaciones.										
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (ppm)	SST (ppm)	ST (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	5,96	193	5	90	25	109	1,00	6,10	51,66	7,02
Máximo	7,70	346	72	243	110	752	4,27	24,10	153,10	14,80
Mínimo	4,06	77	0	10	2	30	0,13	1,10	11,20	1,40
Datos	182	182	182	182	182	182	182	182	61	61
DE	0,58	41,26	7,65	50,30	22,19	72,42	0,67	4,45	27,41	3,03
CV	0,10	0,21	1,44	0,56	0,90	0,67	0,67	0,73	0,53	0,43
IC	0,08	5,99	1,11	7,31	3,22	10,52	0,10	0,65	6,88	0,76

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio.
HHg (escorrentía +Infiltración) (L/m ²)	2867,42	1194,63	1661,54	1907,86
HHg (agua lluvia de ingreso) (L/m ²)	2459,97	888,96	1144,06	1497,66
HHg etapa Levante (L/m ²)	407,45	305,67	517,48	410,20

Huella hídrica Etapa de levante



Determinación Huella Hídrica *Resultados Etapa de producción*



Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados

La etapa de Producción se monitoreó durante 733 días en la Estación Central Naranjal, durante 744 días en la Estación El Tambo y durante 730 días en la Estación El Rosario, para un promedio de 736 días (24,5 meses).

Coefficientes ecuaciones de calibración sondas de humedad

Estación	Profundidad	Da (g/cm ³)	Coeficientes de la ecuación de calibración			R ²
			A	B	C	
Naranjal	15 cm (24)	0,68	0,0622	3*10 ⁻⁴	-	0,981
	45 cm (24)	0,83	0,0933	2*10 ⁻⁴	-	0,985
El Tambo	15 cm (24)	0,65	0,0948	2*10 ⁻⁴	-	0,985
	45 cm (24)	0,65	0,0733	2*10 ⁻⁴	-	0,968
El Rosario	15 cm (25)	1,52	-0,0285	7*10 ⁻⁴	-2*10 ⁻⁷	0,962
	45 cm (25)	1,01	0,2263	4*10 ⁻⁴	-9*10 ⁻⁸	0,933

$$\text{Humedad} = A + B * (\text{datos sin procesar del sensor})^{(24)}$$

$$\text{Humedad} = A + (\text{datos sin procesar}) + (\text{datos sin procesar})^2 (25).$$

Resultados características físicas del suelo

Estación	Sonda	Da (g/cm ³)	Ccampo (%vol)	Pto marchitez (%vol)	Almacenamiento (%vol)
			0,33 Bares	15,00 Bares	
Naranjal	15 cm	0,80	55,40	54,00	1,40
	45 cm	0,90	56,30	53,50	2,80
El Tambo	15 cm	0,70	51,00	43,00	8,10
	45 cm	0,60	58,10	48,60	9,50
El Rosario	15 cm	0,80	53,10	51,10	2,00
	45 cm	0,90	57,30	52,40	4,90

Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados



Estación Central Naranjal. Promedio Parcela 1, 2, 3. Etapa de Producción							
Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Datos	DE	CV (%)	IC
Parámetros Suelo a 15 y 45 cm de profundidad							
Humedad a 15 cm (m ³ /m ³) Sin Corregir	0,405	0,450	0,344	161	0,03	6,89	0,00
Humedad a 15 cm (m ³ /m ³) Corregida	0,447	0,524	0,361	161	0,04	9,70	0,01
Temperatura a 15 cm (°C)	21,00	22,43	19,90	161	0,50	2,37	0,08
Conductividad a 15 cm (mS/cm)	3,141	22,827	0,000	161	7,59	241,65	1,17
Humedad a 45 cm (m ³ /m ³) Sin Corregir	0,413	0,480	0,317	161	0,04	10,00	0,01
Humedad a 45 cm (m ³ /m ³) Corregida	0,361	0,445	0,271	161	0,04	12,38	0,01
Temperatura a 45 cm (°C)	21,18	22,09	19,90	161	0,48	2,25	0,07
Conductividad a 45 cm (mS/cm)	0,035	0,155	0,010	161	0,04	108,70	0,01
Parámetros Climáticos							
Velocidad del viento (m/s)	1,18	1,60	0,60	161	0,19	15,96	0,03
Brillo Solar (horas)	6,39	9,90	0,40	161	2,65	41,53	0,41
Radiación (MJ/m ² -d)	18,51	24,60	9,40	161	3,95	21,36	0,61
Temperatura Mínima (°C)	16,20	18,40	11,90	161	1,41	8,68	0,22
Temperatura Máxima (°C)	29,93	32,70	25,70	161	1,35	4,53	0,21
Humedad Relativa (%)	71,82	84,00	59,00	161	5,46	7,60	0,84
ETo, ET y Kc							
ETo (mm/d)	3,99	5,10	2,36	161	0,70	17,59	10,81
ET (mm/d)	4,60	22,40	1,23	161	2,01	43,56	0,31
Kc	1,17	5,37	0,37	161	0,49	41,67	0,08

Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados



Coefficiente de cultivo en la etapa de producción del café de Colombia

Parcela	Parámetro Estadístico	Estación Experimental		
		Naranjal	El Rosario	El Tambo
Producción_1	Promedio	1,08	0,36	0,73
	Máximo	5,37	1,12	4,93
	Mínimo	0,37	0,05	0,06
	Datos	52	68	120
	DE	0,66	0,21	0,90
	CV	61,43	58,37	123,54
	IC	0,18	0,05	0,16
Producción_2	Promedio	1,23	0,66	0,65
	Máximo	2,26	5,02	4,70
	Mínimo	0,41	0,09	0,07
	Datos	55	39	91
	DE	0,38	1,01	0,71
	CV	30,86	153,93	110,15
	IC	0,10	0,32	0,15
Producción_3	Promedio	1,19	0,46	0,73
	Máximo	2,18	1,00	4,09
	Mínimo	0,59	0,12	0,11
	Datos	54	56	72
	DE	0,35	0,18	0,65
	CV	29,56	39,34	89,93
	IC	0,09	0,05	0,15
3 Parcelas	Promedio	1,17	0,47	0,70
	Máximo	5,37	5,02	4,93
	Mínimo	0,37	0,05	0,06
	Datos	161	163	283
	DE	0,49	0,54	0,79
	CV	41,67	115,53	112,01
	IC	0,08	0,08	0,09
Etapa Producción en las tres estaciones	Promedio	0,76		
	Máximo	5,37		
	Mínimo	0,05		
	Datos	607		
	DE	0,71		
	CV	92,58		
	IC	0,06		

Castaño y García, 2018, reportan un valor de Kc de $0,88 \pm 0,02$ para café (10000 árboles/ha) en la EE Paraguaicito.

Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados

$$Huella\ Hídrica\ verde_{Producción} \left(\frac{L}{m^2} \right) = ET \left(\frac{mm}{d} \right) * tiempo\ (d)$$

Parcela	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)	ET (mm/d)	Tiempo (d)	HHv (L/m ²)
1	4,25	733	3115,25	2,34	744	1740,96	1,36	730	992,80
2	4,84	733	3547,72	2,01	744	1495,44	2,64	730	1927,20
3	4,71	733	3452,43	2,18	744	1621,92	1,78	730	1299,40
Prom. Estación.	4,60	733	3371,80	2,19	744	1629,36	1,81	730	1321,30
Promedio General Etapa Producción (L/m²)					2107,49				



Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados

$$HH \text{ gris Producción} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}}$$



Volúmenes de agua de Escorrentía. Etapa Producción									
Lote	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Pluviosidad: 6899,60 mm Pluviosidad: 4924,95 mm Pluviosidad: 2863,03 mm								
	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)
1	117	317,43	2856,88	99	145,55	1309,95	105	215,55	1939,96
2	116	305,31	2747,78	93	161,12	1450,09	103	193,03	1737,29
3	118	302,51	2722,61	74	110,12	991,12	101	213,92	1925,26
Prm	117	308,42	2775,76	89	138,93	1250,39	103	207,50	1867,50
	% de la lluvia		4,47	% de la lluvia		2,82	% de la lluvia		7,25

Volúmenes de agua de Infiltración. Etapa Producción									
Lote	Estación Experimental								
	Naranjal			El Tambo			El Rosario		
	Eventos (L/m ²) (L) Eventos (L/m ²) (L) Eventos (L/m ²) (L)								
	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)	Eventos	(L/m ²)	(L)
1	0	0	0	0	0	0	115	34,82	313,34
2	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
3	0	0	0	0	0	0	134	37,32	335,87
Prm	0	0	0	0	0	0	83	24,04	216,40

Determinación Huella Hídrica. Etapa de producción. Resultados

$$HH \text{ gris Producción} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} + \frac{V_i * C_i}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}}$$

Caracterización. Drenados. Escorrentía. Etapa Producción. Promedio. 3 Estaciones.

