

## Monitoreo meteorológico y servicio agroclimático. ACL101007

El período de octubre de 2024 a septiembre de 2025 se caracterizó por condiciones oceánicas de fase Neutra con sesgo frío en el océano Pacífico, lo que moduló el clima en la región cafetera colombiana. El monitoreo de 14 estaciones reveló que la precipitación anual se mantuvo cercana o ligeramente superior a la normal climatológica. La estación Bertha se destacó con 57% más de lluvia de lo normal (Tabla 1). En el año 2025 se registraron 116 récords de lluvia mensual máxima y 22 de mínima. Febrero fue uno de los más lluviosos históricamente en la región Central, especialmente en Caldas. Por el contrario, julio fue el más seco en el registro histórico para diez estaciones de la región Central. En cuanto al déficit hídrico ( $IDH < 0,3$ ), en la región Norte se presentó entre diciembre y marzo. La región Central, sin embargo, mostró déficit en enero y julio, con una anomalía en el patrón de febrero que impactó la floración. La región Sur mantuvo un comportamiento similar al histórico, favoreciendo la floración (Tabla 2). El análisis de temperaturas evidenció un incremento sostenido de las mínimas y una disminución de las máximas, específicamente en el primer semestre, en la mayoría de las estaciones (Tablas 3 y 4), reduciendo la amplitud térmica y afectando la acumulación de biomasa en el café. Este patrón se debe a la mayor nubosidad asociada al enfriamiento del Pacífico. La estación Pueblo Bello fue la excepción, mostrando anomalías positivas de temperatura en todos los meses.

Finalmente, en este período se continuó con el servicio agroclimático a la comunidad cafetera mediante



la emisión de los Boletines Agrometeorológicos Cafeteros No. 110 a 121 y la publicación del Anuario Meteorológico 2024. Se realizaron 335 visitas de mantenimiento a la red meteorológica por parte del personal de Mantenimiento de Cenicafé y 557 visitas de inspección por parte del Servicio de Extensión (Tabla 5).

## Determinación del factor de corrección para las variables temperatura, humedad relativa y precipitación, registradas en la estación automática con respecto a las registradas en la estación convencional. ACL101010

Para asegurar la continuidad y calidad de las series históricas de datos meteorológicos durante la transición de Estaciones Convencionales (EMC) a Automáticas (EMA), se implementó una metodología que incluyó la recopilación de metadatos y un control de calidad en las series de temperatura, humedad relativa y precipitación. La compatibilidad se evaluó mediante la diferencia diaria de datos y la aplicación de la prueba de homogeneización normal estándar para identificar puntos de quiebre. En casos requeridos, se usó el mapeo de cuantiles para ajustar series y la validación final se basó en el índice de concordancia de Willmott y el porcentaje de diferencias admitidas por la Organización Meteorológica Mundial. En temperatura se lograron identificar las ecuaciones óptimas en las EMA, alcanzando la continuidad en diez estaciones para la media y 11 para la mínima. Se implementó el cambio a escudos de radiación más grandes y de mejor material, optimizando la precisión del dato. La humedad relativa fue la variable con mayor éxito, logrando la continuidad histórica en muchas estaciones sin necesidad de ajustes. En precipitación, el control de calidad fue crucial para eliminar valores erróneos por taponamientos o errores de digitación, logrando la continuidad en 11 estaciones. Aunque el proceso no confirma una continuidad de las series climáticas de las EMC en todas sus variables, lo detectado en este estudio logró optimizar la calidad de la información de las EMA con mejores mantenimientos y calibraciones de los sensores. La estación Paraguacito destacó por lograr continuidad en cuatro variables, resultados esenciales para la confiabilidad de la información climatológica. Adicionalmente, se generó un análisis histórico por sitio que se publicará como insumo para un libro de historia climática de la red cafetera.

**Tabla 1.** Comportamiento de la precipitación anual respecto de la normal climatológica.

Estación	Municipio	Departamento	Precipitación (mm)			
			Normal (1990 - 2019)	Octubre 2024 - Septiembre 2025	Anomalía	Magnitud del cambio
Pueblo Bello	Pueblo Bello	Cesar	2.042	2.147	105	5%
La Victoria	Santa Marta	Magdalena	2.362	2.509	147	6%
Blonay	Chinácota	Norte de Santander	1.408	1.677	269	19%
San Antonio	Floridablanca	Santander	1.519	1.684	165	11%
Bertha	Moniquirá	Boyacá	1.987	3.124	1137	57%
El Rosario	Venecia	Antioquia	2.644	3.317	673	25%
Naranjal	Chinchiná	Caldas	2.939	3.270	331	11%
Cenicafé	Manizales	Caldas	2.629	3.032	403	15%
La Trinidad	Líbano	Tolima	2.185	2.660	475	22%
Misiones	El Colegio	Cundinamarca	1.406	1.481	75	5%
La Catalina	Pereira	Risaralda	2.282	2.645	363	16%
Paraguaicito	Buenavista	Quindío	2.199	2.651	452	21%
Manuel M. Mallarino	Trujillo	Valle del Cauca	1.705	2.313	608	36%
Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2.078	2.409	331	16%
Jorge Villamil	Gigante	Huila	1.362	1.631	269	20%
El Sauce	La Unión	Nariño	1.863	2.077	214	12%

## Estimación de los componentes del balance hídrico para el cultivo de café a libre exposición. ACL103004

A partir de los datos recolectados mediante instrumentación en tres estaciones (Naranjal, Paraguaicito, Manuel Mejía) se establecieron las relaciones entre la lluvia externa y la lluvia efectiva diaria por etapa fenológica (reproductiva, vegetativa y vegetativa+maíz). Se compararon modelos lineales (con interacción lluvia $\times$ etapa), polinómico (grado 2), segmentado, GAM y mixtos (efectos aleatorios por fecha/estación). El modelo lineal mostró alto ajuste ( $R^2 \approx 0,933$ ) y baja complejidad; se detectó heterocedasticidad (Breusch-Pagan), por lo que se reportaron errores estándar robustos HC3. Los modelos no lineales y segmentados ofrecieron mejoras leves en las métricas de desempeño, pero no significativas, y a su vez un incremento en la complejidad y menor trazabilidad para uso operativo. Se adoptó el modelo lineal por etapa, limitado a lluvias mayores a 1,0 mm ( $L < 1 \text{ mm} \rightarrow L_{\text{ef}} = 0$ ) por su ajuste, interpretabilidad y aplicabilidad en el balance hídrico. Este parámetro se

integrará al modelo del balance hídrico, junto con los demás componentes evaluados.

