



Comportamiento sumidero o emisor de carbono de un sistema de café a libre exposición

Juan Carlos García López
Agroclimatología



Contenido

The background of the slide is a photograph of a lush green hillside. In the foreground, there are rows of tea plants. In the middle ground, a tall metal research station tower stands on a hillside. The sky is filled with white and grey clouds. The overall scene is a rural, agricultural landscape.

1. Introducción

2. Conceptos generales

3. Metodología

4. Clima en la estación Paraguaicito

5. Balances de agua y energía

6. Intercambio de CO_2

7. Relación entre métodos

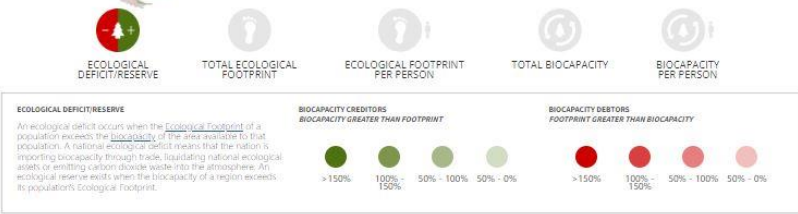
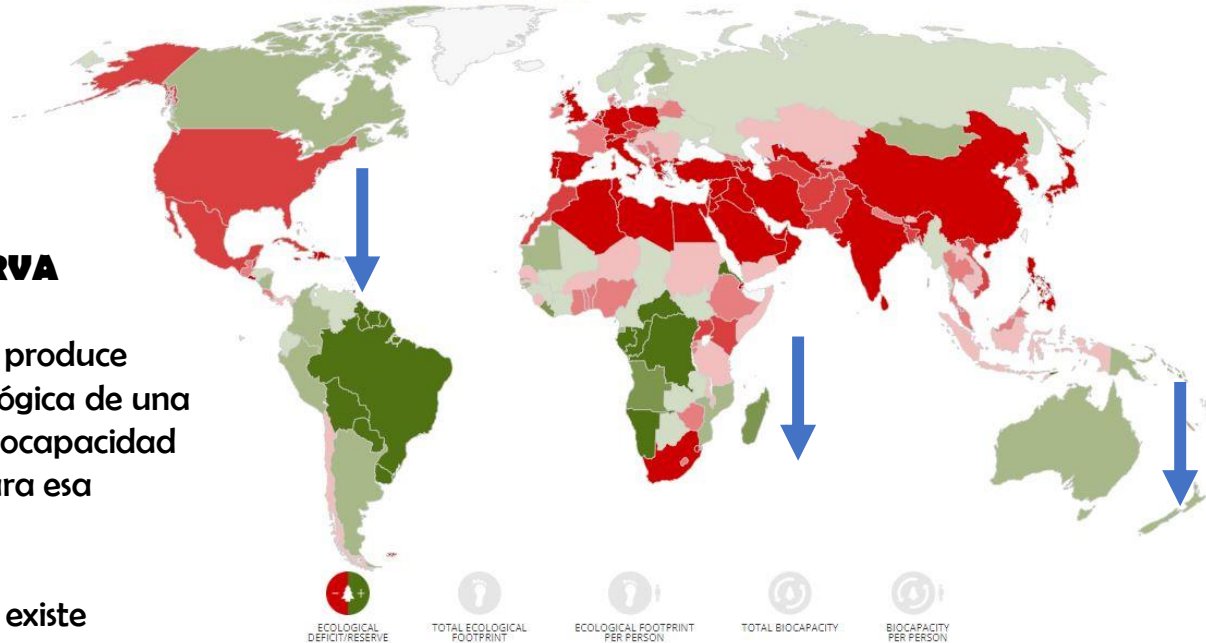
8. Resumen

9. Conclusiones y proyección

DÉFICIT ECOLÓGICO/RESERVA

Un déficit ecológico se produce cuando la Huella Ecológica de una población supera la biocapacidad del área disponible para esa población.

Una reserva ecológica existe cuando la biocapacidad de una región excede la Huella Ecológica de su población.



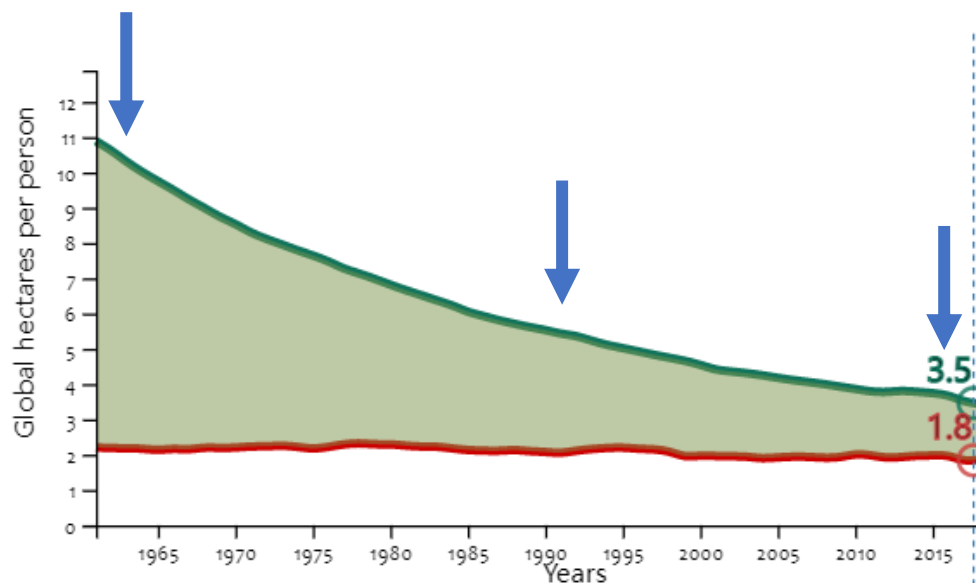
Biocapacity per person [?] **3.5** gha **-** Ecological Footprint per person [?] **1.8** gha **=** BIOCAPACITY RESERVE(+)/DEFICIT(-) [?] **1.7** gha