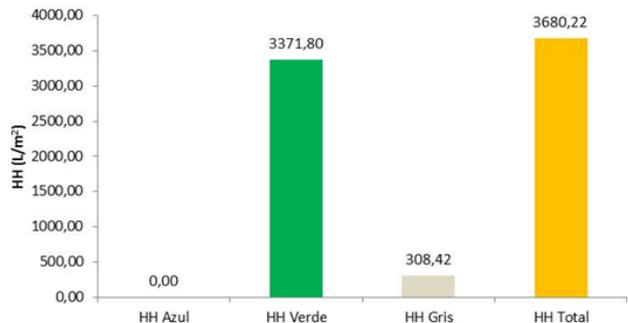
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (ppm)	SST (ppm)	ST (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	5,74	210	59	182	89	243	1,69	7,50	71,76	9,98
Máximo	8,75	397	881	678	306	1260	5,82	22,90	158,20	24,30
Mínimo	3,32	4	3	57	4	41	0,26	1,30	11,20	2,80
Datos	174	174	174	174	174	174	174	174	57	57
DE	0,96	76,86	80,12	87,20	51,80	155,26	1,16	4,03	34,76	4,88
CV	0,17	0,37	1,35	0,48	0,58	0,64	0,68	0,54	0,48	0,49
IC	0,14	11,42	11,90	12,96	7,70	23,07	0,17	0,60	9,03	1,27

Caracterización. Drenados. Infiltración. Etapa Producción. Promedio. 3 Estaciones.

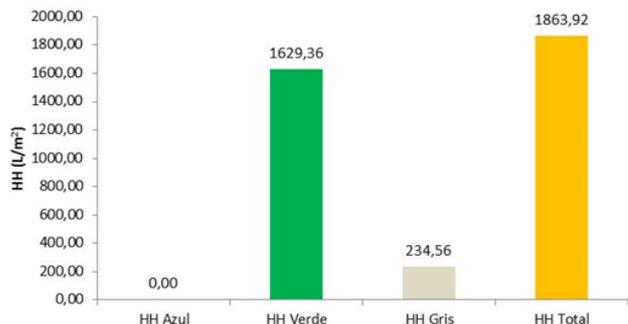
Parámetro	pH (un)	Redox (mV)	Turbidez (FTU)	DQO (ppm)	SST (ppm)	ST (ppm)	P-PO ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	N _T (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	5,82	209	5	81	23	93	0,96	4,73	48,28	8,04
Máximo	7,28	328	35	232	102	282	4,37	18,70	120,30	23,70
Mínimo	3,89	89	0	22	2	4	0,18	1,10	15,40	2,80
Datos	174	174	174	174	174	174	174	173	57	56
DE	0,74	45,83	5,57	44,43	22,49	41,50	0,70	3,33	19,20	5,05
CV	0,13	0,22	1,17	0,55	0,99	0,45	0,74	0,70	0,40	0,63
IC	0,11	6,81	0,83	6,60	3,34	6,17	0,10	0,50	4,98	1,32

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio.
HHg (escorrentía +Infiltración) (L/m ²)	2109,58	1000,31	1690,28	1600,06
HHg (agua lluvia de ingreso) (L/m ²)	1801,15	765,75	803,25	1123,39
HHg etapa Producción (L/m ²)	308,42	234,56	887,03	476,67

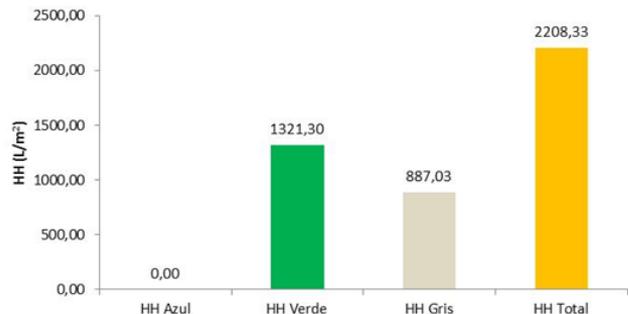
HH Etapa de Producción
Estación Central Naranjal



