



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

GERENCIA TÉCNICA - FNC

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ

Acuerdo de Subvención

IDRC - FNC - Cenicafé

Convenio N° 107400-007

**AUMENTANDO LA RESILIENCIA A EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS
EN EL SECTOR CAFETERO COLOMBIANO**

INFORME FINAL

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SUELO
EN EL CULTIVO DEL CAFÉ A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA
SUE101003**

Elaborado por

Luz Adriana Lince
Siavosh Sadeghian
Fabio Alexis Torres

**Disciplina
Suelos**

Cenicafé, 27 de febrero de 2018



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

TABLA DE CONTENIDO

1. Objetivo	3
2. Dimensión de Cenicafé	3
3. Equipo de trabajo	3
4. Resumen	3
5. Metodología	4
5.1 Vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo – IVDCNS	4
5.2 Vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes por lixiviación – IVPN	7
5.3 vulnerabilidad por pérdida de suelo - IVPS	10
5.3.1 vulnerabilidad por el uso actual del suelo - IVUS	10
5.3.2 valoración del índice de vulnerabilidad por erosión hídrica - IVEH	12
5.4 índice de vulnerabilidad del suelo en el cultivo de café a la variabilidad climática	14
6. Resultados	15
6.1 Vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo – IVDCNS	16
6.2 Vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes por lixiviación – IVPN	21
6.3 Vulnerabilidad por pérdida de suelo – IVPS	26



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

1. OBJETIVO

Evaluar la vulnerabilidad del suelo al efecto de la variabilidad climática en el cultivo de café.

2. DIMENSIÓN DE CENICAFÉ

Disciplina: Suelos

Eje estratégico: Sostenibilidad ambiental

3. EQUIPO DE TRABAJO

Investigadores

Luz Adriana Lince
Siavosh Sadeghian
Fabio Alexis Torres
Vanessa Catalina Díaz

Auxiliares

Wilder Andrés Gutiérrez
Stephania Rincón
Alejandro Molina

Informe elaborado por

Luz Adriana Lince
Siavosh Sadeghian
Fabio Alexis Torres

4. RESUMEN

La sostenibilidad de la caficultura depende del manejo eficiente de los recursos, siendo uno de los puntos más sensibles el suelo. La intensificación de agricultura, unida a las variaciones en el clima (principalmente en la lluvia), han sido factores determinantes en la pérdida y degradación del suelo en sus componentes físicos, químicos y biológicos. Y pese a la eminente preocupación, son reducidos los estudios en pro de mitigar los efectos del cambio climático en el ámbito de la caficultura nacional.

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad del suelo ante el cambio climático, en los municipios cafeteros de Santuario y Balboa en Risaralda y Salamina en Caldas, ya que se presume, ésta genera erosión y acelera la pérdida de nutrientes del suelo para el café.

Se estudiaron las condiciones actuales del suelo para conservar y perder nutrientes, al igual que el uso actual del suelo y sus implicaciones con la pérdida de suelo con la erosión hídrica. Al final, los parámetros estudiados se unieron mediante un índice de vulnerabilidad del suelo, que se empleó para medir el Índice general de exposición del cultivo a la variabilidad climática.



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

5. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en los municipios de Balboa y Santuario (Risaralda) y Salamina (Caldas), mediante la aplicación de índices con valores de peso y ponderaciones, asignados a partir del conocimiento de experto, tal como lo sugiere Fritzsche et al. (2014).

Para evaluar vulnerabilidad del suelo en el cultivo de café a la variabilidad climática (VSVC), se trabajaron tres índices, nombrados como: i) Índice de Vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo – IVDCNS, ii) Índice de vulnerabilidad de pérdida de nutrientes por lixiviación – IVPN y iii) Valoración del índice de vulnerabilidad por pérdida de suelo – IVPS, los cuales más adelante se describen en detalle.

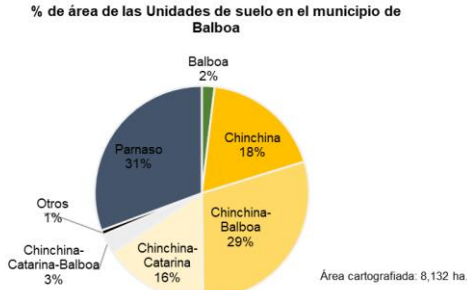
Como soporte para la toma de decisiones en la implementación de la metodología, se analizó cuidadosamente el mapa de Unidades Cartográficas de Suelo de cada municipio (Figura 1) y a cada predio cafetero seleccionado para el estudio, se le asignó la Unidad Cartográfica de Suelo correspondiente según el levantamiento de la FNC. Para lo anterior se empleó el software ArcGis, y los insumos, coordenadas geográficas de los predios y mapas digitales de las unidades cartográficas de suelos de la FNC a escala 1:100.000.

5.1 VULNERABILIDAD A LA DISPONIBILIDAD Y CONSERVACIÓN DE NUTRIENTES EN EL SUELO – IVDCNS

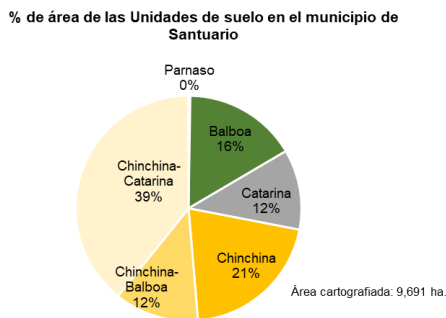
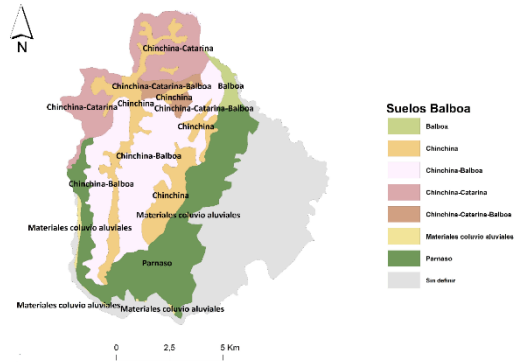
Para esta etapa, se tomó la información los mismos predios en los cuales se realizó la valoración de la estructura de los sistemas de producción, es decir en 438 predios cafeteros, seleccionados aleatoriamente (Balboa: 141; Salamina: 150; Santuario: 147). El tamaño de muestra (número de predios a evaluar), fue determinado para el parámetro proporción de predios cafeteros con exposición del cultivo a la variabilidad climática, con varianza máxima, un error de estimación del 6,4% y una probabilidad, de que ocurra dicho error, del 90%.

El muestreo de suelos se realizó en cada unidad de muestreo (un lote por predio), en ellos se tomaron 10 muestras simples de 0 a 20 cm de profundidad, mediante el uso de barreno. Estas muestras se mezclaron con el fin de conformar una muestra compuesta por unidad de muestreo (aproximadamente 1,0 kg), a la cual se le determinó las siguientes propiedades pH, materia orgánica, fósforo-P, potasio-K, calcio-Ca, magnesio-Mg, aluminio-Al y textura (contenido de arena-A, limo-L y arcilla-Ar).

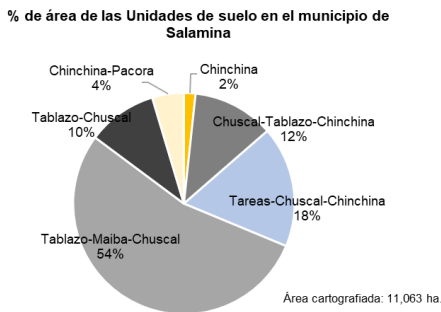
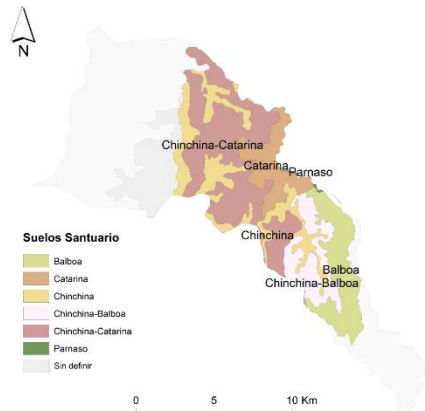
De los 438 predios cafeteros se seleccionaron aleatoriamente 133 para la caracterización física (Balboa: 36; Salamina: 39; Santuario: 58), esto porque la variabilidad de las propiedades físicas del suelo es menor que la química, y con un muestreo equivalente al 30% del de las propiedades químicas es suficiente para el análisis. En cada uno de los 133 predios se tomaron tres muestras simples con cilindro (5,0 cm de longitud y 4,8 cm de diámetro) a una profundidad de 10 cm para la determinación de la densidad aparente-DA, conductividad hidráulica y el contenido de humedad a 0,3 y 15 bares, además se realizó densidad real. En los mismos puntos se tomaron muestras disturbadas a 20 cm de profundidad (aproximadamente 1,0 kg) para la valoración de la densidad real-DR (Figura 2).



Balboa, Risaralda



Santuario, Risaralda



Salamina, Caldas

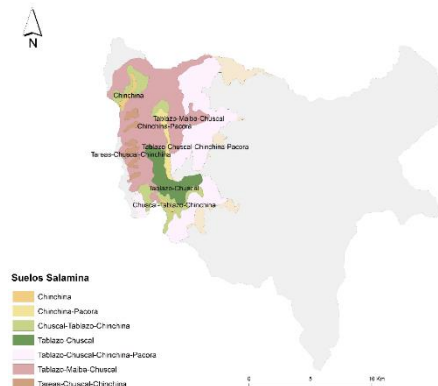


Figura 1. Mapas de unidades de suelos y distribución porcentual de las áreas cartografiadas.