Ecological Footprint and
Biocapacity
From 1961 to 2018

Ecological
Footprint per
person

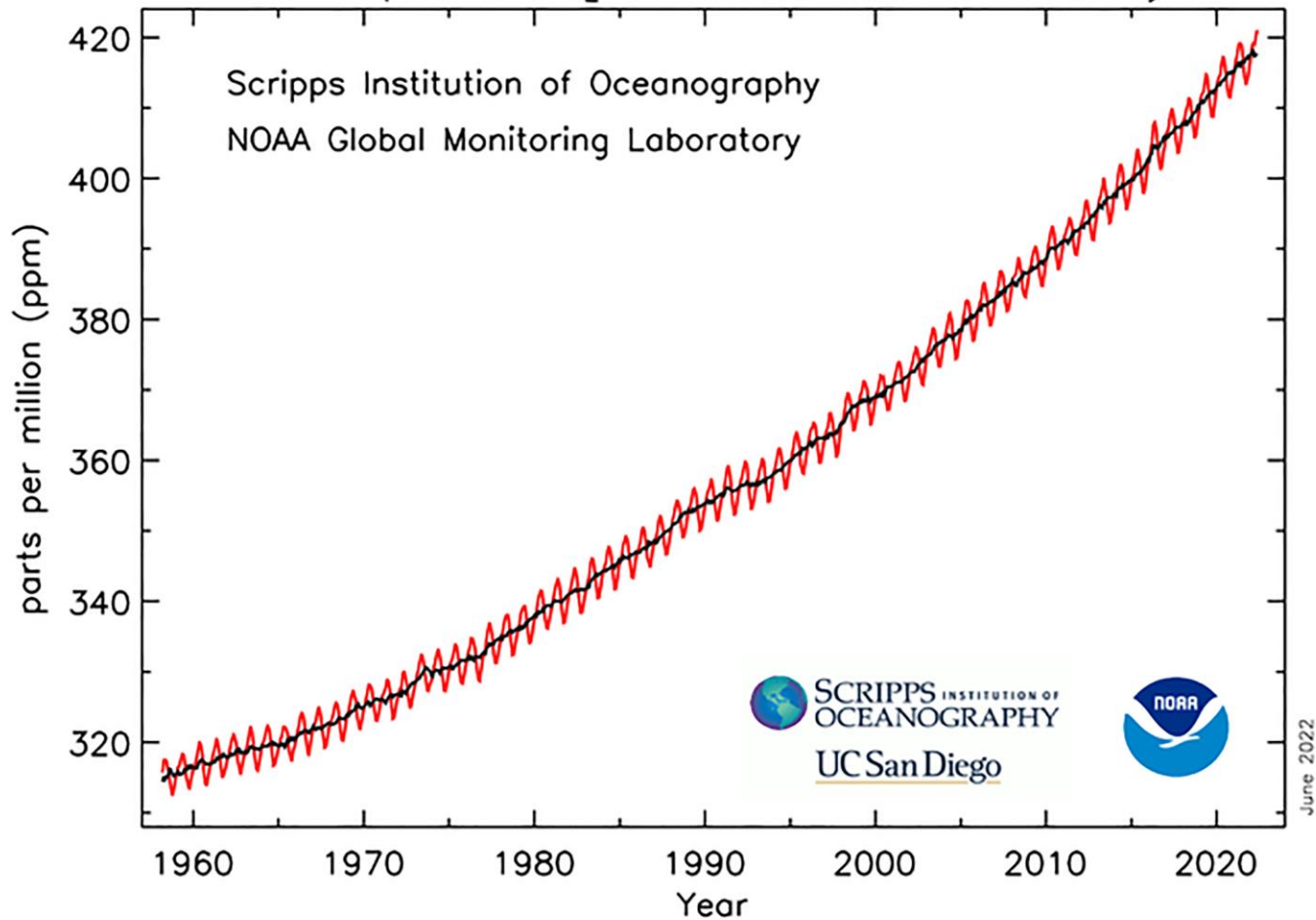
Biocapacity per
person

Learn More



Data Sources: [National Footprint and Biocapacity Accounts 2022 edition \(Data Year 2018\)](#);
GDP, World Development Indicators, The World Bank 2020; Population, U.N. Food and
Agriculture Organization.

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



Algunos conceptos...



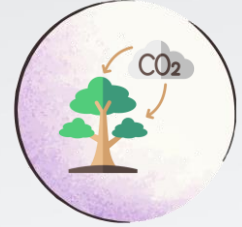
Ecosistema

Servicios ecosistémicos



Flujos de GEI
'antropogénicos'

Dióxido de carbono
(CO₂)



Mitigación



Algunos conceptos...

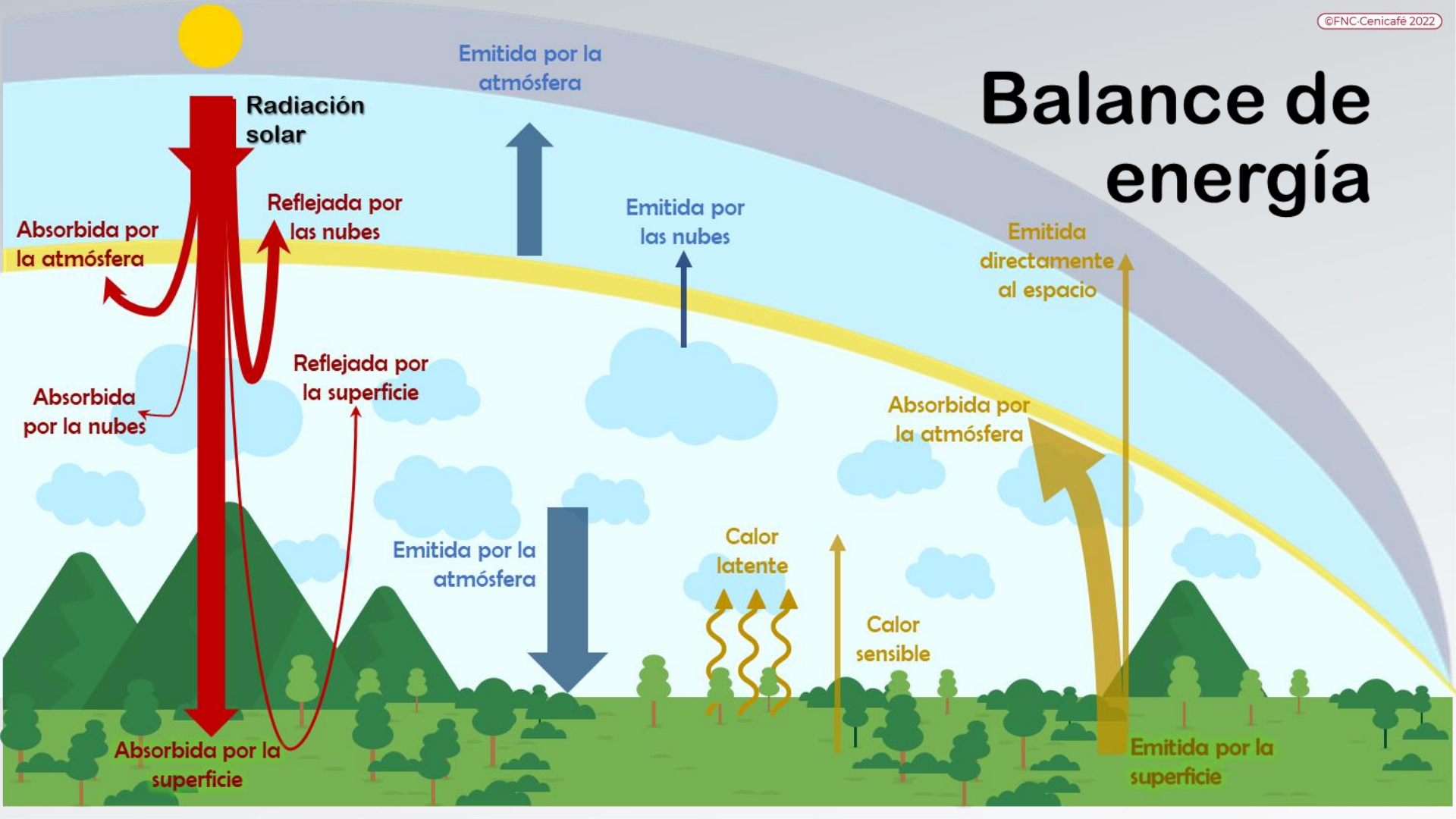


Micrometeorología

Se puede pensar
en estos flujos
como la
respiración del
planeta.

Los ecosistemas **absorben** la **energía del sol** y **absorben** los **gases** y el **agua de la atmósfera**, directamente o a través de las precipitaciones. También **irradian** calor, **devuelven** **agua** a la atmósfera a través de la **evapotranspiración** y **liberan** **carbono** y otros **gases** al aire a través de la **respiración**.

Balance de energía



Balance de energía

Radiación Neta (Rn)

Diferencia entre la radiación incidente y la reflejada

Calor latente de evaporación (LE)

Cantidad de calor necesaria absorbida (o liberada) al evaporarse (o condensarse) una unidad de masa de agua.