## Ajuste y validación de modelos de predicción climática. ACL103009

A partir de análisis de control de calidad, se consolidaron las series climáticas de las estaciones de la Red Climática Cafetera de la FNC (106 de lluvia y 30 de temperatura; >30 años, 1981–2025) y se inició la validación de fuentes externas de información climática como CHIRPS y AgERA5. CHIRPS mostró desempeño moderado–bueno (71% de las estaciones con  $R^2 = 0,5–0,8$ ), mientras que AgERA5 subestimó sistemáticamente la temperatura ( $MBE < -1^\circ\text{C}$ ) y presentó baja concordancia (Tabla 6). Se calcularon índices climáticos extremos y se evidenciaron tendencias crecientes significativas de la precipitación en más del 20% de las estaciones analizadas y de la temperatura en más del 70% de las estaciones (Figura 1). Se evaluaron las relaciones de los índices de sequía (SPI y SPEI) y de las anomalías estandarizadas con el fenómeno El Niño–Oscilación Sur (ENOS), mostrando mayor intensidad de los períodos secos y húmedos

**Tabla 2.** Número de décadas (período de 10 días) con déficit hídrico IDH<0,3 en estaciones meteorológicas automáticas durante octubre 2024 – septiembre 2025.

Estación	Departamento	2024			2025							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Pueblo Bello	Cesar											
San Antonio	Santander											
El Roble	Santander											
Confines	Santander											
Bertha	Boyacá											
Miraflores	Boyacá											
Cocorná	Antioquia											
El Rosario	Antioquia											
Almacafé Letras	Caldas											
Planalto	Caldas											
Naranjal	Caldas											
Anserma	Caldas											
Marquetalia (GIA)	Caldas											
La Catalina	Risaralda											
Ospirma	Risaralda											
Paraguaicito	Quindío											
El Agrado	Quindío											
Julio Fernández	Valle del Cauca											
Santiago Gutiérrez	Valle del Cauca											
La Trinidad	Tolima											
El Ruby	Tolima											
Jorge Villamil	Huila											
San Agustín	Huila											
El Mirador	Huila											
Tarqui	Huila											
Santa María	Huila											
Manuel Mejía	Cauca											
El Tambo (GIA)	Nariño											



**Tabla 3.** Comportamiento de la temperatura mínima semestral-°C, respecto de la normal climatológica.

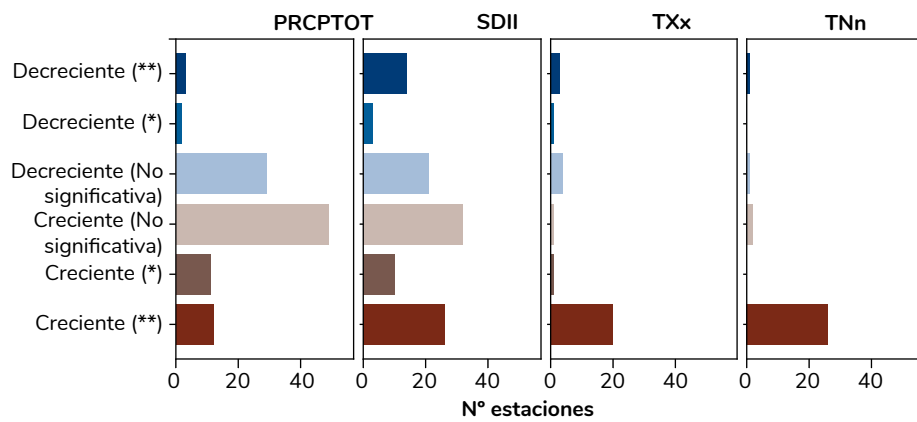
Promedio de Temperatura Mínima °C	Período	Cesar	Santander	Antioquia	Caldas	Tolima	Risaralda	Quindío	Cauca
		Pueblo Bello	Floridablanca	Venecia	Chinchiná	Líbano	Pereira	Buenavista	El Tambo
		Pueblo Bello	San Antonio	El Rosario	Naranjal	La Trinidad	La Catalina	Paraguaicito	Manuel Mejía
Octubre 2024 a Marzo 2025	Normal promedio	15,1	16,7	16,6	17	16,7	17,4	17,1	15
	Anomalía °C	0,7	0,5	0,3	0,5	0,7	0,2	0,2	0,6
Abril 2025 a Septiembre 2025	Normal promedio	16,8	17	16,7	17,1	16,6	17,4	17,3	14,2
	Anomalía °C	0,8	0,4	0,5	0,3	0,7	0,3	0,4	0

**Tabla 4.** Comportamiento de la temperatura máxima semestral-°C, respecto de la normal climatológica.

Promedio de Temperatura Mínima °C	Período	Cesar	Santander	Antioquia	Caldas	Tolima	Risaralda	Quindío	Cauca
		Pueblo Bello	Floridablanca	Venecia	Chinchiná	Líbano	Pereira	Buenavista	El Tambo
		Pueblo Bello	San Antonio	El Rosario	Naranjal	La Trinidad	La Catalina	Paraguacito	Manuel Mejía
Octubre 2024 a Marzo 2025	Normal promedio	27	23,7	25,2	26,9	24,8	27,3	28	23,9
	Anomalía °C	1,3	0,3	0	-0,2	0,2	-0,5	-0,5	0
Abril 2025 a Septiembre 2025	Normal promedio	27,2	23,9	25,4	26,9	25	27,3	28,3	24,9
	Anomalía °C	0,7	0,4	0,5	-0,2	0,3	0,2	0	0

**Tabla 5.** Distribución nacional de la red meteorológica cafetera y cantidad de visitas de mantenimiento entre octubre 2024 – septiembre 2025.