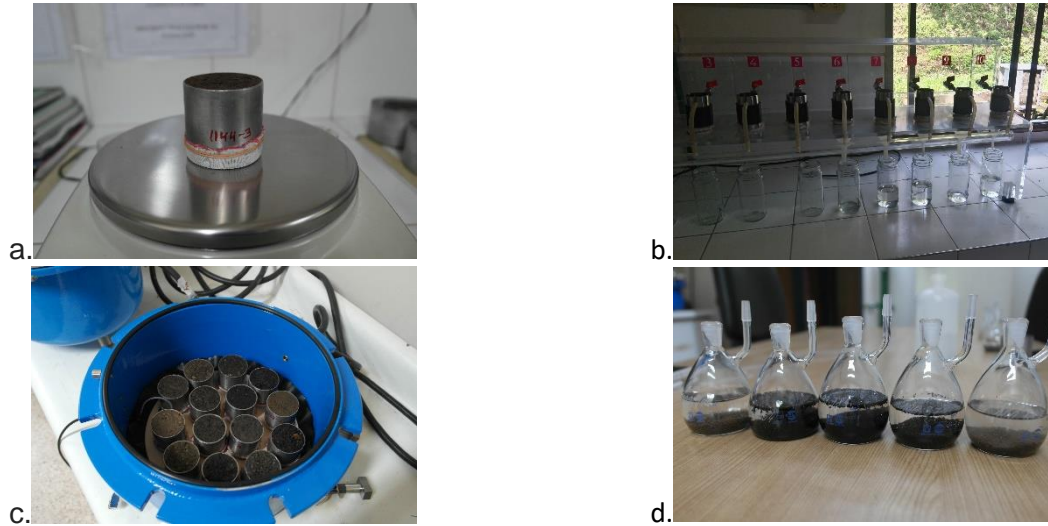


Figura 2. Análisis de propiedades físicas. a. Densidad aparente, b. Conductividad hidráulica, c. Retención de humedad, d. Densidad real.

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas físicas de los 133 predios, se generó un promedio por unidad de suelo en cada municipio, y dicho valor fue asignado a cada uno de los predios que no fueron analizados físicamente, teniendo en cuenta la unidad cartográfica de suelo que le fue asignada.

Los datos de contenido volumétrico de humedad a 0,33 y 15 bares, se emplearon para el cálculo de la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) para el cultivo de café a una profundidad de 20 cm.

Evaluación del índice

La evaluación del **IVDCNS** se realizó según los criterios descritos en la Tabla 1 y la siguiente estructura:

$$\text{IVDCNS} = (\text{CRA} * 0,55) + (\text{Acidez} * 0,4) + (\text{Fósforo} * 0,05)$$

Donde:

IVDCNS = índice de vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo

CRA = $(\text{LARA} * 0,50) + (\text{MO} * 0,25) + (\text{T} * 0,25)$;

Acidez y bases intercambiables = $(\text{pH} * 0,25) + (\text{Al} * 0,25) + (\text{K} * 0,25) + (\text{Mg} * 0,15) + (\text{Ca} * 0,10)$

Fósforo = $(\text{P} * 1,0)$

Los valores de las características que conforman el índice, son la calificación correspondiente a la determinación de las características.

Tabla 1. Criterios para evaluar el nivel de vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo.

CRITERIO A EVALUAR		NIVEL DE VULNERABILIDAD				
		Muy bajo 5	Bajo 4	Medio 3	Alto 2	Muy alto 1
Acidez y bases intercambiable	pH	≥5,5	≥5,0<5,5	≥4,5<5,0	≥4,0<4,5	<4,0
	Aluminio- Al	<0,5	≥0,5<1,0	≥1,0<1,5	≥1,5<2,0	≥2,0
	Calcio- Ca	≥4,5	≥3,0<4,5	≥1,5<3,0	≥0,75<1,5	<0,75
	Magnesio- Mg	≥1,2	≥0,9<1,2	≥0,6<0,9	≥0,3<0,6	<0,3
	Potasio- K	≥0,6	≥0,4<0,6	≥0,2<0,4	≥0,1<0,2	<0,1
Capacidad retención de agua-CRA	Lámina de agua rápidamente aprovechable- LARA	≥40	≥30<40	≥30<20	≥20<10	<10
	Materia orgánica- MO	≥16	≥12<16	≥8<12	≥4<8	<4
	Textura- T	F	FA, FAr, FArA, FL	AF	ArA, ArL, L	A, Ar,
Fósforo	Fósforo- P	≥30	≥20<30	≥10<20	≥5<10	<5

5.2 VULNERABILIDAD A LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES POR LIXIVIACIÓN – IVPN

Para cinco de las unidades cartográficas de suelo más representativas de los municipios objeto de estudio (Tabla 2) se determinó, a nivel de laboratorio, la lixiviación de fósforo, calcio, magnesio y potasio mediante el uso de cilindros de PVC (Figura 3).

En cada una de las unidades cartográficas de suelos ya mencionadas, se seleccionó un lote con un mínimo de 10 años sembrado con café. Allí, se tomaron sub muestras de 5 kg de suelo, en los primeros 30 cm del perfil del suelo, hasta completar 150 kg. El suelo correspondiente a cada localidad se llevó al laboratorio de la Disciplina Suelos de Cenicafé, donde se disgregó (rompimiento de terrones grandes) y homogeneizó. Posteriormente, se tamizó con mallas de 1 y 4 mm de abertura, con el fin de seleccionar aquella porción de suelo de un tamaño intermedio entre las aberturas citadas. La muestra de cada localidad se empacó en columnas de PVC con 10 cm de diámetro y 30 cm de longitud; posteriormente, se colocaron en una superficie nivelada y se humedecieron por capilaridad con agua desionizada hasta capacidad de campo. Después de 5 días, en la parte superior de las columnas se aplicaron los tratamientos descritos en la Tabla 3. Estos consistieron en diferentes combinaciones de enmiendas agrícolas y fertilizantes, y variaron según la reacción del suelo. Cuando el análisis del suelo indicó condiciones de acidez para café (pH<5,5) se evaluó el efecto de la dolomita y yeso agrícola (sulfato de calcio), aplicados superficialmente; así mismo, se valoró la dolomita incorporada sola y en combinación con KCl y Kieserita (sulfato de magnesio) suministrados en la superficie. Otros tratamientos fueron urea, DAP y sulfato de amonio (SAM).

Una vez aplicados los tratamientos se realizaron riegos semanales con durante 12 oportunidades (tres meses). El volumen de agua destilada fue de 360 mL por contenedor, el cual se fraccionó en seis aplicaciones de 60 mL cada 30 minutos.

El diseño estadístico fue completamente aleatorio y cada tratamiento contó con cuatro repeticiones.



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

Tabla 2. Unidades cartográficas de suelo seleccionadas para análisis de lixiviados de nutrientes.

Característica	Unidad cartográfica				
	Catarina	Chinchiná	Parnaso	Chinchiná	Tablazo
Ubicación del muestreo					
Departamento	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Risaralda	Caldas
Municipio	Santuario	Santuario	Balboa	Balboa	Salamina
Vereda	El Tambo	Alto Peñas Blancas	La Margarita	Cocohondo	La Divisa
Finca	El Guaico	Recuerdos	La Florida	Deyanira	Las Camelias
Material parental	Esquisto talcoso biotítico	Ceniza volcánica	Basalto hornbléndico biotítico	Ceniza volcánica	Esquisto talcoso
Taxonomía	Paralithic Udorthents 40%; Typic Eutrudepts 35%; Andic Eutrudepts 10%; otros 15%.	Typic Hapludands 80%; Andic Dystudepts 10%; otros 10%.	Typic Eutrudepts 75%; Paralithic Eutrudepts 15%; otros 10%.	Typic Hapludands 80%; Andic Dystudepts 10%; otros 10%.	Typic Eutropepts 50%; Typic Dystrandeps 35%; otros 15%
Propiedades fisicoquímicas					
Clase textural	Franco arcillosa	Franco arenosa	Franco arenosa	Franco arenosa	Arcillosa
pH	3,70	4,20	6,00	5,30	5,30
MO, %	5,20	16,80	6,80	10,80	5,40
Al, cmol _c .kg ⁻¹	1,90	2,00	----	0,27	0,90
Ca, cmol _c .kg ⁻¹	1,10	0,85	3,50	1,10	2,40
Mg, cmol _c .kg ⁻¹	0,43	0,30	1,20	0,24	0,72
K, cmol _c .kg ⁻¹	0,33	0,86	1,42	1,18	0,22
P, mg.kg ⁻¹	195,00	23,00	20,00	26,00	8,00
CICE, cmol _c .kg ⁻¹	3,80	4,00	6,70	5,60	4,30

Tabla 3. Dosis de fertilizantes y enmiendas empleados en la evaluación de lixiviación.

TTO	Forma de aplicación	Cantidad aplicada (g/tubo)						
		Dolomita	Yeso	KCl	Kieserita	Urea	SAM	DAP
1	Testigo para todos los suelos	0	0	0	0	0	0	0
2	Incorporada	12	0	0	0	0	0	0
3	Superficial	6	0	0	0	0	0	0
4	Superficial	0	6	0	0	0	0	0
5	Superficial	0	0	0	3,3	0	0	0
6	Superficial	0	0	6	0	0	0	0
7	Superficial	0	0	6	3,3	0	0	0
8	Incorporada/Superficial	12	0	6	3,3	0	0	0
9	Superficial	0	0	0	0	3	0	0
10	Superficial	0	0	0	0	0	0	2,6
11	Superficial	0	0	6	3,3	3	0	0
12	Superficial	0	0	0	0	0	6,57	0
13	Testigo #2 para Catarina	0	0	0	0	0	0	0



Figura 3. Procedimiento para la evaluación de lixiviación de bases. a. Preparación de la muestra de suelo, b. Montaje de suelo en los cilindros de PVC, c. aplicación de tratamientos, d. aplicación de agua, e. recolección del lixiviado, f. análisis del lixiviado.

Evaluación del índice

La evaluación del **IVNP** se realizó según los criterios descritos en la Tabla 4 y la siguiente estructura:

$$\text{IVNP} = (P * 0,1) + (K * 0,4) + (\text{Ca} * 0,2) + (\text{Mg} * 0,3)$$

Donde:

IVNP = índice de vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes en el suelo por lixiviación

P = nivel de pérdida de fósforo

K = nivel de pérdida de potasio

Ca = nivel de pérdida de calcio

Mg = nivel de pérdida de magnesio



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

Tabla 4. Criterios para evaluar la vulnerabilidad ante la pérdida de nutrientes en el suelo por lixiviación.

CRITERIO A EVALUAR	NIVEL DE VULNERABILIDAD				
	Muy bajo 5	Bajo 4	Medio 3	Alto 2	Muy alto 1
Pérdidas de P – P	<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40
Pérdidas de K – K	<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40
Pérdidas de Ca – Ca	<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40
Pérdidas de Mg – Mg	<10	≥10<20	≥20<30	≥30<40	≥40

Una vez se determinó el IVNP para las unidades de suelo, se le asignó a cada predio un valor correspondiente a su unidad de suelo.

5.3 VULNERABILIDAD POR PÉRDIDA DE SUELO - IVPS

Para evaluar la vulnerabilidad a la pérdida de suelo, se aplicaron dos metodologías, la primera, Valoración de la vulnerabilidad del uso actual del suelo – IVUS, que se fundamentó en la recolección de información en campo – y la segunda, vulnerabilidad a la erosión hídrica – IVEH, basada en la respuesta del suelo a la simulación de eventos lluviosos fuertes.