Calor sensible (H)

Calor absorbido o transmitido por una sustancia en el curso de un cambio de temperatura, que no se acompaña de un cambio de estado.

Calor del suelo (G)

Es calor sensible, pero se mueve principalmente por conducción

Componentes intercambio gaseoso

Evapotranspiración (ET): procesos por los que se efectúa la transferencia de agua de la superficie terrestre a la atmósfera.

Evapotranspiración de referencia (ET_o - mm): ET de un cultivo hipotético, en este caso una gramínea, que crece activa y uniformemente en un área extensa.

Evapotranspiración de un cultivo (ET_c - mm): evapotranspiración cuando el cultivo se desarrolla en un terreno extenso, con las prácticas de manejo adecuadas

Coefficiente del cultivo (K_c - adimensional): diferencias en la vegetación del cultivo y en la resistencia aerodinámica, con respecto al cultivo de referencia.



$$ET_c = K_c * ET_o$$

ET del cultivo = **K_c** * ET de referencia, sensores adicionales en la EC

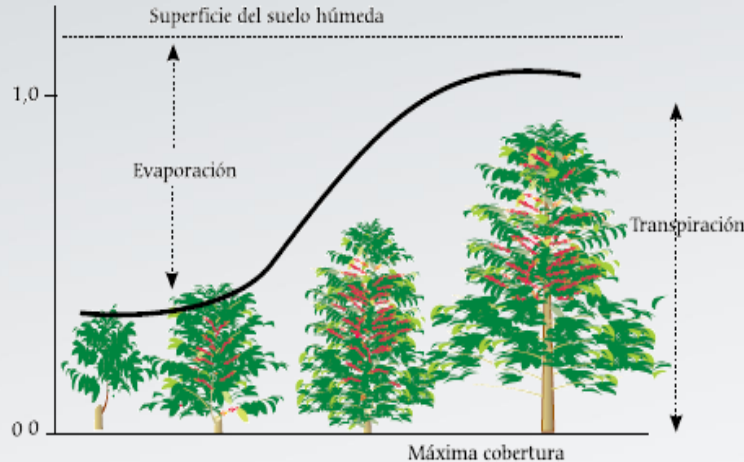
FAO (Allen et al., 2006)

- Método micrometeorológico
"Covarianza de torbellinos" o
"Eddy Covariance – EC"

Coefficiente de consumo

Coefficiente de cultivo

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$



Rn radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

Ra radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s presión de vapor de saturación (kPa)

e_a presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)

Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Antecedentes

Metodologías

FAO, Balance de energía –Riego, Balance Hídrico – Riego, Lisimetría, Tensiómetros –Riego

Variedades de Café

- Catuaí amarillo y rojo
- IAPAR 59
- Mundo Novo
- Caturra Rojo

Densidad

3000 a 7620
plantas/ha

ET_o

0,5 – 6,79 mm/día

ET_c

0,8 – 5,55 mm/día

K_c

Etapa vegetativa:
0,16 – 0,87
Etapa reproductiva:
0,6 – 1,5

Autores

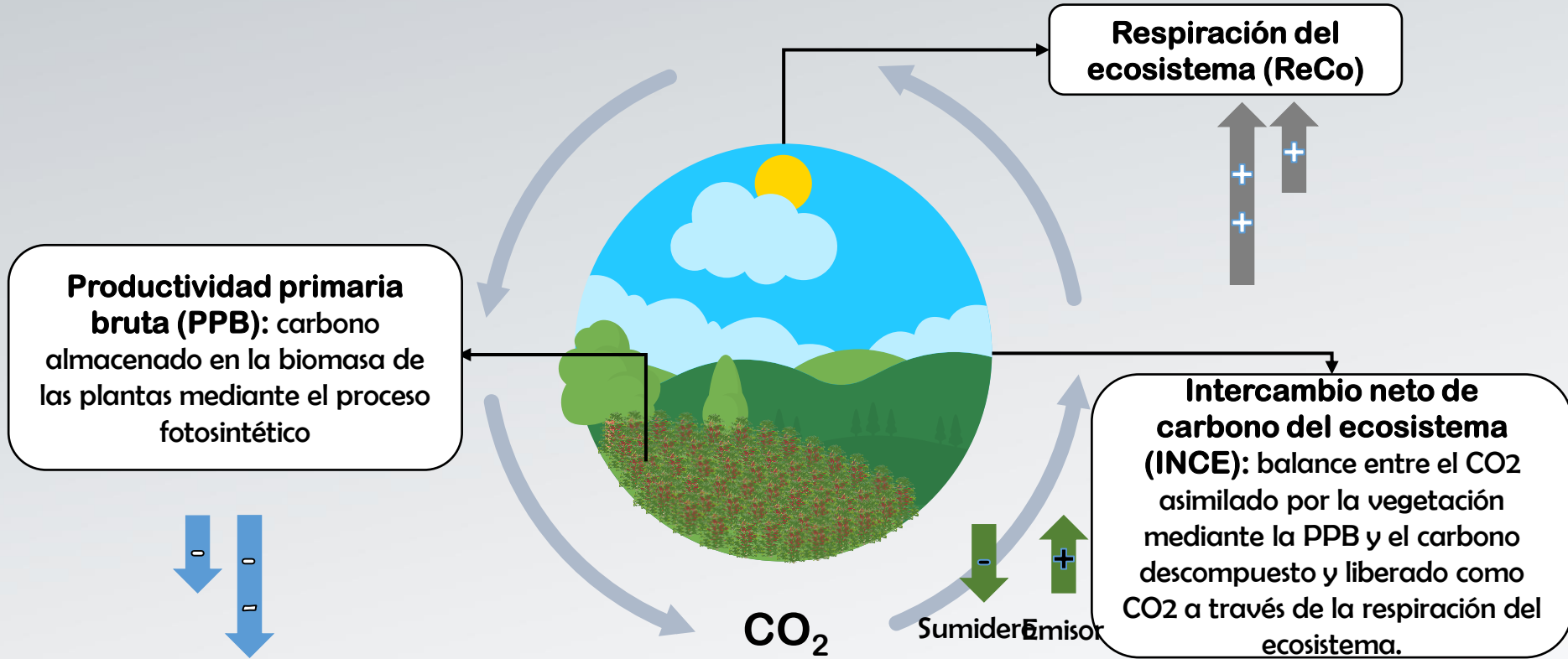
Allen et al., 2006; Marin et al., 2005; Gutiérrez et al., 1994; Antunes et al., 2000; Flumignan et al., 2011; Flumignan et al., 2011; Pereira et al., 2011; Sato et al., 2007; Silva et al., 2006; Cisneros et al., 2015; Oliveira et al., 2003

Antecedentes

Maíz

Metodología	Fase del cultivo	Kc	Fuente
		adimensional	
FAO	Kc-media	1.2	Allen et al., 2006
	Kc-final	0.6-0.3	
EC - Riego	Kc-inicio	0.30 - 0.40	Facchi et al., 2013
	Kc-media	0.96 - 1.02	
	Kc-final	0.89 - 0.35	

Componentes del balance de carbono



Antecedentes

Fijación media de carbono
(Ton·ha⁻¹·año⁻¹) en cafetos y árboles del dosel
de sombra en sistemas de producción de café (Fuente: Andrade et al., 2014)