HH Etapa de Producción
Estación El Tambo

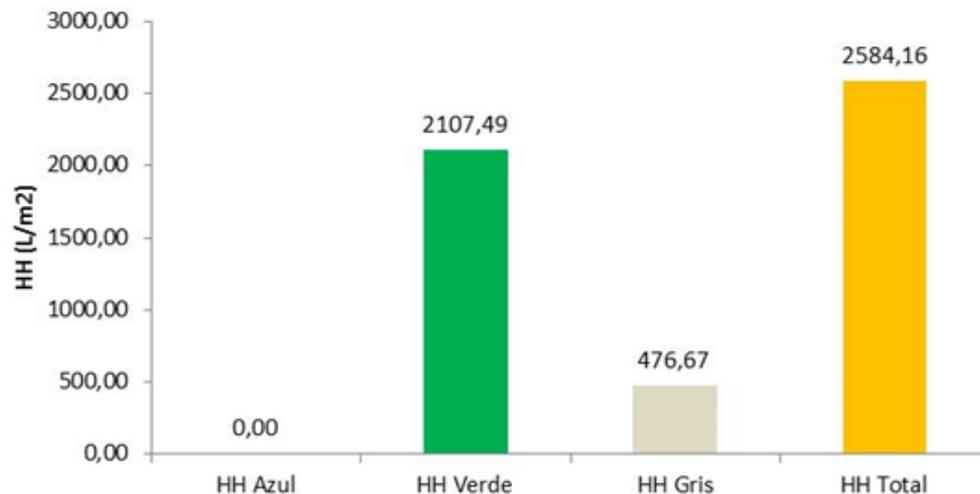


HH Etapa de Producción
Estación El Rosario



Huella hídrica Etapa producción

Valor medio HH
Etapa de Producción



Determinación Huella Hídrica

Etapa de beneficio



Determinación Huella Hídrica. Etapa de beneficio. Metodología



- Para los lotes en producción se realizó la cosecha del fruto y se cuantificó.
- Se cuantificó el volumen de agua utilizada en el proceso de beneficio del fruto y se realizó su respectiva caracterización.
- Se cuantificó el volumen de agua generada como vertimiento y se realizó su respectiva caracterización.
- La caracterización involucró los parámetros pH, Turbidez, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, P-PO₄, N-NO₃, N-NH₃ y N_T (Standard Methods, 1992).

Datos de producción de café

Año	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
Etapa Levante Año 1 (kg cps/árbol)	0,000	0,000	0,000	0,000
Etapa Levante Año 2 (kg cps/árbol)	0,192	0,045	0,084	0,107
Etapa Producción Año 3 (kg cps/árbol)	0,476	0,687	0,376	0,513
Etapa Producción Año 4 (kg cps/árbol)	0,366	0,441	0,483	0,430
Total producido ciclo 4 años. (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050



HH azul de la etapa de beneficio

Parámetro	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
Consumo promedio de agua (L/kg/cps)	5,00	1,10	8,00	4,70
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
Agua utilizada en el proceso (L)	5,17	1,29	7,54	4,94
Área ocupada por árbol (m ²)	1,0	1,0	1,0	1,0
HH azul (L/m ²)	5,17	1,29	7,54	4,94
HH azul (L/kg cps)	5,00	1,10	8,00	4,70

Determinación Huella Hídrica. Etapa de beneficio. Resultados

Volúmenes promedio de agua residual generada

Parámetro	Estación Experimental			Promedio
	Naranjal	Tambo	Rosario	
Agua residual generada (L/kg/cps)	5,61	0,61	8,61	4,94
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
Agua residual generada en el proceso (L)	5,80	0,72	8,12	5,19

Características de las ARPBHC tratadas

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranjal	Tambo	Rosario
pH (unidades)	6,76	6,63	6,20
Temperatura (°C)	21,05	20,50	23,25
DQO (ppm)	60	4620	400
SST (ppm)	< 6	690	72
Sólidos Sedimentables (mL/L)	< 0,1	<0,1	0,3
Grasas y Aceites (ppm)	< 10	< 10	<10

Características del agua utilizada en el beneficio del café

Parámetro	Estación Experimental		
	Naranjal	Tambo	Rosario
pH (unidades)	7,03	6,86	6,80
Turbidez(NTU)	4	4	3
SST (mg/L)	13	18	16
DQO (mg/L)	18	22	21
P-PO ₄ (mg/L)	0,49	0,39	0,63
N-NO ₃ (mg/L)	1,43	2,11	1,99



$$HH \text{ gris Beneficio} = \frac{V_e * C_e}{C_{m\acute{a}x}} - \frac{V_a * C_a}{C_{m\acute{a}x}}$$