5.3.1 Vulnerabilidad por el uso actual del suelo - IVUS

Se aplicó una encuesta de 15 preguntas al administrador de 431 predios cafeteros, de los ya mencionados en las etapas anteriores, y las respuestas fueron verificadas por técnicos agrícolas en campo (encuestadores). A continuación, se describen las preguntas de la encuesta:

Relacionadas con el sistema agrícola

- ¿Qué % de área en la finca cuenta con sistema agroforestal con café?
- ¿Qué % de área en la finca presenta ganadería?
- ¿En cuánto % de área de la finca ha planificado el uso del suelo?

Relacionadas con el manejo del suelo

- ¿Qué % de área de la finca presenta coberturas vivas y/o muertas?
- ¿En qué % de área de los cultivos realiza manejo integrado de arvenses?
- ¿Qué % de área de la finca presenta siembras con labranza mínima?
- ¿Qué % de los taludes de la finca cuentan cobertura vegetal?

Relacionadas con la protección de fuentes hídricas y manejo de aguas

- ¿En qué % se encuentran protegidos los drenajes naturales la finca?
- ¿En qué % conserva la franja de protección en drenajes naturales?
- ¿En qué % maneja adecuadamente las aguas lluvias (captación, canalización y conducción)?
- ¿En qué % maneja adecuadamente las aguas domésticas y de beneficio (captación, canalización y conducción)?

Relacionadas con la erosión del suelo

- ¿Qué % de la finca presenta evidencias de erosión hídrica?
- ¿Qué % de la finca presenta evidencias de deslizamiento?



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

¿Qué % de posibles deslizamientos en su finca han recibido prácticas de estabilización preventivas?

Con la información obtenida a través de la encuesta, se obtuvo el índice de vulnerabilidad para uso de suelo (IVUS), de acuerdo con la calificación de la Tabla 5 y la siguiente estructura:

Tabla 5. Calificación de la vulnerabilidad para el uso actual del suelo.

CRITERIO A EVALUAR	NIVEL DE VULNERABILIDAD					
	Muy bajo 5	Bajo 4	Medio 3	Alto 2	Muy alto 1	
Sistema agrícola (% área en la finca)	Árboles de conservación y sombrío	>60	≤60>45	≤45>30	≤30>15	≤15
	Sin ganadería extensiva	>30	≤30>22	≤22>14	≤14>6	≤6
	Planificación para el uso del suelo	>60	≤60>43	≤43>26	≤26>10	≤10
Manejo del suelo (% área cultivo finca)	Presencia de coberturas vivas y/o muertas	>70	≤70>53	≤53>36	≤36>20	≤20
	Manejo integrado de arvenses - MIA	>60	≤60>43	≤43>26	≤26>10	≤10
	Siembra con labranza mínima	>50	≤50>37	≤37>23	≤23>10	≤10
	Protección de los taludes	>60	≤60>50	≤50>40	≤40>30	≤30
Protección de fuentes hídricas y manejo de aguas (% área en finca)	Protección de drenajes naturales	>60	≤60>47	≤47>33	≤33>20	≤20
	Conservación de la franja de protección en drenajes naturales	>70	≤70>57	≤57>43	≤43>30	≤30
	Manejo de agua lluvia (captación, canalización y conducción)	>80	≤80>63	≤63>46	≤46>30	≤30
	Manejo de agua doméstica y de beneficio (captación, canalización y conducción)	>80	≤80>63	≤63>46	≤46>30	≤30
	Revisión periódica de tanques para el almacenamiento de aguas, mangueras de conducción y cunetas	>80	≤80>63	≤63>46	≤46>30	≤30
Erosión del suelo (% área finca)	Evidencias de erosión	<5	≥5<10	≥10<15	≥15<20	≥20
	Evidencias de deslizamiento	<1	≥1<3	≥3<4	≥4<5	≥5
	Prevención de deslizamientos	>60	≤60>43	≤43>26	≤26>10	≤10

IVUS = (Erosión * 0,40) + (manejo del suelo * 0,3) + (protección de fuentes hídricas * 0,2) + (Sist. agrícola * 0,1)

Donde:

IVUS: Índice de vulnerabilidad por el uso actual del suelo

Erosión: (prevención de deslizamientos * 0,5) + (deslizamientos * 0,25) + (erosión * 0,25)



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

Manejo del suelo: (MIA * 0,4) + (coberturas en el suelo * 0,3) + (siembra con labranza mínima * 0,15) + (protección taludes * 0,15)

Protección de fuentes hídricas: (revisiones tanques, mangueras, canales * 0,3) + (manejo aguas lluvias * 0,2) + (manejo aguas domésticas y beneficio * 0,2) + (protección drenajes naturales * 0,15) + (franja de protección * 0,15)

Sistema agrícola: (Planificación uso suelo * 0,5) + (sistema forestal * 0,3) + (ganadería extensiva * 0,2)

5.3.2 Valoración del índice de vulnerabilidad por erosión hídrica - IVEH

La vulnerabilidad a la erosión hídrica se evaluó por medio del índice de erodabilidad (factor K), el cual se determinó en forma directa en condiciones de laboratorio. Para esto, se tomaron 42 muestras de suelo disturbado, en predios seleccionados aleatoriamente de los 438 mencionados en las dos primeras etapas. La muestra de suelo fue de aproximadamente 10 kg y estuvo conformada por la mezcla de 3 submuestras tomadas en el mismo lote a una profundidad entre 0 y 10 cm. Éstas se empacarán en bolsas plásticas y se llevarán al laboratorio de Cenicafé para ser secadas a la sombra y pasadas por tamiz No. 3/4 (abertura de orificio de 11,2 mm).

Las muestras se llevaron a bandejas de lámina galvanizada de 20 cm de ancho por 50 cm de longitud por 5 cm de altura, que fueron acondicionadas con un anjeo como soporte, una capa de 2 cm de fragmentos de roca tamaño grava y una tela tipo muselina como filtro, lo que permitió realizar una saturación de las muestras por capilaridad, durante 24 horas. Después de la saturación, los suelos se drenaron durante una hora y se colocaron en el simulador de lluvia con boquillas oscilatorias Veejet 80100, con la inclinación predominante de 45°, y una lluvia simulada promedio de 87 mm.h⁻¹. Posterior a la aplicación de la lluvia, se procedió a cuantificar la pérdida de suelo tanto por escorrentía, como por salpique y los datos obtenidos se llevaron a ton.ha⁻¹ (Figura 4).

Con la información obtenida de pérdida de suelo y con el valor de la intensidad de la lluvia, se determinó el factor de erodabilidad K de cada sitio, y se tomó el promedio por unidad de suelo, con el fin de tener un valor K por unidad.



Figura 4. Evaluación de la pérdida de suelo por lluvia simulada. a. Toma de la muestra en campo, b y c. preparación de las bandejas para simulación, d. saturación de la muestra de suelo, e. calibración de la intensidad de la lluvia en el simulador oscilatorio, f. ubicación de la bandeja con una inclinación de pendiente máxima, g. recolección de agua de escorrentía y sedimentos, h, i. recolección de sedimentos en la lengüeta.

El IVEH, se obtuvo de la clasificación del factor K según la Tabla 6, la cual está basada en las recomendaciones de Rivera y Gómez (1991).



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

Tabla 6. Calificación del índice de vulnerabilidad por erosión hídrica – IVEH.

CRITERIO A EVALUAR		NIVEL DE VULNERABILIDAD				
		Muy bajo 5	Bajo 4	Medio 3	Alto 2	Muy alto 1
Pérdida de suelo por erosión hídrica	Erodabilidad del suelo - K	≤0,02	>0,02≤0,04	>0,04≤0,06	>0,06≤0,08	>0,08≤0,10

Una vez se determinó el IVEH para las unidades de suelo, se le asignó a cada predio el valor correspondiente a su unidad de suelo.

Además del factor K, por cada punto de muestreo se realizó la evaluación de estabilidad de agregados al agua (EAH), por el método de Yoder (Figura 5) y se buscó explicar el factor K en términos de ésta última y las propiedades contenido de arenas, limos, arcillas y materia orgánica. Además, se buscaron relaciones entre el factor K y densidad aparente, densidad real y conductividad hidráulica, previamente medidas.

El indicador de vulnerabilidad a pérdida de suelo IVPS, se obtuvo por medio de la siguiente estructura:

$$IVPS = (IVUS*0,9) + (IVEH* 0,1)$$

Donde:

IVPS: Índice de vulnerabilidad por pérdida de suelo

IVUS: Índice de vulnerabilidad por el uso actual del suelo

IVEH: índice de vulnerabilidad por erosión hídrica- Erodabilidad

5.4 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL SUELO EN EL CULTIVO DE CAFÉ A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Finalmente, la vulnerabilidad del suelo a la variabilidad climática(VSVC), para cada uno de los 438 predios seleccionados, se calculó mediante la siguiente estructura:

$$VSVC= (IVDCNS * 0,4) + (IVPL* 0,2) + (IVPS* 0,4).$$

Donde:

VSVC: vulnerabilidad del suelo a la variabilidad climática

IVDCNS: índice de vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo

IVPL: índice de vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes en el suelo por lixiviación

IVPS: Índice de vulnerabilidad por pérdida de suelo

La clasificación del índice de vulnerabilidad según los rangos asignados fue la siguiente: Vulnerabilidad muy baja para valores $\geq 4,25$; baja $\geq 3,25 < 4,25$; media $\geq 2,25 < 3,25$; alta $\geq 1,25 < 2,25$; y finalmente muy alta $< 1,25$.

6. RESULTADOS

La vulnerabilidad del suelo en el cultivo de café a la variabilidad climática, en los municipios de Balboa y Salamina, en su mayoría es baja, mientras que en Santuario es media (Figura 5); lo que hace necesario, que, en los tres municipios, el caficultor realice prácticas que tiendan a mejorar la resiliencia y a disminuir la vulnerabilidad del suelo al cambio climático.