Departamento	EMA			EMC		
	Estaciones activas	Visitas BSM (Oct 2024 - Sep 2025)	Visitas SE (Oct 2024 - Sep 2025)	Estaciones activas	Visitas BSM (Oct 2024 - Sep 2025)	Visitas SE (Oct 2024 - Sep 2025)
Antioquia	3	4	8	11	10	17
Boyacá	3	7	7	1	2	4
Caldas	10	24	17	51	32	112
Caquetá	1	1	1	-	-	-
Casanare	1	3	3	-	-	-
Cauca	2	8	1	6	9	15
Cesar	1	2	0	1	2	0
Cundinamarca	1	3	3	12	16	33
Huila	13	24	24	4	5	13
Magdalena	1	3	4	2	1	6
Meta	1	2	3	-	-	-
N. de Santander	6	12	14	3	6	4
Nariño	4	8	6	1	1	2
Putumayo	1	1	0	-	-	-
Quindío	2	11	4	20	27	45
Risaralda	4	12	11	10	12	35
Santander	5	12	12	22	25	58
Tolima	2	6	5	14	20	35
Valle del Cauca	8	11	26	10	13	29
<b>Total</b>	<b>69</b>	<b>154</b>	<b>149</b>	<b>168</b>	<b>181</b>	<b>408</b>



**Figura 1.** Número de estaciones por tipo de tendencia en índices climáticos extremos: PRCPTOT (suma total mensual de precipitación  $\geq 1$  mm), SDII (intensidad media de lluvia), TXx (temperatura máxima mensual), TNn (temperatura mínima mensual).

**Tabla 6.** Número de estaciones por rango de desempeño de las bases de datos AgERA5 y CHIRPS.

		TOTAL	Número de estaciones			
			TMAX	TMED	TMIN	LLUVIA
Métrica de desempeño	Coeficiente de determinación	$R^2 > 0,8$	0	0	0	1
		$0,7 < R^2 \leq 0,8$	1	1	0	15
		$0,5 < R^2 \leq 0,7$	6	9	2	75
		$R^2 \leq 0,5$	23	20	28	15
	Índice de Concordancia	$d > 0,9$	0	0	0	12
		$0,8 < d \leq 0,9$	0	3	0	75
		$0,7 < d \leq 0,8$	2	2	1	17
		$d \leq 0,7$	28	25	29	2
	Error medio de sesgo	$MBE < -1^\circ\text{C}$	28	18	20	13
		$-1 \leq MBE < -0,5^\circ\text{C}$	0	2	4	33
		$-0,5 \leq MBE \leq 0,5^\circ\text{C}$	2	7	4	35
		$0,5 < MBE \leq 1^\circ\text{C}$	0	1	2	13
		$MBE > 1^\circ\text{C}$	0	2	0	12
				AgERA5		CHIRPS

asociados a las fases El Niño y La Niña (Figura 2). Se encontraron correlaciones negativas con el SPI, SPEI y anomalías de lluvia, con valores de hasta  $-0,62$  que se mantienen entre 2 y 3 meses y que indican un rezago en los efectos de este fenómeno. Por el contrario, en el caso de la temperatura, las correlaciones fueron positivas (Tabla 7).

Dentro de la validación y ajuste de modelos de predicción, se realizó el análisis retrospectivo con CPT comparando dos fuentes de datos de temperatura superficial del mar ERSST (LT-sim) y CFSv2 (LT-0) en diferentes horizontes predictivos y optimizando especialmente el predictor; CFSv2 superó a ERSST en la mayoría de las temporadas (especialmente en los trimestres MAM/AMJ), con excepción de SON/OND. El desempeño espacial (Kendall y ROC) mostró

heterogeneidad regional y con el modelo CFSv2 se presentaron valores de Kendall  $>0,1$  en gran parte del área cafetera, indicando una buena habilidad de este método para generar pronósticos. Así mismo, se realizó la calibración de cuatro modelos de predicción estacional C3S (ECMWF, CMCC, DWD, NCEP), aplicando métodos de corrección como EQM y MOS-ONI y la generación de un modelo multi-ensamble (MME). MOS-ONI mejoró la habilidad de los modelos con un Skill\_RMSE positivo. El MME ponderado y corregido alcanzó su mayor habilidad en el trimestre EFM ( $\sim 0,27$ ) y se mantuvo positivo en los trimestres JJA-ASO ( $\sim 0,17-0,19$ ) (Figura 3).