Estación	Naranjal	El Tambo	El Rosario	Promedio.
HHg vertimientos (L)	13,92	132,77	129,91	92,20
HHg agua utilizada (L)	3,72	1,14	6,34	3,73
HHg etapa de beneficio (L)	10,20	131,64	123,57	88,47
HHg etapa Beneficio (L/m²)	10,20	131,64	123,57	88,47
Área ocupada por árbol (m ²)	1,0	1,0	1,0	1,0
Producción de café promedio (kg cps/árbol)	1,034	1,173	0,943	1,050
HHg etapa Beneficio (L/kg cps)	9,86	112,22	131,04	84,26



Determinación HH gris. Etapa de beneficio. Beneficio convencional



Beneficio convencional o tradicional del café. Es aquel en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte (del fruto hasta las tolvas de recibo, del café despulpado y del café lavado hasta las unidades de secado), con un consumo global cercano a los 40 litros de agua/kg de cps y en el cual no se realiza manejo a los subproductos obtenidos o su manejo es limitado (Rodríguez *et al.*, 2015).

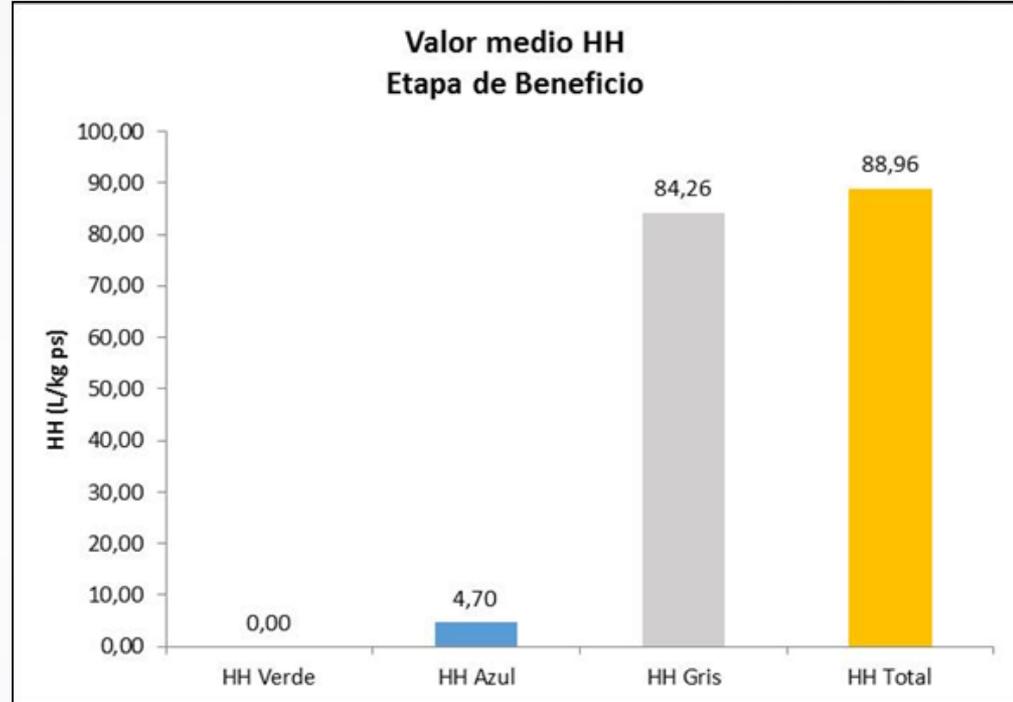
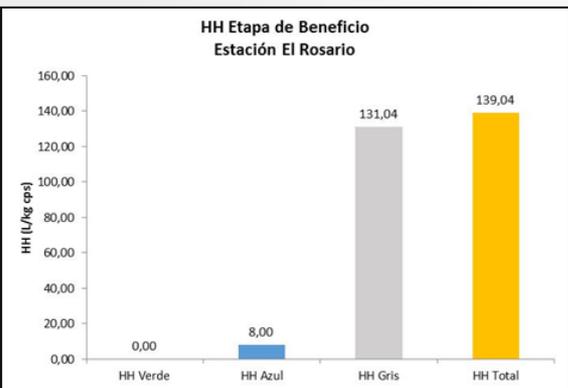
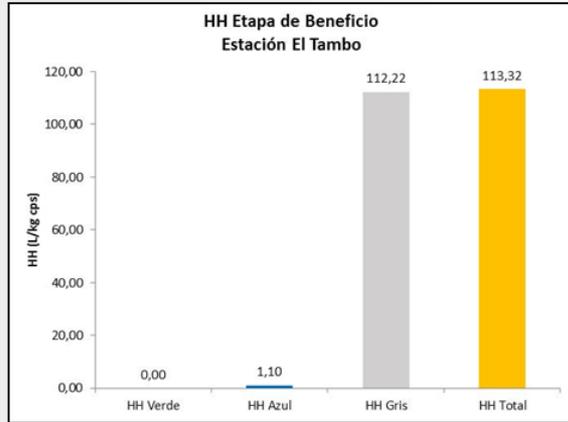
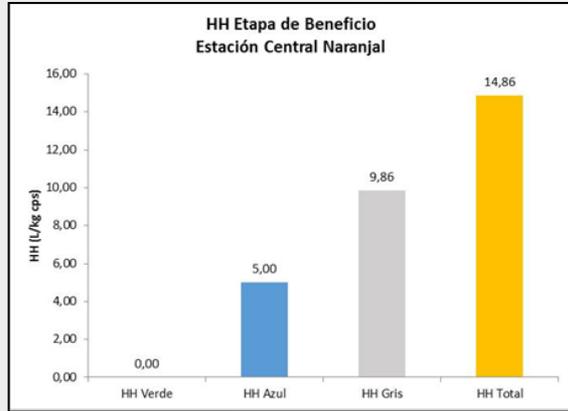
HH gris Beneficio convencional
7152 L/kg cps