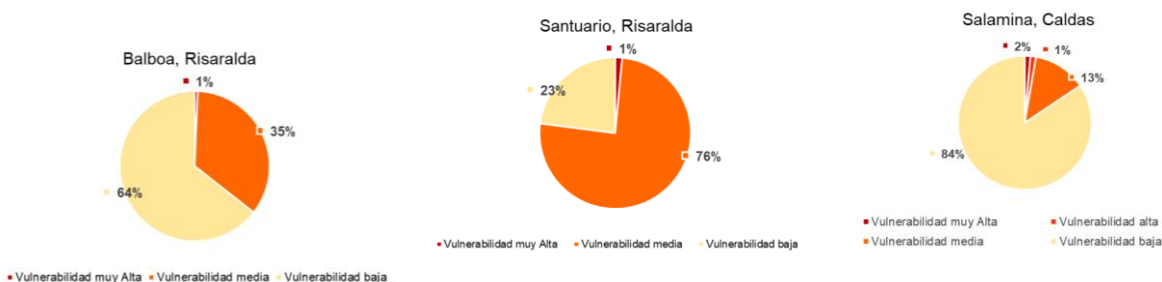


Figura 5. Distribución porcentual del nivel de vulnerabilidad del suelo para los municipios de interés.

En la Tabla 7 se muestra la influencia de cada uno de los criterios evaluados en el índice de vulnerabilidad final, y más adelante se describen en detalle cada uno de éstos y las respectivas recomendaciones de acciones preventivas y correctivas para aumentar la resiliencia y mitigar la acción del clima en el suelo.

Tabla 7. Valores promedio y clasificación de los indicadores de vulnerabilidad del suelo a la variabilidad climática en los municipios objeto de estudio.

INDICADOR	Risaralda		Caldas	
	Balboa	Santuario	Salamina	
IVDCNS - Vulnerabilidad a la disponibilidad y conservación de nutrientes en el suelo	Promedio IVDCNS	2,87	2,88	2,90
		Medio	Medio	Medio
	• Acidez y bases intercambiables	3,91	3,43	3,87
	• Capacidad retención de agua	2,08	2,41	2,09
	• Fósforo	3,24	3,71	3,99
IVPN - Vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes por lixiviación	Promedio IVPN	4,33	3,57	4,74
	• Pérdidas de P	5,0	5,0	5,0
	• Pérdidas de K	3,83	2,70	4,58
	• Pérdidas de Ca	5,0	5,0	5,0
	• Pérdidas de Mg	4,32	3,30	4,68
IVPS - Vulnerabilidad por pérdida de suelo	Promedio IVPS	3,32	3,13	3,49
	• IVUS - Uso actual del suelo	3,13	2,92	3,32
	• IVEH - Erodabilidad	5,0	5,0	5,0
	IVSVC – Índice de vulnerabilidad del suelo a la variabilidad climática	3,33	3,09	3,45
	Bajo	Media	Bajo	

**IDRC | CRDI**International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

6.1 VULNERABILIDAD A LA DISPONIBILIDAD Y CONSERVACIÓN DE NUTRIENTES EN EL SUELO – IVDCNS

En cada uno de los municipios y para todas las propiedades analizadas se presentó una alta variabilidad; en este sentido, el fósforo (P), aluminio (Al^{3+}) y potasio (K^+) se caracterizaron por un mayor coeficiente de variación, seguido por calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}); entre tanto, el pH y los contenidos de arena (A) y limos (L) fueron las propiedades menos variables. Lo anterior sugiere que pese a las tendencias que pueda presentar la fertilidad del suelo en una región, siempre existen valores contrastantes.

Las texturas francas predominaron en los tres municipios, siendo la clasificación media de Balboa Franco Arcillo Arenosa, Salamina Franca y Santuario Franco Arenosa. En Santuario fueron más altos los contenidos de la materia orgánica; entre tanto, esta localidad exhibió una mayor acidez (menor pH y Al más alto); resultado que se reflejó en menores contenidos de Ca y Mg, así como una Capacidad de intercambio Catiónico Efectiva-CICE ($Ca+Mg+K+Al$) más baja; pese a lo anterior, los niveles de las bases intercambiables (Ca, Mg y K) fueron relativamente altos. El fósforo se caracterizó por ser alto en los tres municipios, con valores más elevados en Salamina. En cuanto al azufre (S), los suelos de Balboa y Santuario presentaron tenores altos de este elemento y Salamina medios (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y granulométricas del suelo en los municipios evaluados.

Estadístico	A	L	Ar	pH	MO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	S
	----- (%)-----				%		----- $cmol.c.kg^{-1}$ -----				$mg.kg^{-1}$	
----- Municipio de Balboa (n=148) -----												
Promedio	49,6	26,1	24,3	4,9	6,0	0,8	4,1	1,5	0,7	7,0	58,2	10,1
Mínimo	26,0	14,0	1,0	3,9	2,5	0,0	0,9	0,2	0,1	3,4	3,0	3,0
Máximo	78,0	38,0	46,0	6,2	13,4	3,1	11,2	4,0	2,8	16,0	454,0	49,0
Mediana	48,0	26,0	27	5,0	5,4	0,6	3,9	1,4	0,54	6,75	12,0	8,0
Des. Estándar	12,2	5,2	10,9	0,4	2,4	0,7	1,8	0,6	0,5	1,9	93,7	7,4
CV (%)	24,6	20,0	45,0	7,7	39,4	83,8	43,1	41,0	73,2	27,5	160,9	73,5
----- Municipio de Salamina (n=144) -----												
Promedio	47,7	29,4	22,9	5,1	5,9	0,8	5,4	1,8	0,6	8,4	121,5	6,3
Mínimo	22,0	18,0	6,0	4,1	2,2	0,1	0,7	0,3	0,1	3,3	4,0	3,0
Máximo	72,0	38,0	46,0	6,5	13,0	2,7	16,2	7,5	3,2	20,0	517,0	45,0
Mediana	46,0	30,0	22,0	5,1	5,6	0,6	4,8	1,7	0,5	7,9	41,0	5,0
Des. Estándar	8,4	4,4	7,8	0,5	2,0	0,6	3,2	0,9	0,4	3,4	131,9	5,2
CV (%)	17,6	14,9	34,1	9,7	33,2	82,4	59,4	52,3	72,8	40,0	108,5	81,4
----- Municipio de Santuario (n=140) -----												
Promedio	54,5	26,9	18,7	4,7	9,1	1,1	2,9	1,1	0,6	5,7	68,8	14,9
Mínimo	24,0	12,0	2,0	3,7	3,1	0,2	0,5	0,2	0,1	1,4	3,0	4,0
Máximo	72,0	40,0	44,0	5,6	18,0	3,3	11,6	9,8	1,4	21,9	319,0	121,0
Mediana	54,0	26	18	4,7	8,3	1,0	2,5	0,99	0,54	5,6	27,5	11,5
Des. Estándar	9,8	4,7	10,1	0,4	4,1	0,7	1,9	1,0	0,3	2,5	82,5	12,5
CV (%)	18,0	17,3	54,1	7,6	45,6	62,1	66,5	85,3	49,2	43,6	119,9	84,3

Con base en lo anterior, y basándose en las tendencias generales observadas, se puede señalar a la acidez y la baja capacidad de almacenamiento de las bases intercambiables como los posibles problemas potenciales en los suelos de Santuario; situación que sugiere una mayor vulnerabilidad al exceso hídrico que los otros dos municipios. En contraste a lo anterior, en Balboa y Salamina el punto de atención es el bajo contenido de la materia orgánica, propiedad que afecta la disponibilidad de nutrientes –

principalmente el nitrógeno–, la porosidad del suelo y su capacidad de retención de agua, haciéndolos más vulnerable al déficit hídrico (Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros estadísticos de las densidades real y aparente, y retención de agua a 0,33 y 15 bares, Correspondientes a los suelos en los municipios estudiados.

Estadístico	Densidad aparente ----- (g.cm ⁻³) -----	Densidad real -----	Retención de agua a 15 bar ----- (Mpa) -----	Retención de agua a 0,33 bar -----
----- Municipio de Balboa (n=36) -----				
Promedio	1,11	2,44	36,85	41,13
Mínimo	0,68	2,19	5,21	8,76
Máximo	1,73	2,58	67,16	72,94
Des. Estándar	0,26	0,10	15,49	17,43
----- Municipio de Salamina (n=39) -----				
Promedio	1,22	2,50	34,07	36,55
Mínimo	0,96	2,29	13,90	16,25
Máximo	1,53	2,79	51,81	56,02
Des. Estándar	0,17	0,10	8,45	8,94
----- Municipio de Santuario (n=53) -----				
Promedio	1,02	2,40	42,07	47,21
Mínimo	0,56	2,14	13,01	14,96
Máximo	1,53	2,60	74,74	85,35
Des. Estándar	0,30	0,13	18,91	21,78

Para municipio de Balboa se detectaron las siguientes diferencias entre las unidades del suelo: las unidades Parnaso y Chinchiná-Catarina-Balboa presentaron mayor contenido de arcilla y menores contenidos de arena, materia orgánica y azufre que las unidades Chinchiná, Chinchiná-Balboa y Chinchiná-Catarina (Tabla 10). Quizá la mayor vulnerabilidad por el cambio climático ocurre en la unidad Paranaso, donde la capacidad para retener agua es baja; además, se espera que por su textura arcillosa se genere más escorrentía (Tabla 11).

Tabla 10. Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y granulométricas del suelo en las unidades cartográficas del municipio de Balboa.

Estadístico	A	L	Ar	pH	MO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	S
	----- (%) -----				(%)		----- (cmolc.kg ⁻¹) -----				(mg.kg ⁻¹)	
----- Unidad Chinchiná (n=22) -----												
Promedio	51,8	25,9	21,6	5,1	6,5	0,6	4,5	1,6	0,6	7,4	47,2	11,3
Mínimo	32,0	14,0	1,0	4,2	3,4	0,0	0,9	0,3	0,1	4,3	4,0	3,0
Máximo	78,0	34,0	42,0	5,8	13,4	2,1	11,0	3,9	1,7	15,7	235,0	31,0
Des. Estándar	13,7	5,6	12,6	0,4	2,9	0,6	2,2	0,8	0,4	2,5	72,2	8,0
----- Unidad Chinchiná-Balboa (n=61) -----												
Promedio	50,2	25,3	24,5	4,9	6,1	0,9	3,7	1,3	0,8	6,7	59,6	10,3
Mínimo	26,0	14,0	4,0	3,9	3,2	0,0	1,0	0,5	0,1	3,4	4,0	3,0
Máximo	74,0	38,0	46,0	5,6	13,2	2,3	6,5	2,8	2,8	12,0	413,0	49,0
Des. Estándar	12,4	5,6	10,5	0,3	2,4	0,6	1,3	0,4	0,6	1,5	96,9	8,0
----- Unidad Chinchiná-Catarina (n=33) -----												
Promedio	53,0	26,0	21,0	5,0	6,6	0,7	4,2	1,4	0,6	7,0	63,9	10,2
Mínimo	34,0	14,0	2,0	3,9	2,5	0,0	1,1	0,2	0,1	4,0	4,0	3,0
Máximo	72,0	34,0	36,0	5,6	10,8	3,1	9,1	2,8	2,0	12,6	454,0	34,0
Des. Estándar	11,2	4,3	10,7	0,4	2,3	0,8	1,8	0,6	0,4	1,9	100,3	7,0
----- Unidad Chinchiná-Catarina-Balboa (n=6) -----												
Promedio	45,0	27,0	28,0	4,9	4,9	1,2	3,8	1,3	0,8	6,9	41,5	8,2
Mínimo	36,0	20,0	16,0	4,3	3,0	0,7	2,6	1,1	0,4	5,4	7,0	5,0
Máximo	52,0	32,0	42,0	5,7	7,2	1,8	6,4	1,7	1,2	9,2	209,0	17,0
Des. Estándar	7,2	5,2	9,7	0,5	1,6	0,4	1,3	0,2	0,3	1,4	82,1	4,8
----- Unidad Parnaso (n=26) -----												
Promedio	43,0	27,8	29,2	4,9	4,8	0,6	4,5	1,7	0,7	7,6	61,1	8,6
Mínimo	32,0	20,0	8,0	4,2	3,1	0,0	1,6	0,6	0,2	4,1	3,0	3,0
Máximo	66,0	38,0	42,0	6,2	11,0	2,0	11,2	4,0	2,1	16,0	420,0	32,0
Des. Estándar	10,4	4,8	9,4	0,4	1,7	0,6	2,1	0,7	0,5	2,3	101,2	6,5