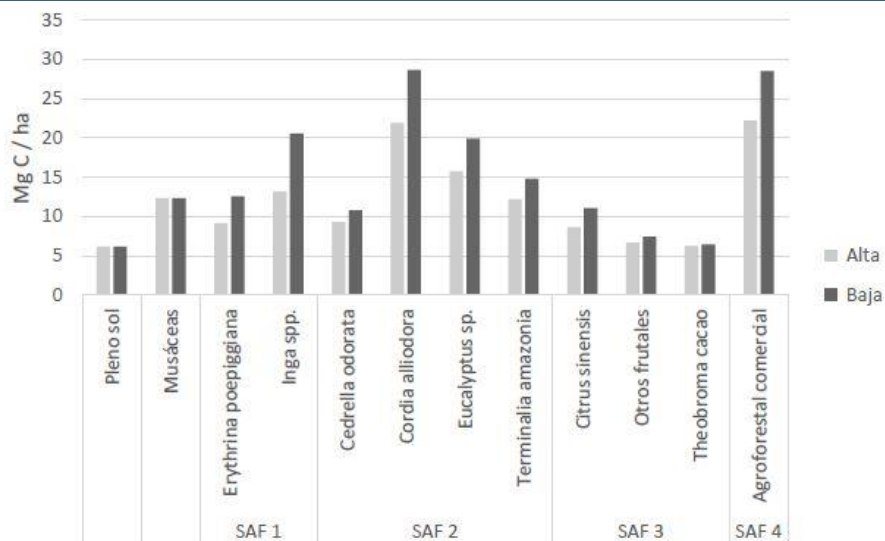
Sistemas	Cafetos	Árboles	Total
Monocultivo	0,63		0,63
SAF con nogal	0,8	3,57	4,37
SAF con caucho	0,37	1,2	1,57

Sistemas	Modelo Biomasa aérea (B)	Años
Monocultivo	$\text{Log}_{10} (B) = 1,1 + 1,6 \cdot \text{Log}_{10} (D_{15}) - 0,6 \cdot \text{Log}_{10} (h)$	3,5
SAF con nogal	$B = 10^{(-0,51 + 2,08 \cdot \text{Log} (\text{dap}))}$	8,4
SAF con caucho	$B = 0,36 \cdot \text{dap}^{(2,089)}$	14,6

Fijaciones de carbono (g Co₂ eq ha⁻¹) en un cultivo de café variedad Castillo de cinco años (Fuente: Lagos et al., 2021)

Componentes	Promedio (cuatro municipios de Nariño)	g C ha ⁻¹	Ton C ha ⁻¹
Café sin sombrío	433,5	118,1	1,2
Café con sombrío de guamo	13583,3	3701,2	37,0
Café con sombrío de carbonero	9001,6	2452,8	24,5

Ecuación alométrica	Especie	Observación	Fuente
$BA = (0,1955 * DT^{1,648}) * 1,266$	Café (Coffea arabica L.)	BA= Biomasa aérea (kg/árbol) DT=diámetro del tronco en (cm) medido a 15 cm del suelo.	(Quilio et al. , 2010)
$BA = 0,01513 * D^{3,0054}$	Guamo (Inga sp.)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Quilio et al. , 2010)
$BA = EXP (-1,8656 + (2,3733 * LN(D)))$	Carbonero (Albizia carbonaria Britton.)	D=diámetro a 1,30 m (DAP)	(Alvarez et al., 2011)

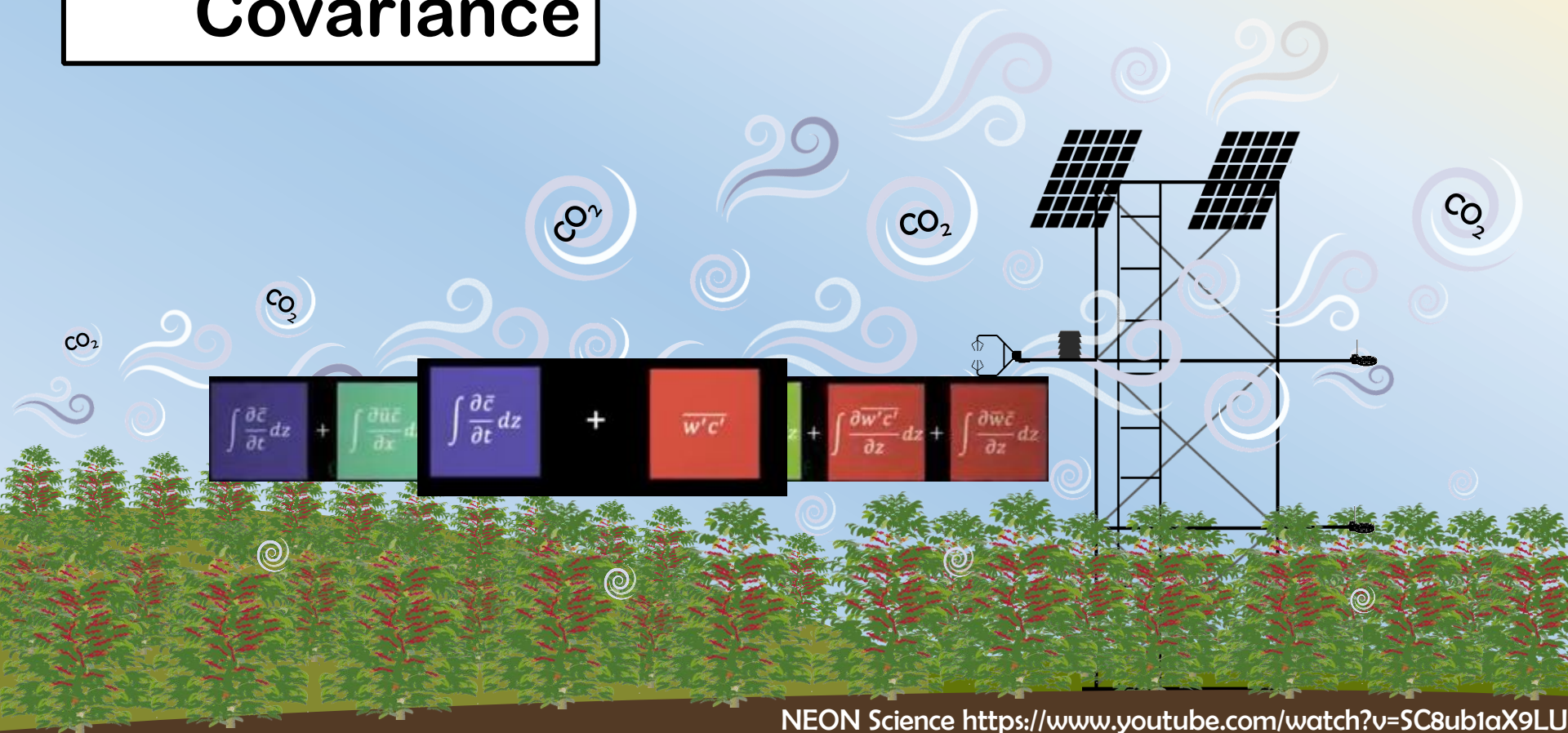


Almacenamiento de carbono para cuatro innovaciones agroforestales con café (carbono encima del suelo y raíces) en Costa Rica (Ovalle, 2016)

Especie	Ecuación alométrica	Fuente
Coffea arabica	$\text{Log } 10 (\text{BT}) = -1.113 + 1.578 * \text{Log } 10 (\text{d15}) + 0.581 * \text{Log}10 (\text{h})$	Segura et al., 2006
Biomasa raíces	$\text{Br} = e^{(-1.0587+0.8836*\text{Ln}(\text{Ba}))}$	Cairns et al., 1997
Inga laurina	$\text{Ln} (\text{Bt}) = 1.17 + 30.78 * \text{dap} - 52.74 + \text{dap}^2$	Salgado, 2010
Terminalia amazonia	$\text{Ln} (\text{Bt}) = 2.24 + 12.12 * \text{dap}$	Salgado, 2010
Eucalyptus deglupta	$\text{Ln MS} = -2.31 + 2.4746 * \text{Ln} (\text{dap})$	Magaña et al., 2004
Cordia alliodora	$\text{B} = 10^{(-0.51 + 2.08 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade. J et al., 2014
Cedrela odorata	$\text{B} = 0.7371 \text{DN}^2 - 15.5533\text{DN} + 94.9946$	Rueda Sánchez et al., 2015
Citrus sinensis	$\text{B} = -6.64 + 0.279 * \text{BA} + 0.000514 * \text{BA}^2$	Schroth et al., 2002
Theobroma cacao	$\text{B} = 10^{(-1.625 + 2.63 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade et al., 2008
Otros frutales	$\text{B} = 10^{(-1.11 + 2.64 * \text{Log} (\text{dap}))}$	Andrade et al., 2008
Musa sp.	$\text{Y} = 0.0303 * \text{D}2.1345$	Espinoza-Domínguez et al., 2012

La tasa de fijación por año se encuentra entre un 0.67 a 3.3 Mg C / ha.