## Caracterización Agroclimática de las Zonas Cafeteras de Colombia. ACL103010

Con el fin de definir las condiciones biofísicas de las zonas cafeteras que permitan identificar vulnerabilidades de los sistemas de producción y plantear los ajustes en los sistemas de producción, se inició el proceso para completar el estudio de caracterización agroclimática (<https://agroclima.cenicafe.org/caracterizacion-agroclimatica>) para todos los departamentos cafeteros. En el presente año se consolidó la información climática, de suelos y proveniente del SICA. Se generaron los ráster con información de los indicadores agroclimáticos anuales de precipitación y brillo solar acumulados y amplitud térmica media (Figuras 4, 5 y 6). Adicionalmente, a partir de la información de los estudios departamentales de suelos y zonificación del IGAC y una gran base de datos de los estudios de FNC-Cenicafé, se obtuvo un ráster de lámina de agua aprovechable que cubre todas las zonas cafeteras (Figura 7), insumo necesario para obtener los indicadores agroclimáticos de períodos decadiarios de déficit hídrico en

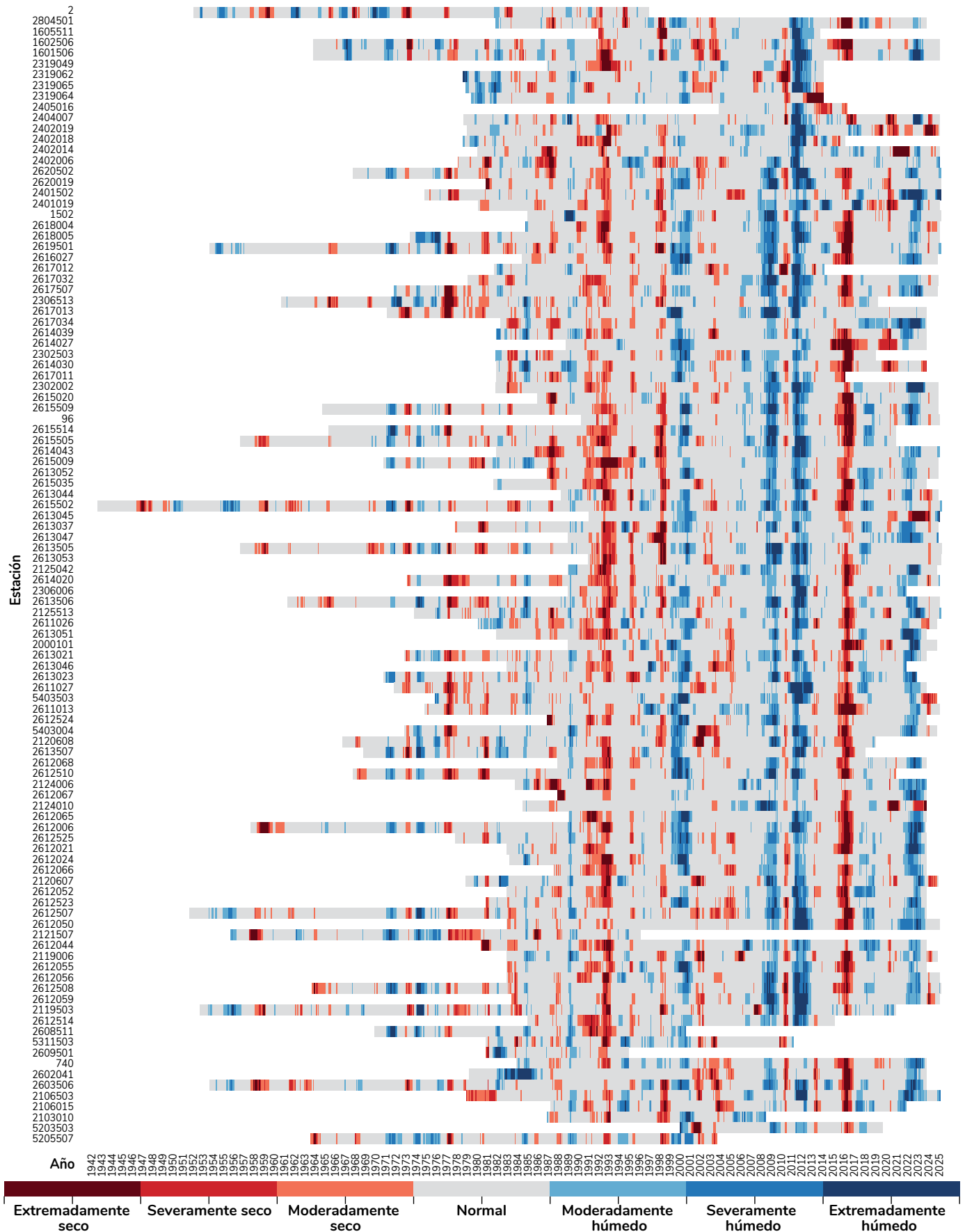


Figura 2. Comportamiento del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI-12) calculado a partir de las series de precipitación de 106 estaciones.

las etapas de floración y desarrollo del fruto.

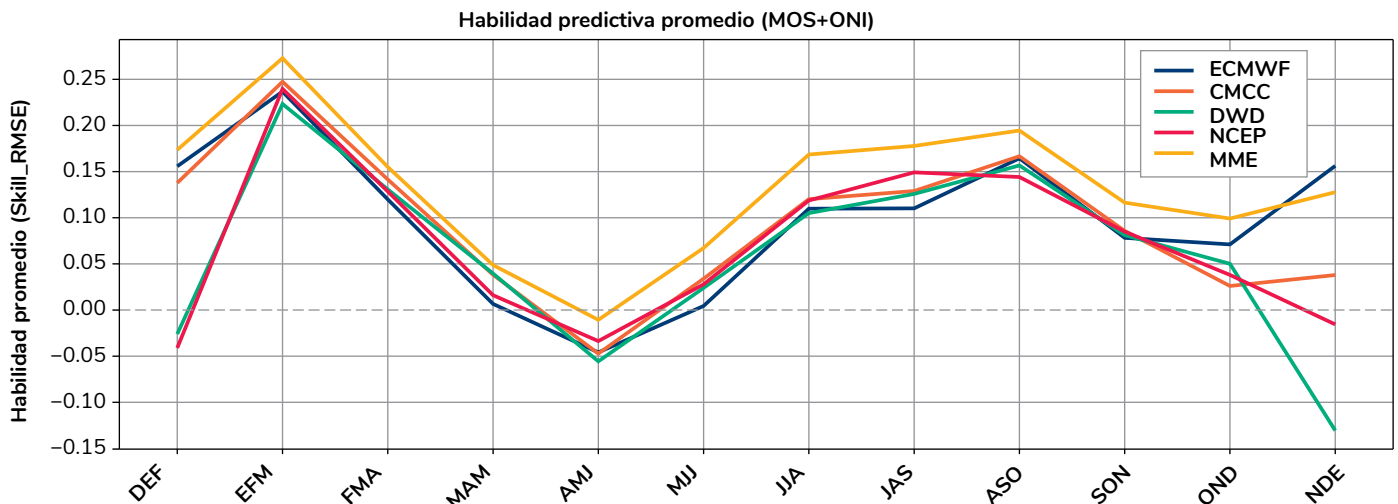
### Evaluación de Croppie®, como herramienta para la estimación de la producción en el cultivo de café. ACL103011