Tabla 11. Parámetros estadísticos de las densidades real y aparente, y retención de agua a 0,33 y 15 bares, correspondientes a las unidades del suelo en el municipio de Balboa.

Estadístico	Densidad aparente	Densidad real	Retención de agua a 1,5 Mpa	Retención de agua a 0,033 Mpa
	----- (g.cm ⁻³) -----		----- (Mpa) -----	
----- Unidad Chinchiná (n=6) -----				
Promedio	1,1	2,5	36,5	41,6
Mínimo	0,8	2,4	13,3	15,7
Máximo	1,5	2,6	54,0	72,0
Des. Estándar	0,3	0,1	15,0	20,1
----- Unidad Chinchiná-Balboa (n=12) -----				
Promedio	1,0	2,4	42,5	47,5
Mínimo	0,7	2,2	11,3	13,9
Máximo	1,4	2,5	67,2	72,9
Des. Estándar	0,3	0,1	17,4	19,4
----- Unidad Chinchiná-Catarina (n=11) -----				
Promedio	1,1	2,4	38,7	42,4
Mínimo	0,8	2,3	23,9	28,3
Máximo	1,4	2,6	54,0	59,7
Des. Estándar	0,2	0,1	10,7	12,0
----- Unidad Chinchiná-Catarina-Balboa (n=1) -----				
Promedio	1,2	2,5	34,3	37,5
----- Unidad Parnaso (n=6) -----				
Promedio	1,3	2,5	22,9	26,2
Mínimo	0,9	2,4	5,2	8,8
Máximo	1,7	2,6	46,3	50,9
Des. Estándar	0,3	0,1	15,5	15,3

Para el municipio de Salamina las mayores diferencias se detectaron para pH y CICE; en este sentido, las unidades Unidad Tablazo-Maiba-Chuscal y Unidad Tareas-Chuscal-Chinchiná presentaron los valores más altos de estas dos propiedades, en particular con respecto a la unidad Tablazo-Chuscal-Chinchiná-Pacora (Tablas 12 y 13). La unidad Tablazo-Chuscal sería la más vulnerable ante un escenario de déficit hídrico (por presentar menor contenido de materia orgánica y retención de humedad) y la unidad Tablazo-Chuscal-Chinchiná-Pacora la más vulnerable al exceso de lluvia por su mayor acidez y menor capacidad para retener las bases intercambiables.

Para el municipio de Santuario, las unidades Catarina y Chinchiná-Balboa exhibieron los menores porcentajes de arena y mayores porcentajes de arcilla. En las unidades Chinchiná y NN son más altos los contenidos de la MO; además, la unidad NN mostró ser menos rico en bases intercambiables, CICE y fósforo (Tablas 14 y 15). Por lo anterior, frente a una condición de exceso de lluvia, las unidades Chinchiná y NN podrían ser más vulnerables a las pérdidas de nutrientes. Las Unidades Catarina y Chinchiná-Balboa se caracterizan por baja capacidad para retener agua y, en razón de ello, los más susceptibles a la falta de éste.

Tabla 12. Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y granulométricas del suelo en las unidades cartográficas del municipio de Salamina.

Estadístico	A	L	Ar	pH	MO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	S
	----- (%)-----				(%)	----- (cmol.c.kg ⁻¹)-----						(mg.kg ⁻¹)
----- Unidad Chuscal-Tablazo-Chinchiná (n=20) -----												
Promedio	49,3	28,1	22,6	5,1	6,2	0,7	6,3	1,8	0,6	9,3	133,3	5,3
Mínimo	34,0	18,0	10,0	4,4	3,6	0,1	1,5	0,5	0,1	4,6	4,0	3,0
Máximo	58,0	38,0	34,0	5,9	10,2	1,8	13,1	3,8	1,4	17,1	496,0	11,0
Des. Estándar	5,4	6,0	7,7	0,4	2,0	0,6	3,4	0,8	0,4	3,4	163,5	2,4
----- Unidad Tablazo-Chuscal (n=15) -----												
Promedio	44,4	30,5	25,1	5,0	4,9	0,5	5,5	1,7	0,4	8,0	86,1	5,1
Mínimo	32,0	24,0	16,0	4,3	3,6	0,1	1,8	0,6	0,1	4,5	7,0	3,0
Máximo	54,0	38,0	42,0	5,7	7,2	1,4	8,4	3,0	1,4	10,8	305,0	14,0
Des. Estándar	5,1	4,6	6,3	0,4	1,0	0,5	1,9	0,6	0,3	1,7	92,6	2,6
----- Unidad Tablazo-Chuscal-Chinchiná-Pacora (n=44) -----												
Promedio	46,7	29,7	23,6	4,9	5,8	1,0	3,2	1,2	0,8	6,1	96,4	7,2
Mínimo	22,0	24,0	10,0	4,3	2,2	0,2	0,7	0,3	0,1	3,3	4,0	3,0
Máximo	64,0	38,0	46,0	5,7	12,7	2,7	8,5	2,5	3,2	11,2	441,0	35,0
Des. Estándar	9,6	4,0	8,5	0,4	2,0	0,6	1,6	0,5	0,5	1,6	119,3	5,3
----- Unidad Tablazo-Maiba-Chuscal (n=58) -----												
Promedio	49,0	29,2	21,8	5,3	6,1	0,7	6,7	2,2	0,5	9,8	139,0	6,4
Mínimo	30,0	18,0	6,0	4,1	2,3	0,1	1,6	0,5	0,1	4,9	4,0	3,0
Máximo	72,0	38,0	38,0	6,5	13,0	2,4	16,2	7,5	1,6	20,0	517,0	45,0
Des. Estándar	8,7	4,1	7,3	0,5	2,1	0,7	3,6	1,1	0,4	3,8	133,4	6,3
----- Unidad Tareas-Chuscal-Chinchiná (n=5) -----												
Promedio	50,4	31,6	18,0	5,5	6,3	0,3	7,8	2,2	0,7	10,9	132,0	6,4
Mínimo	42,0	30,0	8,0	5,1	4,4	0,1	5,1	1,4	0,3	8,3	18,0	4,0
Máximo	60,0	34,0	26,0	6,5	8,3	0,5	10,3	2,7	1,2	13,5	293,0	10,0
Des. Estándar	7,4	1,7	6,8	0,6	1,4	0,2	2,1	0,7	0,5	2,1	142,2	2,5

No se incluyeron las unidades que sólo tenían una repetición.

Tabla 13. Parámetros estadísticos de las densidades real y aparente, y retención de agua a 0,33 y 15 bares, Correspondientes a las unidades del suelo en el municipio de Salamina.

Estadístico	Densidad aparente	Densidad real	Retención de agua a 1,5 Mpa	Retención de agua a 0,033 Mpa
	----- (g.cm ⁻³)-----		----- (Mpa)-----	
----- Unidad Chuscal-Tablazo-Chinchiná (n=4) -----				
Promedio	1,2	2,4	33,5	35,6
Mínimo	1,1	2,3	22,6	24,9
Máximo	1,4	2,5	42,4	44,5
Des. Estándar	0,2	0,1	9,7	9,6
----- Unidad Tablazo-Chuzcal (n=3) -----				
Promedio	1,3	2,6	32,1	33,5
Mínimo	1,2	2,5	27,7	28,4
Máximo	1,4	2,6	34,4	36,5
Des. Estándar	0,1	0,1	3,8	4,5
----- Unidad Tablazo-Chuzcal-Chinchiná-Pacora (n=15) -----				
Promedio	1,2	2,5	37,8	40,8
Mínimo	1,0	2,3	25,2	26,9
Máximo	1,5	2,6	51,8	56,0
Des. Estándar	0,2	0,1	7,7	8,5
----- Unidad Tablazo-Maiba-Chuzcal (n=14) -----				
Promedio	1,3	2,5	29,9	32,3
Mínimo	1,0	2,4	13,9	16,3
Máximo	1,5	2,8	44,8	46,2
Des. Estándar	0,2	0,1	8,6	8,7
----- Unidad ND (n=1) -----				
Promedio	1,2	2,6	38,9	40,4
----- Unidad Tareas-Chuscal-Chinchiná (n=1) -----				
Promedio	1,0	2,4	44,2	47,0
----- Unidad Chinchiná-Pacora (n=1) -----				
Promedio	1,3	2,5	29,0	31,1

Tabla 14. Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y granulométricas del suelo en las unidades cartográficas del municipio de Santuario.