Técnica Eddy Covariance



Condiciones para uso de EC



1
El método de covarianza de torbellinos no es susceptible de medir flujos de plantas o árboles

2

No es hábil para ser utilizado en estudios de pequeña escala (añadir o excluir agua o fertilizar parcelas pequeñas y replicadas)



3

Puede sufrir de errores de sesgo en la noche cuando el aire frío drena CO₂ respirado a depresiones topográficas debido a la advección.





Desarrollo metodológico EC



Estación experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío)

Longitud Oeste $-75,73^{\circ}$ Latitud Norte $4,4^{\circ}$

2.0 Hectáreas

Variedad Castillo Paraguaicito®

1,4 x 1,0 m a libre exposición

Fecha de siembra: junio de 2014 UT Ricclisa

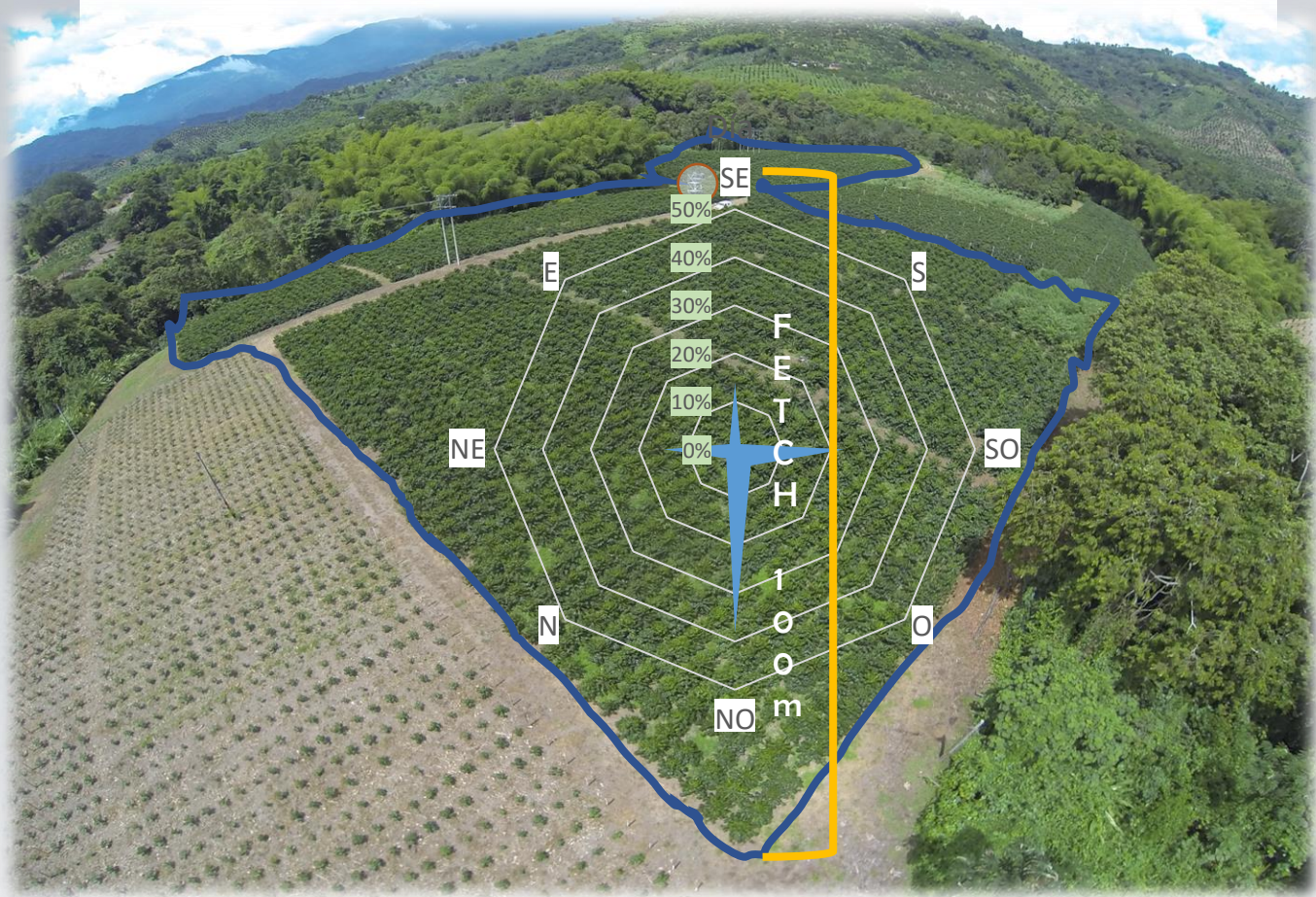
1er Ciclo maíz jun – oct 2014

2do Ciclo maíz nov 2014 – mar 2015

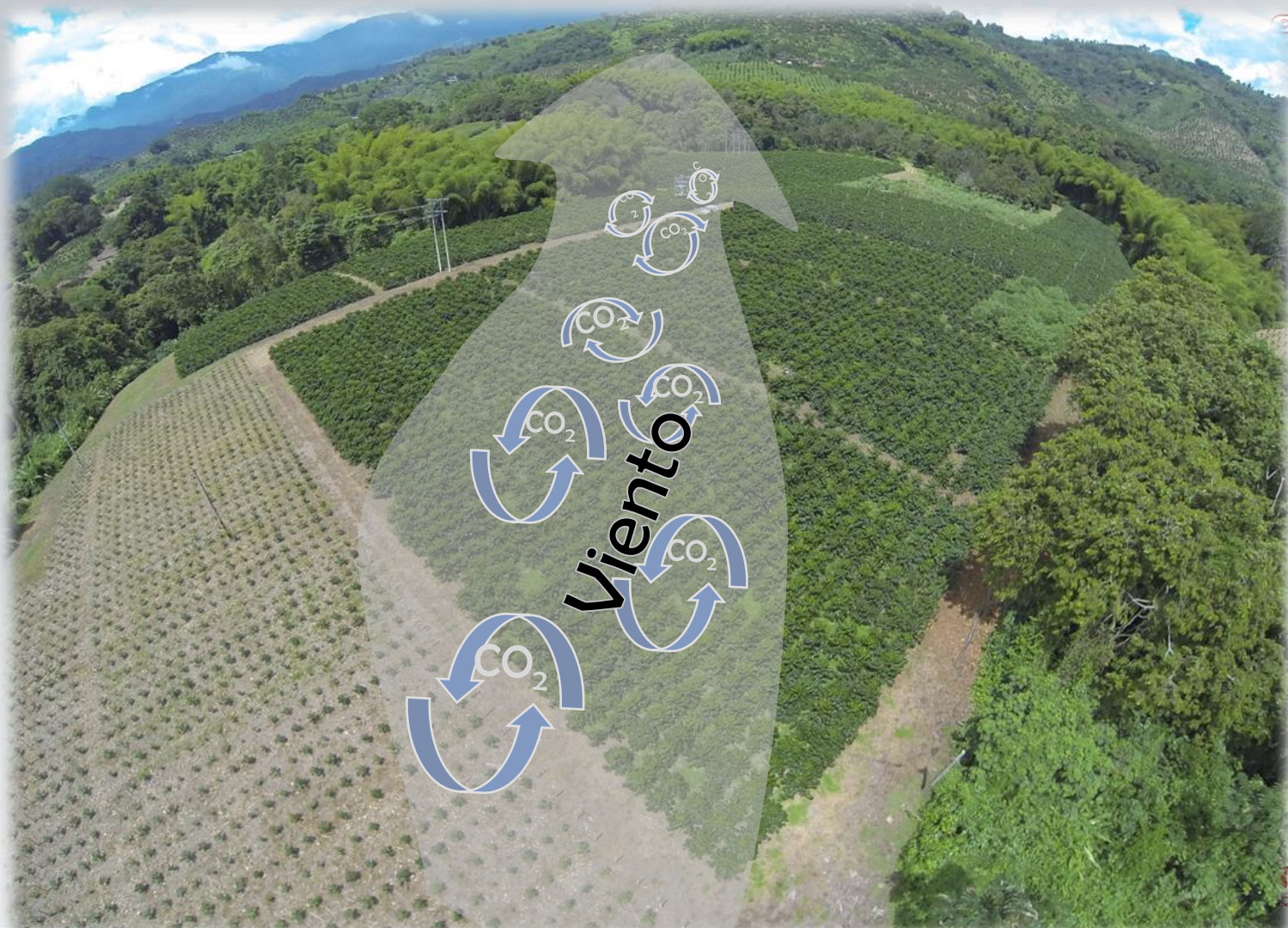
Fecha de zoca: mayo de 2019 ACL103001

1er Ciclo maíz jun – oct 2019

2do Ciclo maíz mar – jul 2020



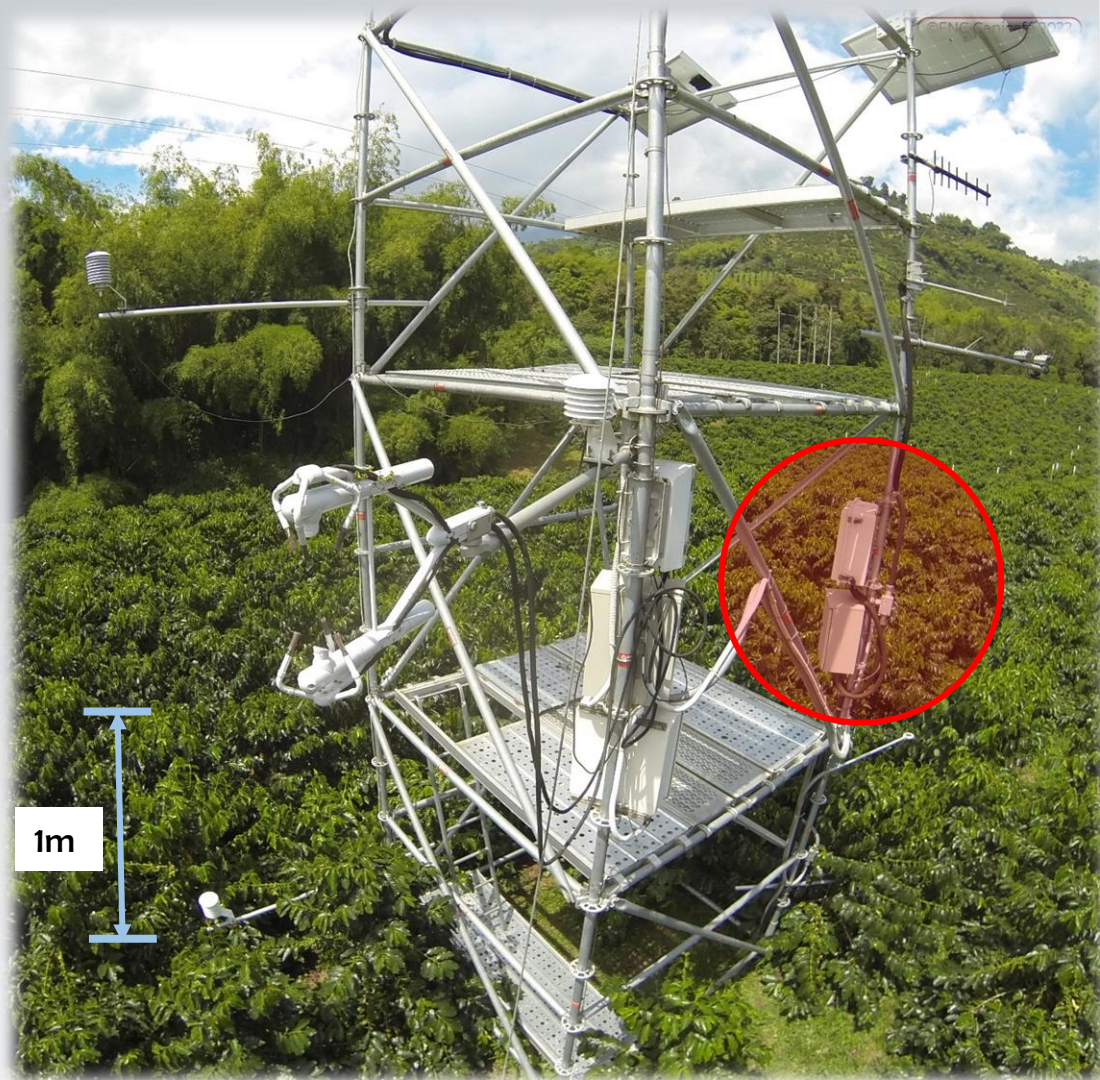
Castano Marín, A. M., Riaño Herrera, N. M., Peña Quiñones, A. J., Ramirez Bules, V. H., Valencia Salazar, A., Figueroa Casas, A., & Góez Vinasco, G. A. (2016). Energy, water vapor and carbon fluxes in Andean agroecosystems: Conceptualization and methodological standardization. *Acta Agronómica*, 66(1). <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.52543>