Se avanza en la valoración de la opción tecnológica Croppie®, aplicación móvil basada en inteligencia artificial, con el propósito de revisar su desempeño como técnica complementaria para proyectar la cosecha de café y validarla contra el conteo manual. Se realizaron actividades de captura, almacenamiento y procesamiento de la información, en un primer muestreo realizado en ocho Estaciones Experimentales de Cenicafé (EE), en el que se compararon ambas metodologías. Del análisis preliminar se advierte que Croppie® aún no diferencia bien entre flores y frutos, y aspectos relacionados con las sombras que se generan y ampliación del campo visual, causan falsos conteos de los frutos en la rama objetivo. Del muestreo intensivo de los frutos en 720 ramas por EE (Figura 8), es posible apreciar que existe la tendencia a reflejar una mayor diferencia entre los dos métodos cuando se contabilizan un mayor número de frutos por rama. Al correlacionar el número de frutos rama a rama, descartando errores de la herramienta, se presentó un buen ajuste, sin embargo, un análisis específico en el que se relacionaron las diferencias

**Tabla 7.** Relación entre el ONI (Índice Oceánico El Niño) e índices climáticos (ventanas móviles de tres, seis y 12 meses) con rezagos de tiempo de cero a tres meses.

Índice	Fuente	Correlación de Pearson			
		Rezago 0	Rezago 1 mes	Rezago 2 meses	Rezago 3 meses
SPL_3	Estaciones	-0,35	-0,34	-0,32	-0,29
SPL_6		-0,46	-0,42	-0,37	-0,32
SPL_12		-0,40	-0,35	-0,29	-0,23
SPEI_3	Bases de datos satelitales	-0,51	-0,53	-0,54	-0,52
SPEI_6		-0,55	-0,59	-0,62	-0,62
SPEI_12		-0,41	-0,50	-0,55	-0,61
anom3	Estaciones	-0,45	-0,44	-0,42	-0,40
anom6		-0,54	-0,52	-0,49	-0,46
anom12		-0,58	-0,57	-0,55	-0,51
tmin_anom3		0,27	0,22	0,17	0,12
tmin_anom6		0,25	0,21	0,16	0,11
tmed_anom3		0,57	0,52	0,45	0,38
tmed_anom6		0,57	0,51	0,44	0,37
tmax_anom3		0,60	0,56	0,50	0,44
tmax_anom6		0,62	0,57	0,50	0,43

entre los frutos estimados y el conteo manual, muestra la existencia de un sesgo en el que el método Croppie® subestima el valor y es consistente que a medida que crece la magnitud de la diferencia el sesgo aumenta (Figura 9).



**Figura 3.** Desempeño (Skill RMSE) los modelos ECMWF, CMCC, DWD, NCEP y del Modelo Multi-ensamble (MME) de precipitación a nivel trimestral.