HH gris Beneficio ecológico.
Naranjal 9,86 L/kg cps
725 veces menor



Huella hídrica Etapa beneficio



Determinación Huella Hídrica

Ciclo completo



Germinador



Almácigo



Manejo del cultivo



Cosecha



**Café
Pergamino Seco**



Poscosecha

Fuente: Rojas *et al.*, 2018

Determinación Huella Hídrica. Ciclo completo. Resultados

Etapa	HH Azul	HH verde	HH gris	HH total
Germinador	0,069 L/chapola	0,135 L/chapola	0,133 L/chapola	0,336 L/chapola
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Germinador (1)	0,042 L/kg cps	0,081 L/kg cps	0,080 L/kg cps	0,202 L/kg cps
Almácigo	5,39 L/colino	10,22 L/colino	3,48 L/colino	19,09 L/colino
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Almácigo (2)	3,24 L/kg cps	6,13 L/kg cps	2,09 L/kg cps	11,46 L/kg cps
Levante	0	1439,06 L/m ²	410,20 L/m ²	1849,26 L/m ²
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Levante (3)	0,00	863,78 L/kg cps	246,22 L/kg cps	1110,00 L/kg cps
Producción	0,00	3161,24 L/m ²	715,00 L/m ²	3876,24 L/m ²
Cosecha	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol	1,666 kg cps/árbol
Producción (4)	0,00	1897,50 L/kg cps	429,17 L/kg cps	2326,67 L/kg cps
Beneficio	4,70 L/kg cps	0,00	84,26 L/kg cps	88,96 L/kg cps
Total	7,98 L/kg cps	2767,49 L/kg cps	761,82 L/kg cps	3537,30 L/kg cps

(1) se dividió por 3857 semillas germinadas/kg de semilla para obtener el valor de la HH de una chapola que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,666 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(2) se dividió por 395 colinos obtenidos/bloque para obtener el valor de la HH de un colino que dio origen al árbol y se dividió por la producción del árbol (1,666 kg cps) para obtener la HH en función de 1 kg cps.

(3) se dividió por la producción del árbol (1,666 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.

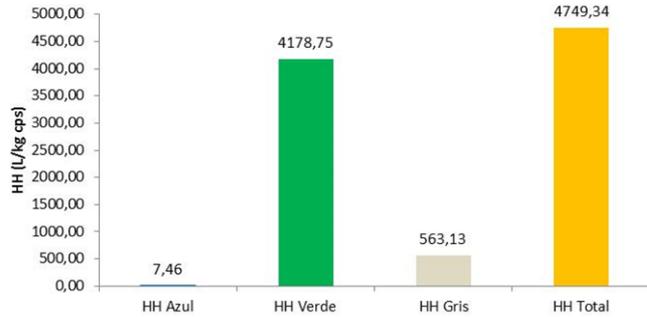
(4) se dividió por la producción del árbol (1,666 kg cps), que ocupaba 1 m², para obtener la HH en función de 1 kg cps.