Componentes Torre Eddy Covariance

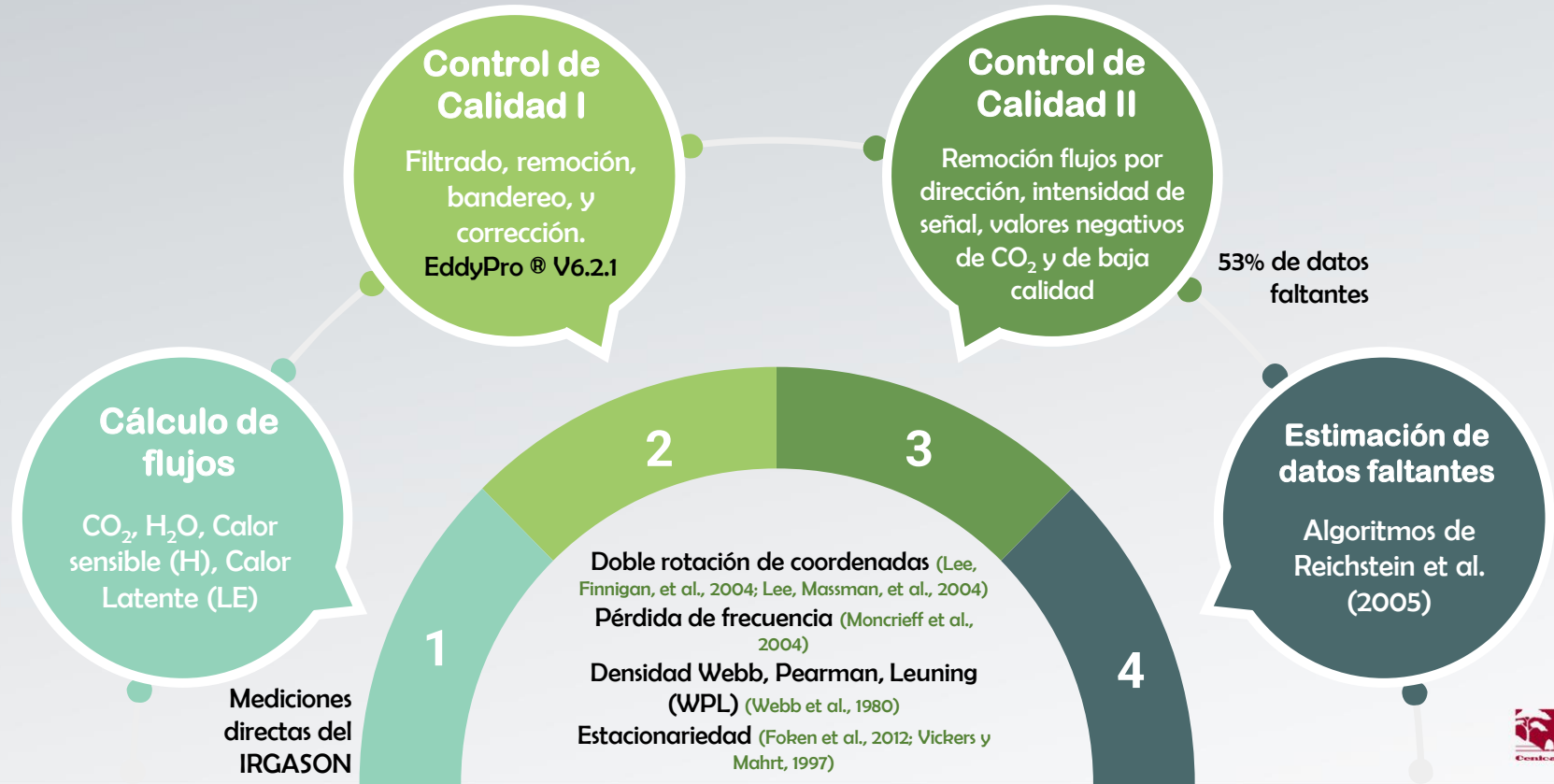


CR3000



1m

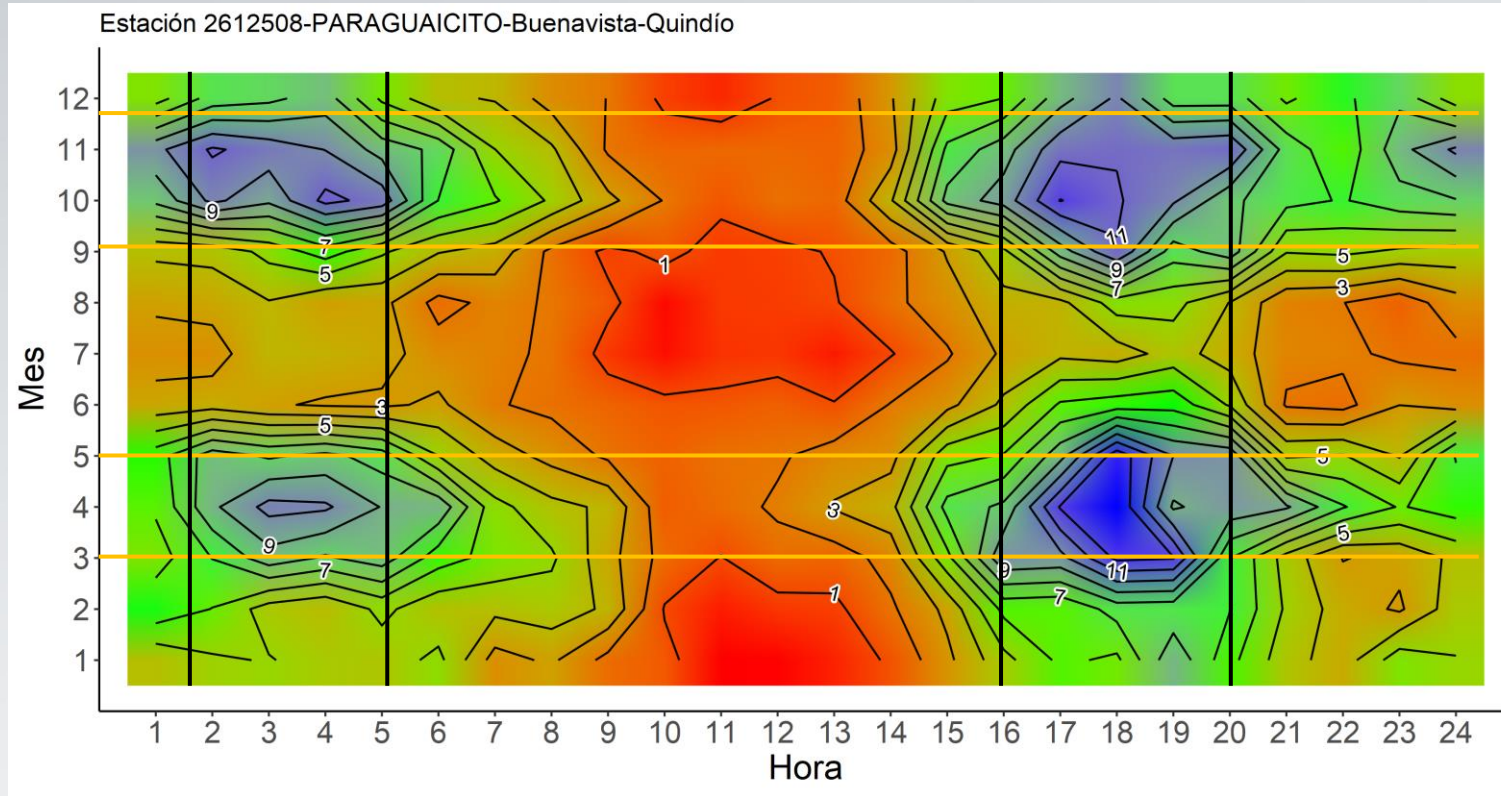
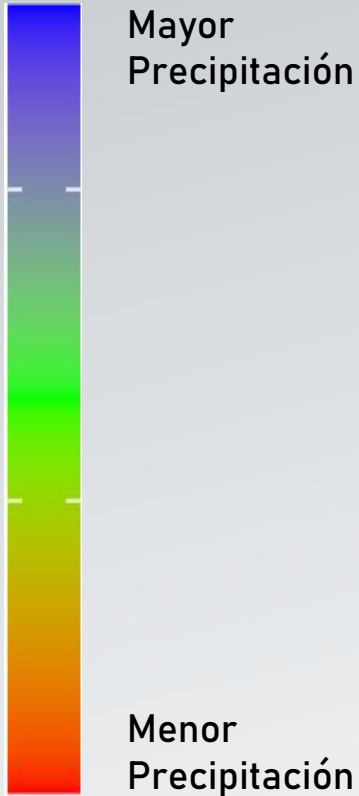
Cálculo de los flujos, control, filtrado y llenado de faltantes