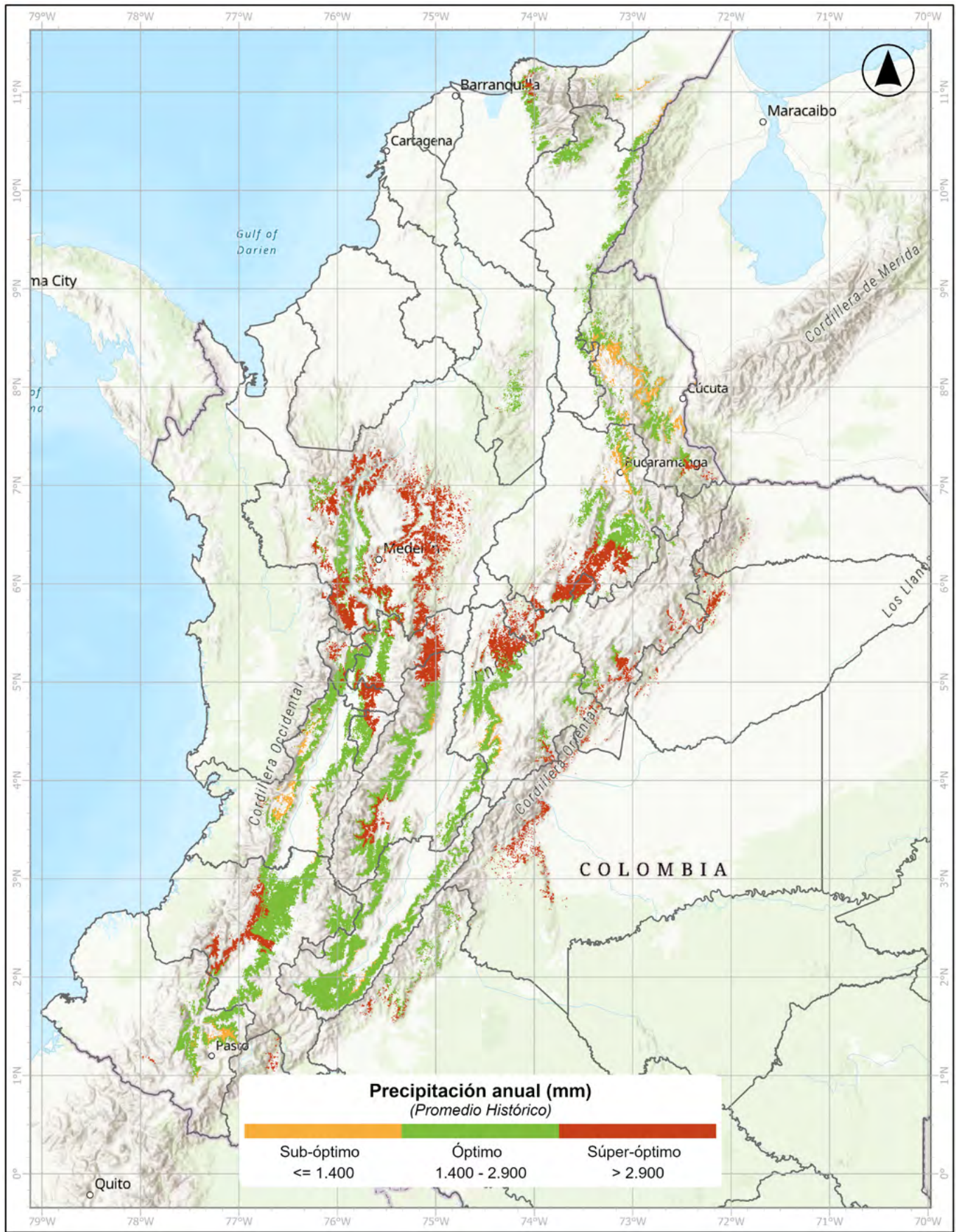


Figura 4. Rangos de distribución de la precipitación anual acumulada – mm.



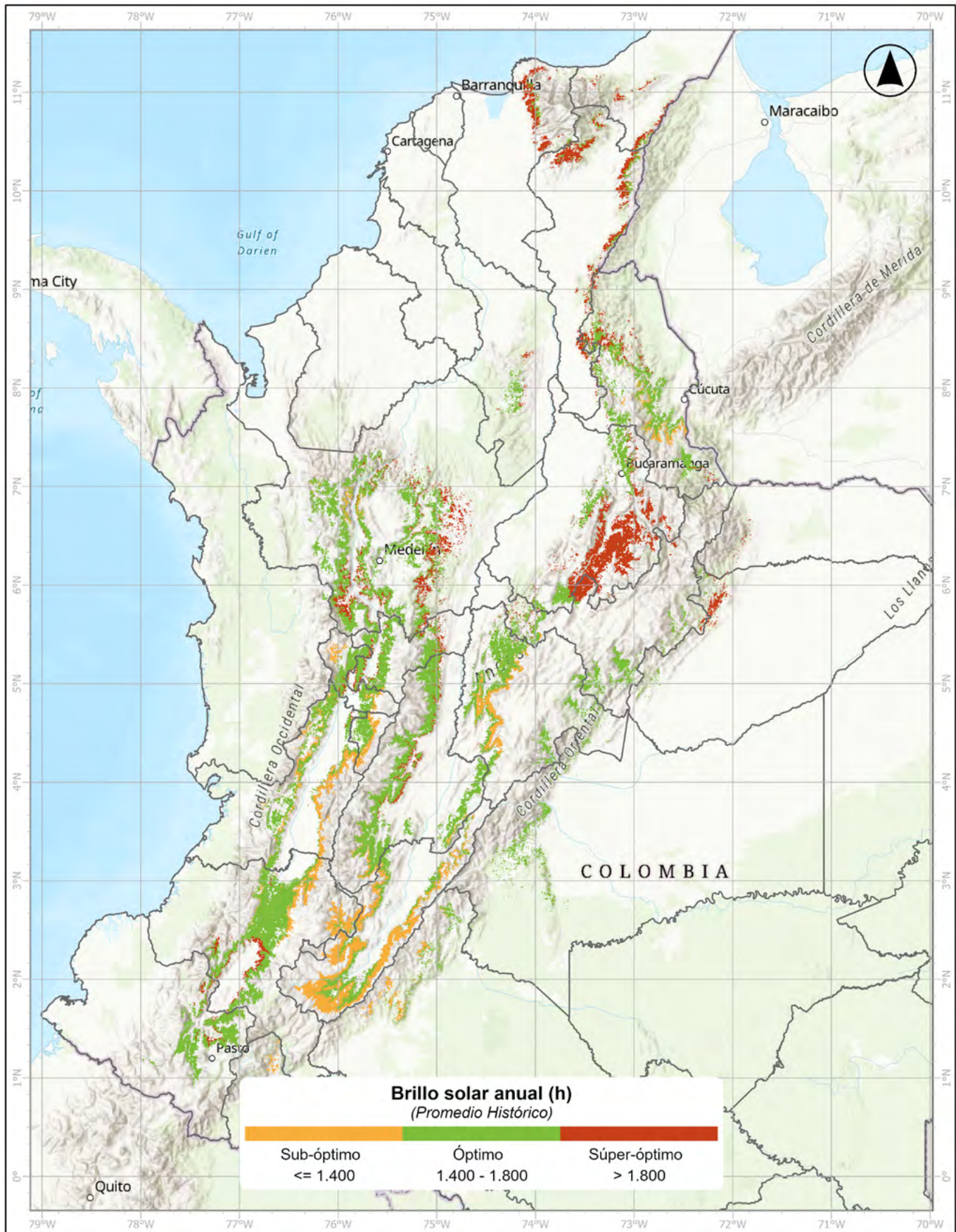


Figura 5. Rangos de distribución del brillo solar anual acumulado – horas.