Huella hídrica Ciclo completo

Valor Huella Hídrica Café de Colombia

Estación Central Naranjal

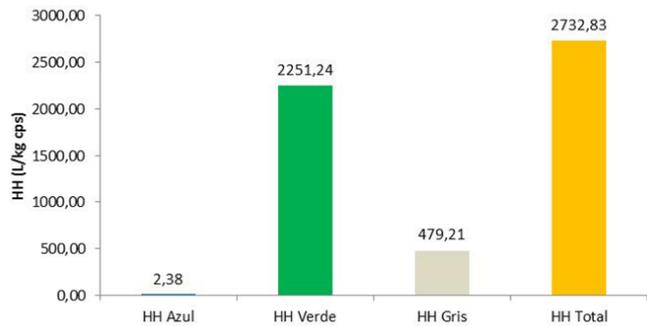
Ciclo completo de cultivo (germinador-producción): 6 años



Valor Huella Hídrica Café de Colombia

Estación El Tambo

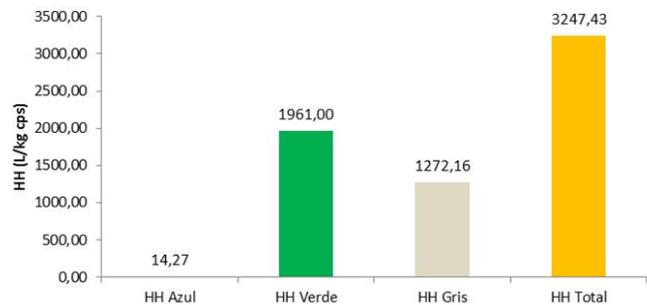
Ciclo completo de cultivo (germinador-producción): 6 años



Valor Huella Hídrica Café de Colombia

Estación El Rosario

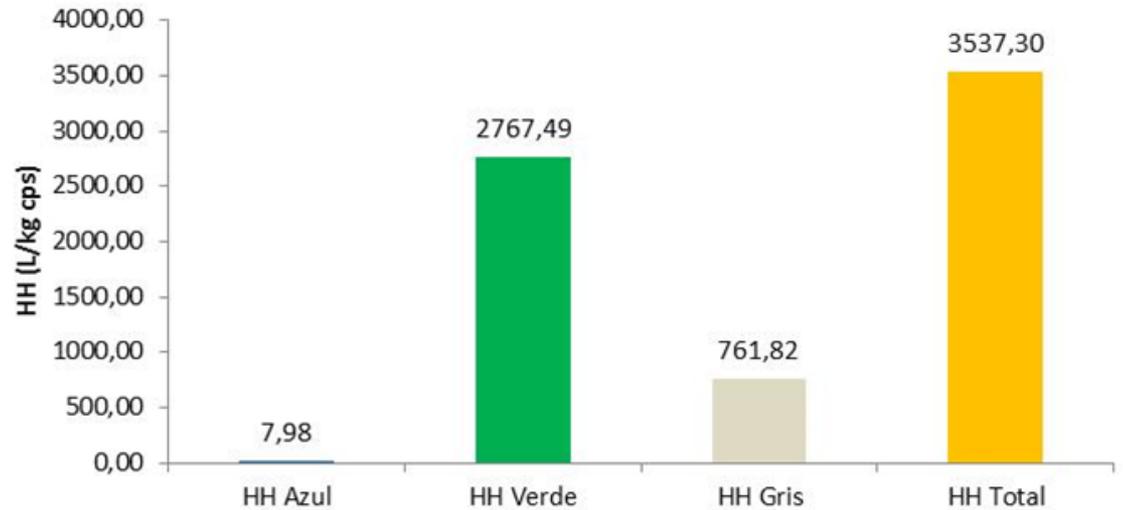
Ciclo completo de cultivo (germinador-producción) : 6 años