Estadístico	A	L	Ar	pH	MO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	S
	----- (%)-----				(%)	----- (cmol _c .kg ⁻¹)-----						(mg.kg ⁻¹)
----- Unidad Catarina (n=23) -----												
Promedio	48,7	26,3	25,0	4,7	6,2	1,1	3,9	1,5	0,5	7,0	69,0	9,6
Mínimo	34,0	18,0	4,0	3,7	3,5	0,2	0,8	0,4	0,2	3,2	3,0	4,0
Máximo	72,0	34,0	42,0	5,5	12,0	3,3	9,3	3,0	0,9	12,1	249,0	34,0
Des. Estándar	8,7	3,7	9,1	0,5	2,3	0,9	2,4	0,8	0,2	2,4	77,2	6,6
----- Unidad Chinchiná (n=21) -----												
Promedio	59,2	27,9	12,9	4,7	12,2	1,3	2,3	0,8	0,6	4,9	60,7	22,3
Mínimo	38,0	20,0	4,0	4,2	4,4	0,4	0,9	0,3	0,2	3,6	4,0	6,0
Máximo	72,0	36,0	38,0	5,3	17,8	2,4	5,0	2,0	1,4	8,6	282,0	121,0
Des. Estándar	9,7	4,3	9,1	0,2	3,9	0,6	0,9	0,4	0,3	1,1	85,2	24,7
----- Unidad Chinchiná-Balboa (n=13) -----												
Promedio	48,8	24,5	26,8	4,9	6,0	0,9	4,3	2,2	0,8	8,1	60,1	11,4
Mínimo	32,0	12,0	12,0	4,4	3,3	0,2	1,3	0,6	0,4	4,6	4,0	4,0
Máximo	64,0	30,0	42,0	5,5	10,9	1,9	11,6	9,8	1,1	21,9	160,0	31,0
Des. Estándar	9,1	4,6	9,0	0,3	2,1	0,6	2,7	2,4	0,3	4,5	50,0	8,5
----- Unidad Chinchiná-Catarina (n=65) -----												
Promedio	55,0	26,4	18,6	4,7	8,9	1,2	2,7	1,1	0,6	5,5	85,4	14,4
Mínimo	24,0	18,0	2,0	3,8	3,1	0,2	0,5	0,2	0,2	2,0	3,0	5,0
Máximo	72,0	38,0	44,0	5,6	17,9	3,1	8,8	2,5	1,4	11,8	319,0	36,0
Des. Estándar	9,8	4,5	9,3	0,4	4,1	0,7	1,6	0,6	0,3	1,8	90,1	7,7
----- Unidad NN (n=17) -----												
Promedio	59,2	30,1	10,7	4,8	12,3	1,0	1,8	0,6	0,4	3,7	23,4	16,9
Mínimo	52,0	20,0	4,0	4,2	5,5	0,3	0,6	0,2	0,1	1,4	3,0	7,0
Máximo	68,0	40,0	28,0	5,5	18,0	2,7	6,6	1,3	0,9	8,3	264,0	54,0
Des. Estándar	5,3	5,6	5,7	0,3	3,0	0,7	1,6	0,4	0,2	2,1	62,7	11,1

Tabla 15. Parámetros estadísticos de las densidades real y aparente, y retención de agua a 0,33 y 15 bares, correspondientes a las unidades del suelo en el municipio de Santuario.

Estadístico	Densidad aparente	Densidad real	Retención de agua a 1,5 Mpa	Retención de agua a 0,033 Mpa
	----- (g.cm ⁻³)-----		----- (Mpa)-----	
----- Unidad Catarina (n=8) -----				
Promedio	1,2	2,5	34,3	38,5
Mínimo	0,6	2,2	18,4	20,0
Máximo	1,5	2,6	72,2	79,7
Des. Estándar	0,3	0,2	18,8	20,8
----- Unidad Chinchiná (n=7) -----				
Promedio	0,7	2,3	63,3	71,2
Mínimo	0,6	2,2	55,6	61,2
Máximo	0,8	2,3	69,9	81,3
Des. Estándar	0,1	0,0	5,1	7,0
----- Unidad Chinchiná-Balboa (n=4) -----				
Promedio	1,2	2,5	29,1	31,9
Mínimo	0,9	2,4	20,1	22,5
Máximo	1,5	2,6	40,6	44,2
Des. Estándar	0,2	0,1	8,5	9,0
----- Unidad Chinchiná-Catarina (n=27) -----				
Promedio	1,1	2,4	36,0	40,1
Mínimo	0,6	2,2	13,0	15,0
Máximo	1,5	2,6	73,3	81,1
Des. Estándar	0,3	0,1	16,2	18,6
----- Unidad NN (n=7) -----				
Promedio	0,7	2,3	60,6	69,2
Mínimo	0,6	2,1	32,2	33,6
Máximo	1,1	2,5	74,7	85,4
Des. Estándar	0,2	0,1	14,3	17,2



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

Como resumen, y basándose en los valores promedio de los indicadores de vulnerabilidad del suelo a la variabilidad climática, se puede concluir que los tres municipios objeto de estudio presentan una baja capacidad para retener agua y, por lo tanto, una alta vulnerabilidad al déficit hídrico; entre tanto, su vulnerabilidad debido a la acidez y la disponibilidad de nutrientes es menos crítica (media). Dada la importancia que reviste la capacidad de retención de agua, la clasificación general de la Vulnerabilidad a la Disponibilidad y Conservación de Nutrientes en el Suelo- **IVDCNS es medio**.

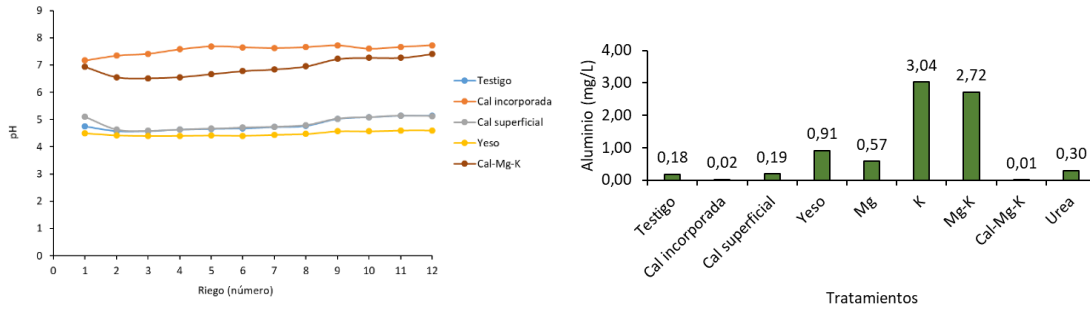
Por lo anterior se **recomienda**:

- En los tres municipios, con énfasis en Balboa y Salamina, realizar prácticas tendientes a conservar la humedad y mejorar la capacidad del suelo para retener la humedad, principalmente aquellos que contribuyan a mantener/aumentar la materia orgánica, entre ellas: reducir la pérdida del suelo por la erosión, el establecimiento de árboles de sombrero para conservar la humedad y propiciar el ingreso de hojarasca a través del ciclaje, el uso de abonos y residuos orgánicos, el empleo de coberturas muertas en la zona del plato de los árboles y establecer plantaciones con densidades óptimas.
- Corregir la acidez del suelo, siempre y cuando el análisis del suelo así lo indique. Evitar la aplicación de enmiendas (cales o yeso) de manera generalizada; esto puede generar problemas de alcalinidad para café y desbalances nutricionales.
- Emplear análisis de suelos. En la mayoría de las veces no se requiere de la aplicación de fósforo, calcio ni magnesio. Con respecto al potasio, se podrá racionalizar su uso en razón de sus altos contenidos.

6.2 VULNERABILIDAD A LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES POR LIXIVIACIÓN – IVPN

En la tabla 16 se consignan los valores promedio de las pérdidas por lixiviación de fósforo, potasio, calcio y magnesio en respuesta a los tratamientos, registradas en las cinco unidades cartográficas evaluadas. Cabe resaltar que la pérdida de los nutrientes por lixiviación constituye un fenómeno natural, el cual varía de acuerdo al elemento, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la cantidad aplicada y el tipo de fertilizante y enmienda, la fisiografía del terreno y la cantidad y distribución de la lluvia, entre otros.

Para todos los suelos objeto de estudio, las cantidades pérdidas de fósforo fueron muy bajas, aun cuando se aplicó el nutriente vía fertilización. Para el suelo de la unidad Catarina, caracterizado por su acidez, la aplicación de cal, tanto superficialmente como en forma incorporada, no aumentó la lixiviación de calcio ni de magnesio, mientras que un efecto contrario se observó con el suministro de sulfato de calcio (yeso); resultado que se relaciona con la solubilidad de la fuente. Además, en esta misma unidad de suelo, los mejores resultados para acondicionamiento del pH se obtuvieron con la aplicación de cal dolomita incorporada (Figura 6), mientras que la cal dolomita puesta de manera superficial tuvo un comportamiento similar al del testigo, a partir de la segunda semana.



a. **Figura 6.** Respuesta del pH (a) y contenido de aluminio a la aplicación de enmiendas, para la solución del suelo de la unidad Catarina – Santuario Risaralda.

Para todos los suelos estudiados, la aplicación de cloruro de potasio (KCl) contribuyó a las mayores pérdidas de calcio, seguido por urea, sulfato de amonio (SAM), sulfato de magnesio (Kieserita) y DAP (Figura 7); al respecto, cabe aclarar que la acción de potasio y magnesio se debe a la competencia con el calcio y el efecto de los fertilizantes nitrogenados a la competencia del amonio (NH_4^+) y la acidez generada.

Con la aplicación de magnesio a través de Kieserita se incrementó la lixiviación de este elemento; sin embargo, las mayores pérdidas fueron registradas cuando se aplicaron KCl y los fertilizantes nitrogenados (Figura 8). El lavado de potasio aumentó con la aplicación del nutriente, y aunque el suministro de magnesio y el nitrógeno también contribuyeron a la pérdida de éste, su magnitud fue relativamente baja.

Un resultado sobresaliente se relaciona con la disminución en la lixiviación de potasio cuando se corrigió la acidez del suelo en la unidad Catarina mediante la incorporación de la cal (Figura 9), lo cual se debe al incremento de la capacidad del suelo para retener cationes intercambiables (CIC).

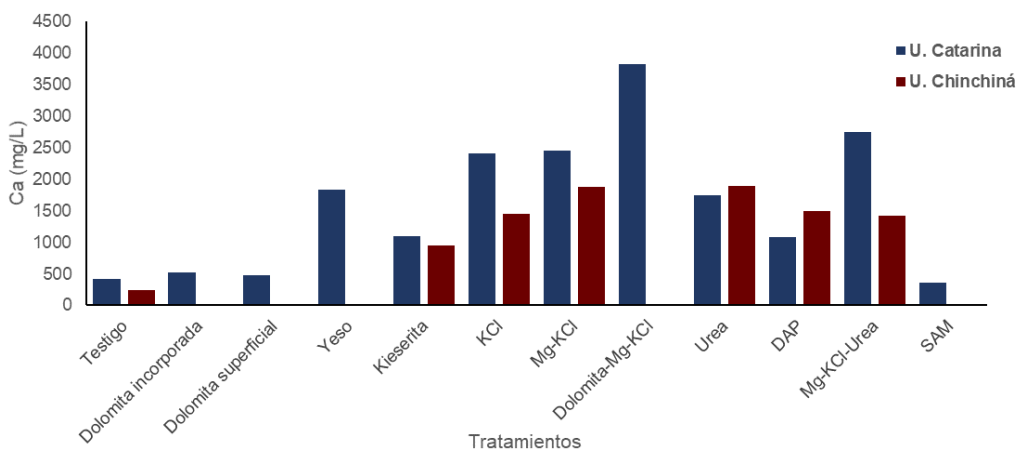


Figura 7. Pérdidas de calcio por lixiviación, durante doce semanas de aplicación de agua.