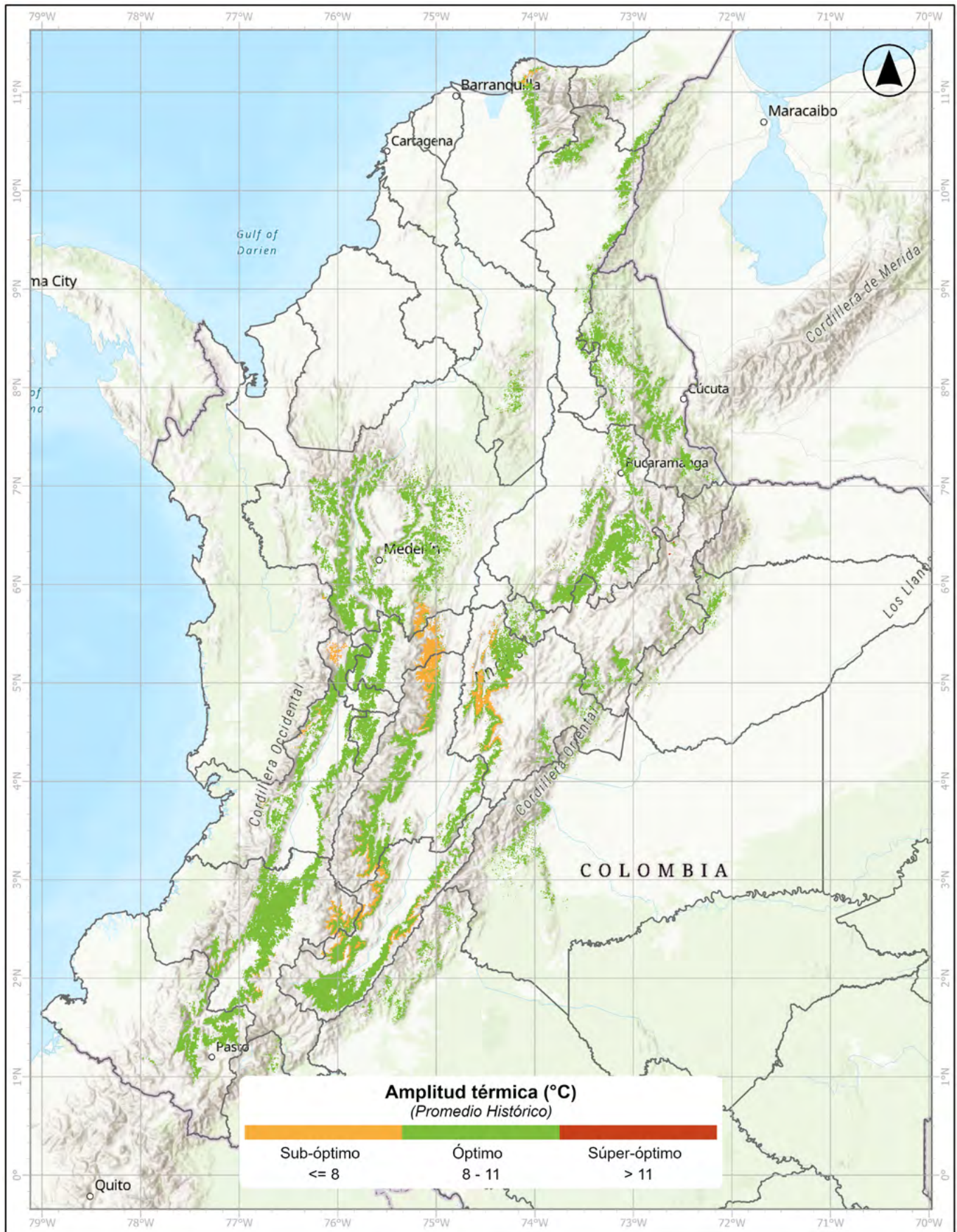


Figura 6. Rangos de distribución de la amplitud térmica-°C.