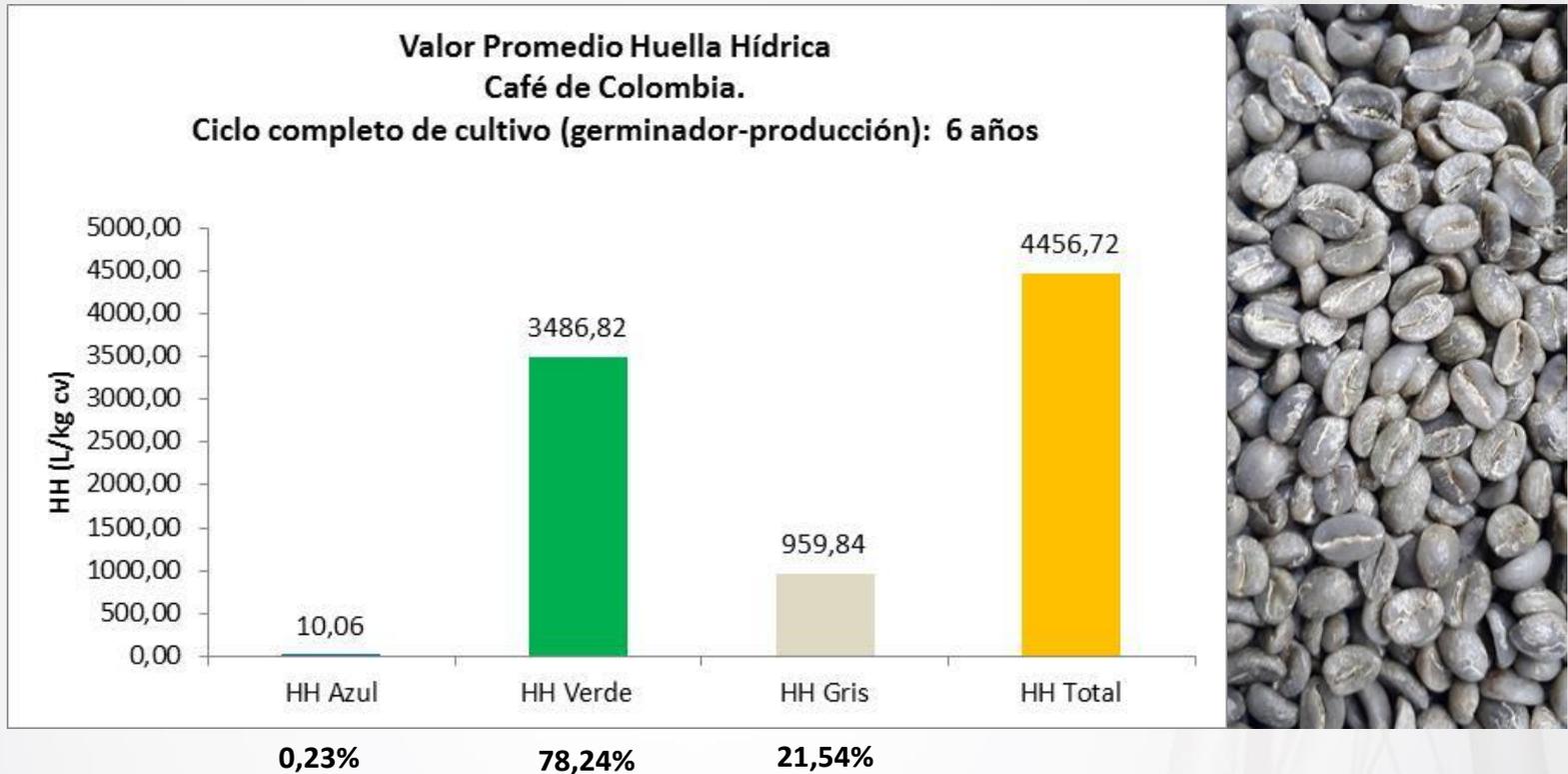
Valor Promedio Huella Hídrica

Café de Colombia.

Ciclo completo de cultivo (germinador-producción): 6 años



Huella hídrica Ciclo completo (cv)



HH verde m ³ /t cv	HH azul m ³ /t cv	HH gris m ³ /t cv	HH total m ³ /t cv	Referencia
13033	0	1533	14566	Adaptado de Mekonnen y Hoestra (2010).
-	-	-	11113	Arévalo <i>et al.</i> , 2012.
7460	0	147	7607	Builes, 2013.
25444	0	-	-	Adaptado de IDEAM, 2015.
4378,48	-	13,87	-	Adaptado de Barragán y Siachoque, 2017.
7973	20,28	-	-	Adaptado de Ariza y Arévalo, 2018
7973	13,61	133661	-	Adaptado de Mild Coffee Company Huila <i>et al.</i> , 2018.
12632	0,703	-	-	Adaptado de IDEAM, 2019.

Huella hídrica de una taza de café



Producir una tasa de café de 125 ml (7 g de café tostado y molido)

Bajas densidades de siembra
Beneficio convencional



140 L

Chapagain and Hoekstra, 2003



Producir una tasa de café de 125 ml (7 g de café tostado y molido)

Altas densidades de siembra
Beneficio Ecológico



37 L

(Reducción del 73,57%)

Síguenos



www.cenicafe.org



agroclima.cenicafe.org



@cenicafe



cenicafé