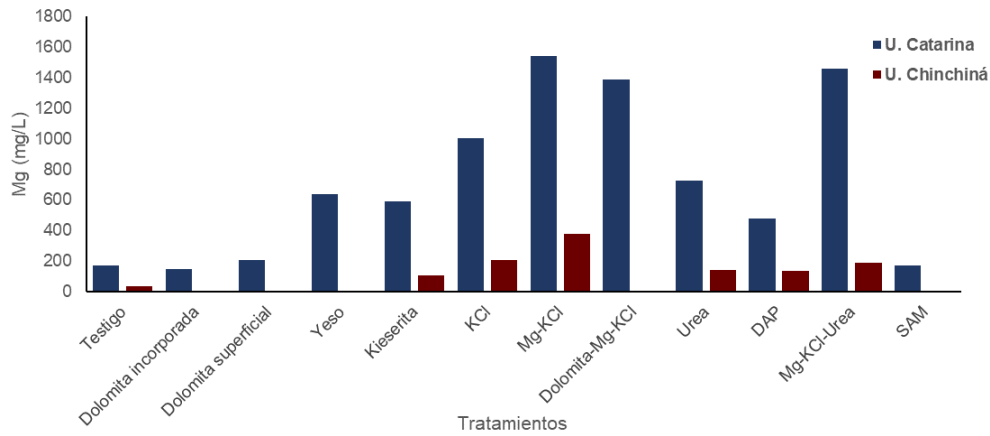


Figura 8. Pérdidas de magnesio por lixiviación, durante doce semanas de aplicación de agua.

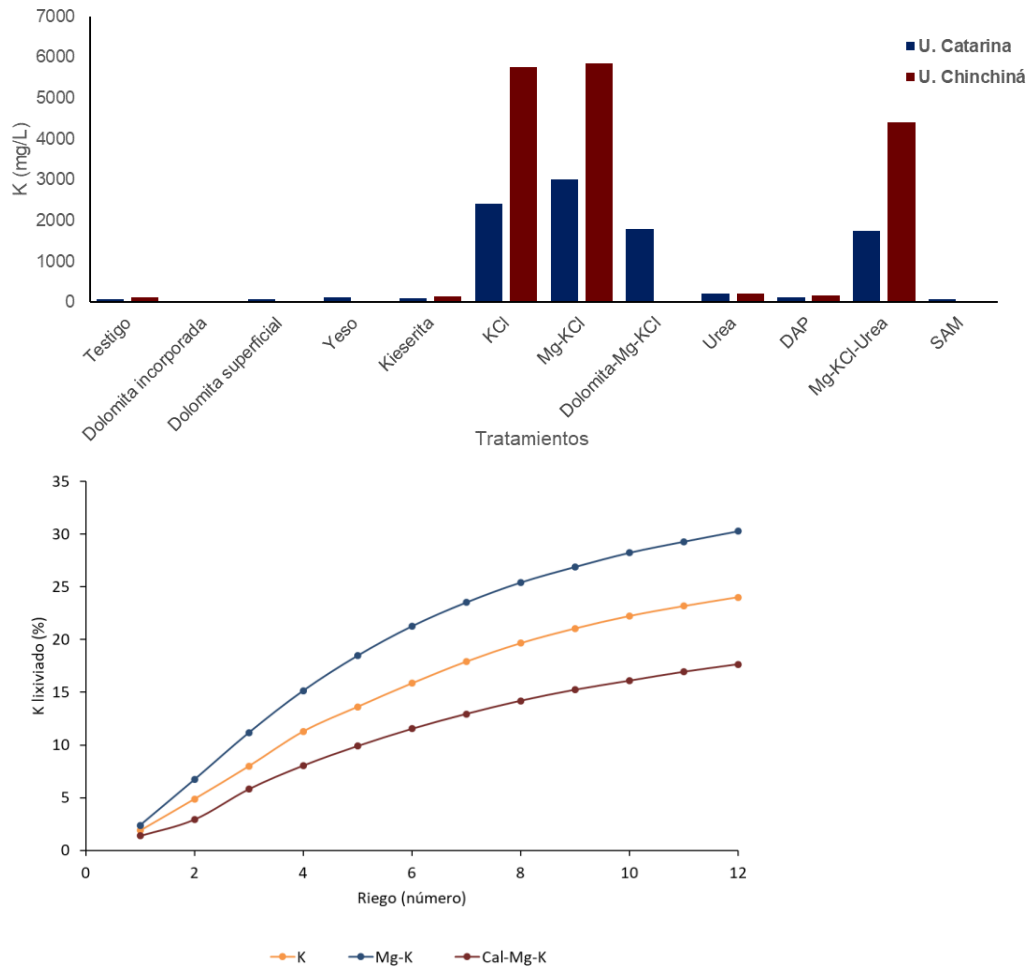


Figura 9. Pérdidas de potasio por lixiviación, durante doce semanas de aplicación de agua.

Tabla 16. Valores promedio de las pérdidas por lixiviación de fósforo, potasio, calcio y magnesio en respuesta a los tratamientos en las unidades cartográficas evaluadas.

Número del tratamiento	Descripción del tratamiento	Pérdida del nutriente por lixiviación (mg/columna)			
		P	K	Ca	Mg
————— Unidad Catarina —————					
1	Testigo	0,00	1,75	10,14	4,23
2	Cal incorporada	0,00	0,91	12,55	3,61
3	Cal superficial	0,00	1,88	11,77	5,01
4	Yeso	0,00	2,76	44,56	15,58
5	Mg	0,00	2,45	26,74	14,36
6	K	0,00	58,65	58,64	24,45
7	Mg-K	0,00	73,46	59,50	37,50
8	Cal-Mg-K	0,00	43,85	92,90	33,68
9	Urea	0,00	5,59	46,52	19,31
10	DAP	0,18	3,02	28,54	12,78
11	Mg-K-Urea	0,00	46,69	72,80	38,62
	Promedio	0,20	21,18	40,51	17,96
————— Unidad Chinchiná en el municipio de Balboa —————					
1	Testigo	0,13	1,65	1,55	0,44
5	Mg	0,00	2,48	3,19	0,92
6	K	0,00	48,20	52,81	16,52
7	Mg-K	0,00	49,97	51,62	18,34
9	Urea	0,00	13,36	45,34	10,28
10	DAP	0,07	5,55	15,67	4,99
11	Mg-K-Urea	0,00	58,92	49,60	15,54
12	SAM	0,00	12,12	33,95	21,60
	Promedio	0,09	24,53	32,49	11,35
————— Unidad Parnaso —————					
1	Testigo	1,53	16,88	3,31	1,69
5	Mg	0,00	26,56	9,52	5,60
6	K	0,00	71,58	52,24	25,35
7	Mg-K	0,00	82,71	97,32	28,40
9	Urea	0,00	55,81	40,08	18,54
10	DAP	0,08	38,85	19,69	9,90
11	Mg-K-Urea	0,00	115,39	87,80	38,56
12	SAM	0,00	85,23	87,70	43,03
	Promedio	0,69	63,17	51,31	22,06

Continuación Tabla 16. Valores promedio de las pérdidas por lixiviación de fósforo, potasio, calcio y magnesio en respuesta a los tratamientos en las unidades cartográficas evaluadas.

Número del tratamiento	Descripción del tratamiento	Pérdida del nutriente por lixiviación (mg/columna)			
		P	K	Ca	Mg
—————Unidad Tablazo—————					
1	Testigo	0,46	0,20	1,56	0,38
5	Mg	0,00	0,37	10,42	3,08
6	K	0,00	47,87	58,00	11,84
7	Mg-K	0,00	38,29	63,55	22,36
9	Urea	0,00	1,84	39,08	8,24
10	DAP	0,11	0,57	19,86	4,66
11	Mg-K-Urea	0,00	48,59	60,32	17,80
12	SAM	0,00	2,35	46,70	10,27
	Promedio	0,26	17,95	38,30	10,07
—————Unidad Chinchiná en el municipio de Santuario—————					
1	Testigo	0,08	3,19	6,80	1,11
5	Mg	0,00	4,42	27,55	3,05
6	K	0,00	166,24	42,01	5,93
7	Mg-K	0,00	168,31	54,17	10,99
9	Urea	0,00	6,22	54,62	4,17
10	DAP	0,07	4,61	42,91	3,96
11	Mg-K-Urea	0,00	127,31	41,07	5,51
	Promedio	0,08	68,62	38,45	4,96

Con base en los resultados obtenidos para los tratamientos específicos de cada nutriente (tratamientos 2, 5, 6 y 10 para calcio, magnesio, potasio y fósforo, respectivamente), se puede concluir que:

- En los tres municipios fueron muy bajas las pérdidas de fósforo y calcio por lixiviación.
- Salamina y Balboa se caracterizaron por sus muy bajas pérdidas de magnesio, mientras que en Santuario la magnitud del fenómeno recibió una clasificación baja.
- Las pérdidas de potasio fueron medias en Santuario, bajas en Balboa y muy bajas en Salamina.
- Parte de las diferencias entre los municipios se pueden atribuir a la textura y la capacidad de intercambio catiónico de los suelos (CICE).

De acuerdo a los anteriores resultados se proponen las siguientes **recomendaciones**:

- Analizar periódicamente (cada dos años) las propiedades de los suelos de la finca con el fin de identificar las propiedades que pueden afectar la lixiviación en los diferentes lotes. Son de importancia la textura, la acidez (pH y aluminio intercambiable), el contenido de calcio, magnesio y potasio, la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva–CICE y la materia orgánica.