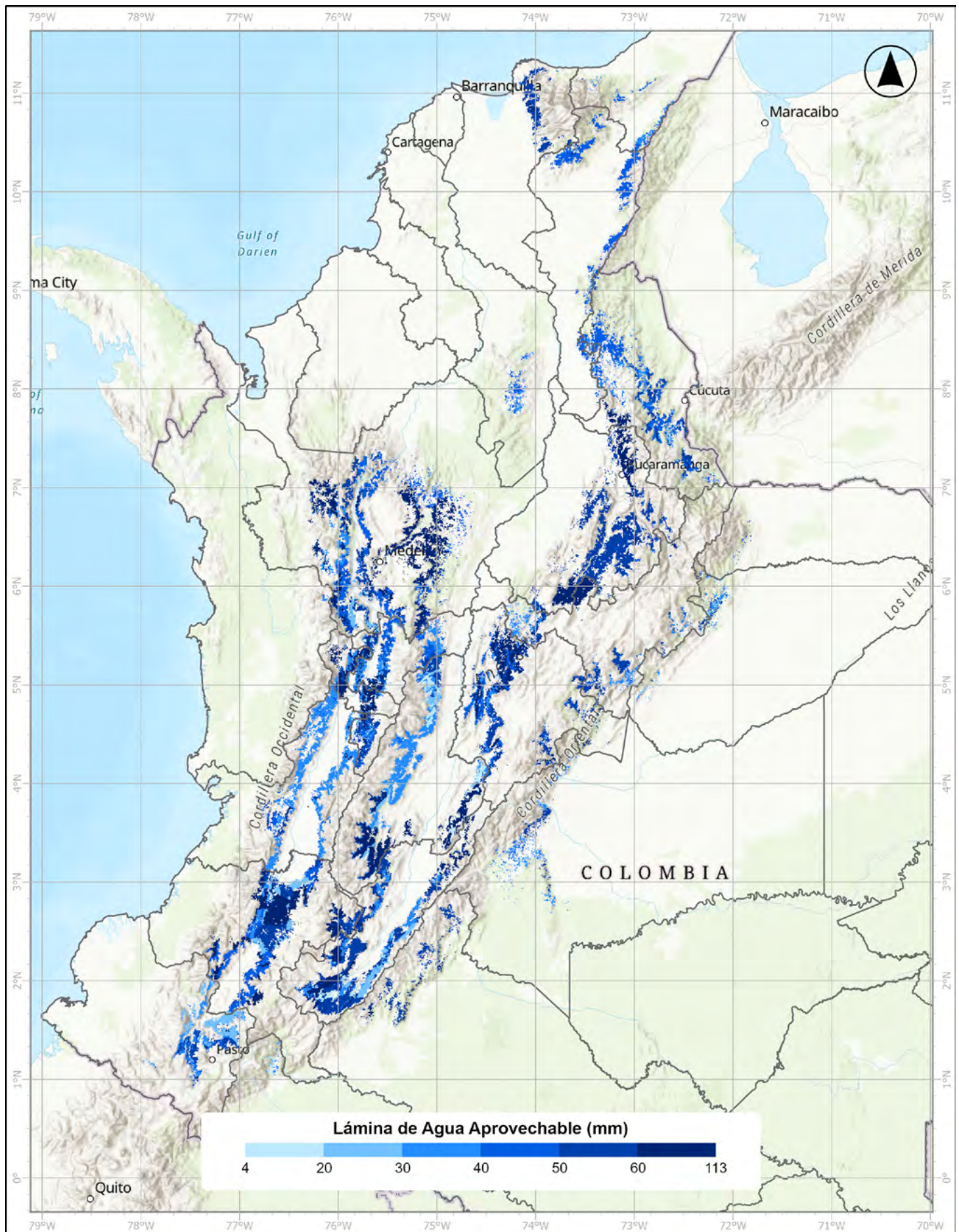
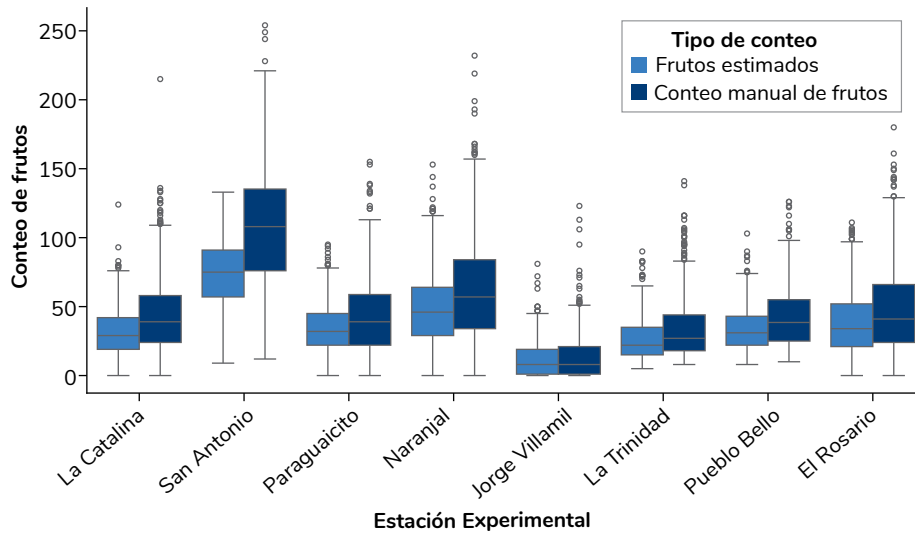
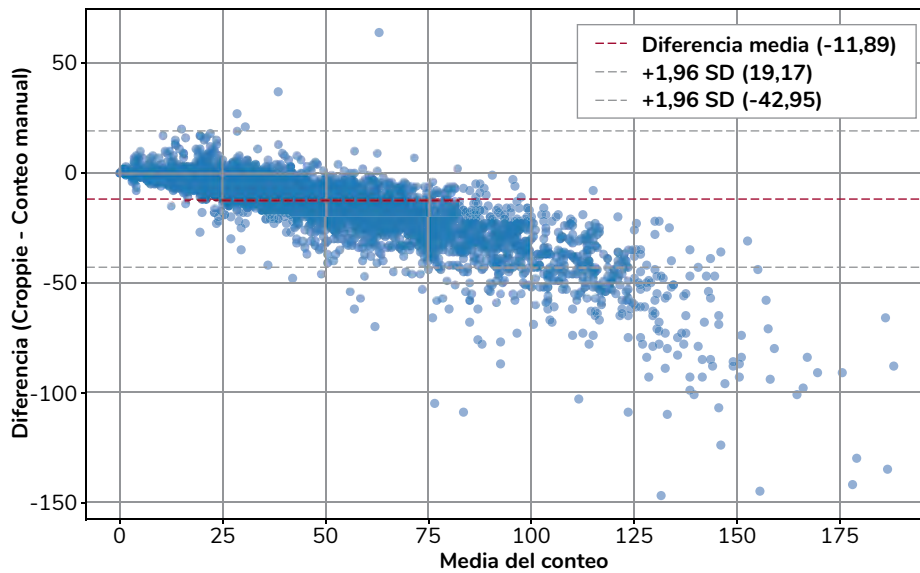


Figura 7. Lámina de agua aprovechable (mm) en la zona cafetera colombiana, calculada para una profundidad de 30 cm.



**Figura 8.** Distribución del conteo de frutos por Estación Experimental. Gráfico obtenido con asistencia de Inteligencia Artificial.



**Figura 9.** Dispersión de las diferencias entre los métodos de estimación Croppie® y conteo manual sobre un tamaño de muestra de 5.389 ramas. Gráfico obtenido con asistencia de Inteligencia Artificial.