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

- Corregir la acidez del suelo mediante el encalamiento. Esta práctica, además de aumentar los contenidos de calcio y magnesio, incrementa la capacidad del suelo para retener elementos como potasio y reduce su pérdida por lixiviación. El manejo de la acidez tiene una mayor implicación en el municipio de Santuario.
- No exceder en las dosis de nitrógeno y potasio. Ello contribuye a generar menos acidez y competencia entre los nutrientes; causas que conllevan al incremento de la lixiviación.
- Ante eventos de La Niña, el fraccionamiento de la dosis total del potasio en tres ocasiones puede reducir las pérdidas de este elemento, particularmente cuando la cantidad total de la lluvia excede los 2.500 mm al año. Esta estrategia también contribuye a la reducción de las pérdidas de magnesio por generar una menor competencia.
- Realizar prácticas tendientes a reducir la erosión del suelo. Ello ayuda a conservar el horizonte superficial, el cual tiene más materia orgánica y ayuda a retener la humedad y los nutrientes. Lo anterior tiene particular interés en los suelos con menor contenidos de materia orgánica, es decir Balboa y Salamina.
- Otras prácticas complementarias son: la siembra de variedades resistentes a enfermedades, llevar almácigos sanos y vigorosos al campo, incorporar abono orgánico en el hoyo al momento de la siembra, establecer plantaciones con densidades óptimas y establecer cultivos intercalados, evitar que el terreno permanezca desnudo y manejar las plagas y enfermedades con el fin de que las plantas sean sanas y absorban eficientemente los nutrientes.
- Tener presente las épocas adecuadas para la fertilización. Por lo general estas coinciden con el inicio de las lluvias.

6.3 VULNERABILIDAD POR PÉRDIDA DE SUELO – IVPS

Para los municipios de Balboa y Salamina, la vulnerabilidad por pérdida de suelo es baja, mientras que para Santuario es media.

El índice de vulnerabilidad por el uso actual del suelo – IVUS (Tabla 17), en los municipios de Balboa y Santuario, fue medio, mientras que en Salamina fue bajo, lo que demuestra la atención que el caficultor debe depositar en ciertas actividades, para poder preservar los recursos del suelo en la finca

En los criterios utilizados para determinar el IVUS (manejo del sistema agrícola, manejo del suelo, protección de fuentes hídricas, erosión del suelo); para las tres localidades, el manejo del sistema agrícola y el manejo del suelo son los que muestran una vulnerabilidad alta y muy alta. Las falencias vinculadas al manejo del sistema agrícola, se centran al momento de implementar árboles de conservación en la finca y manejar el componente arbóreo para la sombra del cultivo.

En el manejo del suelo, las deficiencias están vinculadas al uso inapropiado de las coberturas vegetales, en las que el sistema de producción de café permanece acompañado de arvenses de alta competencia (agresivas); y se da poca prioridad al establecimiento de nobles con el manejo integrado de arvenses



IDRC | CRDI

International Development Research Centre
Centre de recherches pour le développement international

(MIA). En el peor de los casos, los caficultores siguen utilizando de forma generalizada los herbicidas en las calles del cafetal, dejando los suelos descubiertos lo que acelera la erosión.

En lo correspondiente a las fuentes hídricas, la vulnerabilidad en Balboa y Santuario, en promedio es baja, y en Salamina muy baja. Estos resultados indican que la comunidad está empoderada en el cuidado de las fuentes hídricas, sin embargo, hay un aumento de la vulnerabilidad por las falencias en el manejo de aguas lluvia y aguas domesticas en los hogares rurales.

La erosión en los tres municipios indicó una vulnerabilidad baja, con una tendencia a poder incrementar. Este comportamiento se debe en gran parte al manejo inadecuado de los suelos, sumado a que en este criterio se evaluó la influencia de los deslizamientos dentro de los predios de los productores. Cabe resaltar la importancia que se debe brindar a las prácticas orientadas a estabilizar y prevenir los deslizamientos, para evitar perder áreas productivas dentro de la finca. A pesar de las deficiencias presentadas en el manejo del suelo, muchas fincas permitían el establecimiento de cobertura viva, independiente del grado de competencia que estas presentaban en áreas cultivadas en café y espacios destinados para conservación. De alguna manera esto pudo haber influenciado a que no se evidenciaran diagnósticos tan severos de erosión.

Tabla 17. Descriptores estadísticos para del índice de vulnerabilidad por el uso actual del suelo, en los municipios objeto de estudio.

Estadístico	Manejo del sistema agrícola	Manejo del suelo	Protección de fuentes hídricas	Erosión del suelo	IVUS
----- Municipio de Balboa -----					
Promedio	1,71	2,42	3,67	3,71	3,13
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,62
Máximo	4,20	4,00	5,00	4,75	3,95
CV (%)	35,04	28,60	20,52	17,99	11,81
----- Municipio de Salamina -----					
Promedio	2,28	2,61	4,26	3,65	3,32
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,70
Máximo	4,20	4,40	5,00	5,00	4,16
CV (%)	28,68	32,29	15,56	19,45	13,35
----- Municipio de Santuario -----					
Promedio	1,85	2,02	3,94	3,35	2,92
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,50	2,17
Máximo	4,20	3,30	5,00	4,75	3,66
CV (%)	39,09	27,58	22,79	18,25	11,12

En cuanto a la **Vulnerabilidad por erosión hídrica – IVEH**, tanto los suelos de los municipios de Balboa y Santuario, como los de Salamina, presentaron un alto índice de erodabilidad (factor K), ante fenómenos torrenciales con alto poder erosivo. Lo anterior, hace que los territorios tengan un nivel de vulnerabilidad muy bajo ante la agresividad climática, en este caso la lluvia. Sin embargo, por la baja conductividad hidráulica y menores valores en la estabilidad de agregados al agua, es necesario prestar mayor atención a las unidades cartográficas Tablazo-Chuscal-Chinchiná-Pacora en Salamina; Chinchina-Catarina-Balboa y Chinchiná-Balboa en Balboa; y Chinchiná-Balboa y Chinchiná - Catarina, en Santuario (Tabla 19).

Tabla 19. Promedio de variables físicas de las Unidades Cartográficas de suelo, en los municipios de Balboa y Santuario en Risaralda y Salamina en Caldas.

Unidad Cartográfica de suelo	Conductividad Hidráulica (cm/min)	Estabilidad de agregados al agua (diámetro medio ponderado mm)	Erodabilidad (t.ha/MJ.mm.ha)
Valor promedio			
Balboa			
Chinchiná	0,025	1,209	0,00340
Chinchiná-Balboa	0,038	0,863	0,00280
Chinchiná-Catarina	0,039	1,138	0,00544
Chinchiná-Catarina-Balboa	0,009		
Parnaso	0,061	1,138	0,00347
Salamina			
Chinchiná-Pacora	0,013	2,741	0,00567
Chuscal-Tablazo-Chinchiná	0,068		0,00993
ND	0,009		
Tablazo-Chuscal	0,014		
Tablazo-Chuscal-Chinchiná-Pacora	0,011	2,011	0,01125
Tablazo-Maiba-Chuscal	0,042	2,530	0,00984
Tareas-Chuscal-Chinchina	0,042	3,966	0,01135
Santuario			
Catarina	0,050	2,451	0,00060
Chinchiná	0,052	3,318	0,00270
Chinchiná-Balboa	0,007	3,757	0,00160
Chinchiná-Catarina	0,034	1,689	0,00363
NN	0,011	1,823	0,00422

Pese a la resistencia natural del suelo, hay factores que hacen que ésta disminuya, entre ellos: laboreo intensivo, falta de coberturas, alta pendiente, extensa longitud de las laderas y disminución en los agentes agregantes, tales como la materia orgánica, el calcio y el magnesio; además la muy alta erosividad anual que se presenta en los municipios de Balboa (10882,74 MJ.mm.ha⁻¹), Santuario(11762,88 MJ.mm.ha⁻¹) y alta en Salamina (7.500 – 10.000 MJ.mm.ha⁻¹), hacen necesario que el caficultor, durante todo el año y en todas las etapas del cultivo, realice acciones preventivas y correctivas que mitiguen la acción del clima y que mejoren las condiciones del suelo.

Según lo anterior, las **recomendaciones** para disminuir la vulnerabilidad del suelo, a la variabilidad climática, mediante prácticas enfocadas en el uso actual del suelo para los tres municipios son:

- Relacionados con el sistema agrícola, se debe sensibilizar a la comunidad y emprender prácticas demostrativas que incentiven al caficultor en la siembra de árboles de conservación y manejo de sombrío. Además de planificar los lotes para nuevas siembras, de tal forma que no se de una migración a las partes altas y se genere un desbalance con las áreas de protección o en partes mucho más bajas, que pongan en mayor riesgo el estado fitosanitario del cultivo.
- Relacionados con el manejo del suelo, es prioritario trabajar con el manejo integrado de arvenses, con el fin de mantener el suelo cubierto como se muestra en la Figura 10, con el fin de que las coberturas del suelo sean solo de carácter noble y no se presente competencia con el cultivo, por

agua y por nutrientes. Además, se debe instruir al productor en métodos de siembra conforme a la topografía, para evitar acelerar la erosión con siembras a favor de la pendiente.



Figura 10. Manejo de arvenses adecuado para la conservación de suelos y el aprovechamiento de fertilizantes.

- En la Protección de fuentes hídricas, continuar con la protección de drenajes que se viene realizando. Sensibilizar a los caficultores en la importancia que tiene el manejo de agua lluvia desde los hogares, mediante la utilización de canales colectoras en los techos de las casas y llevar a que esta agua sea cosechada de una forma adecuada, para ser utilizada en los días en que la lluvia disminuya, y en trabajo comunal, evitar la acumulación de agua en flujos preferenciales, mediante reductores de velocidad en las vías. Con relación al manejo de aguas domésticas, es primordial generar campañas relacionadas con la adecuada conducción de aguas de los desagües de los lavaderos, lavamanos y lavaplatos, ya que muchos de ellos están mal diseñados y no tienen una entrega adecuada, lo que genera deterioro del suelo. Además, es necesario sensibilizar a la comunidad en la importancia de realizar mantenimiento a los grifos y toda la estructura hidráulica de la finca, ya que, en muchas de estas, se evidenció un mal uso del recurso agua, a pesar de que el caficultor expreso tener conocimiento de la importancia de dicho recurso.
- En cuanto a la erosión del suelo, realizar adiciones de materia orgánica, con el fin de mantener los niveles adecuados y favorecer la agregación de las partículas. Realizar oportunamente las fertilizaciones, para evitar pérdida de bases, que conlleve a la desagregación del suelo. En las actividades que tienen mayor duración en el sistema se propone establecer barreras vivas en aquellos lotes en las que las laderas sean de gran longitud y alta pendiente. También se recomienda implementar estrategias orientadas a la estabilización de los movimientos en masa, como puede ser la construcción de obras en bioingeniería.