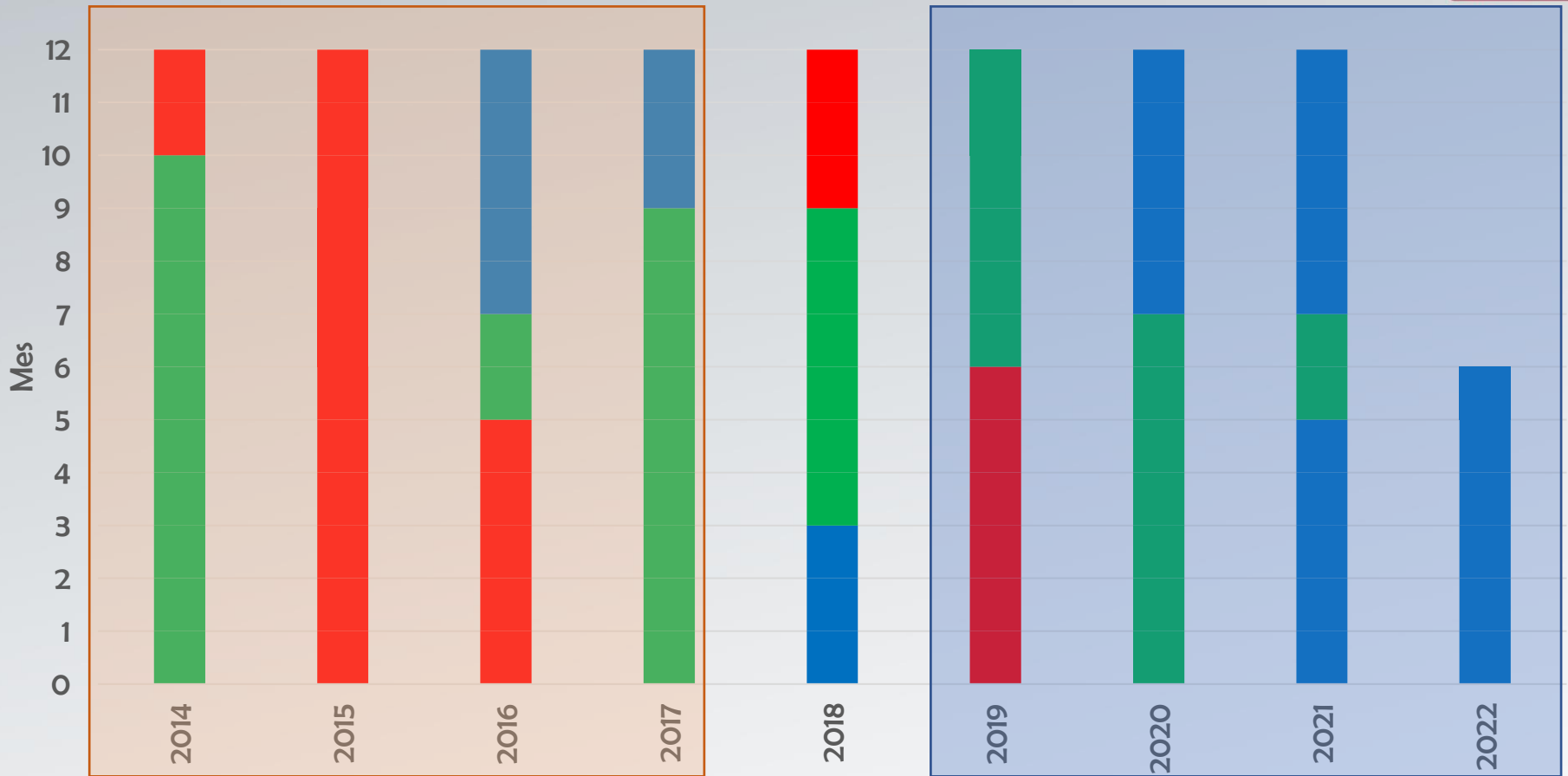


Condiciones meteorológicas presentes durante el desarrollo de las evaluaciones



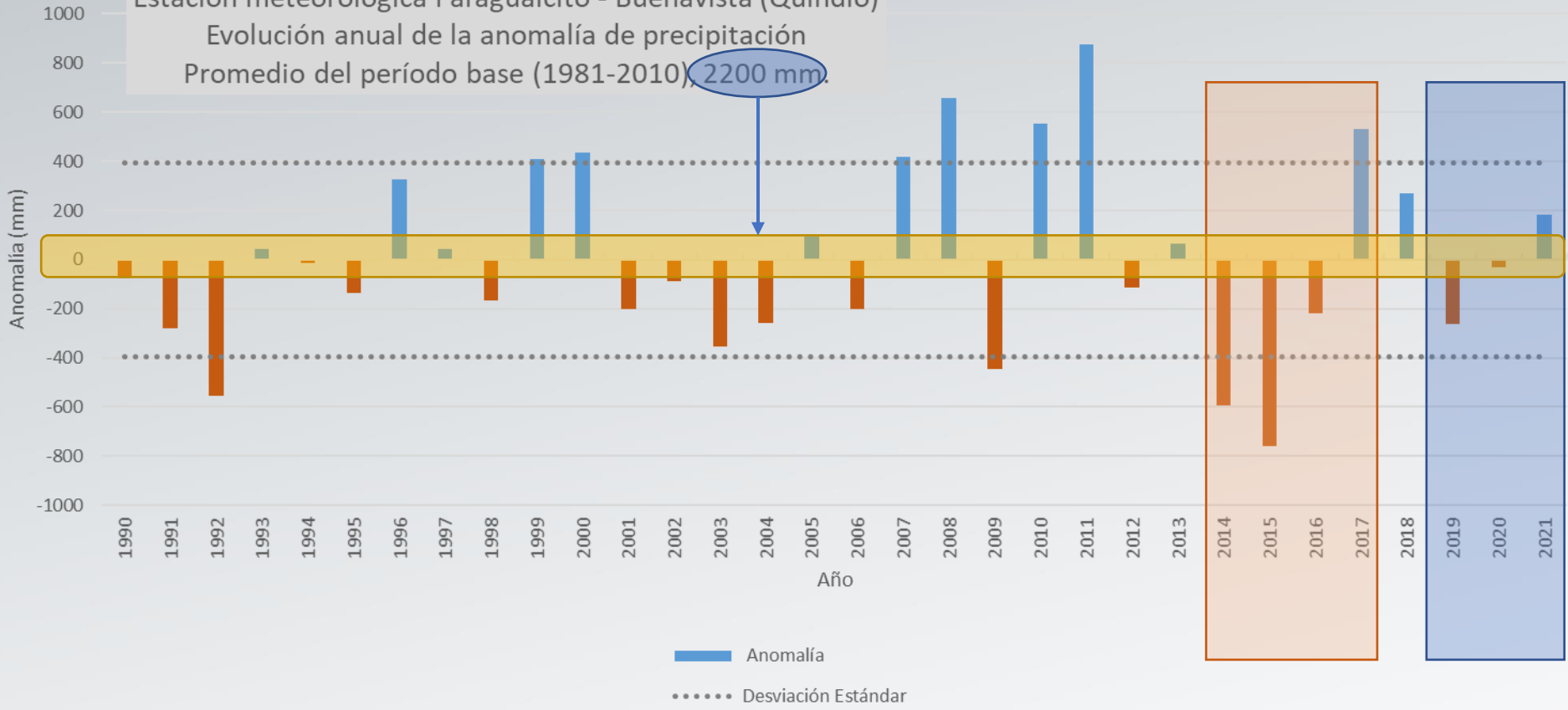
Distribución de la lluvia





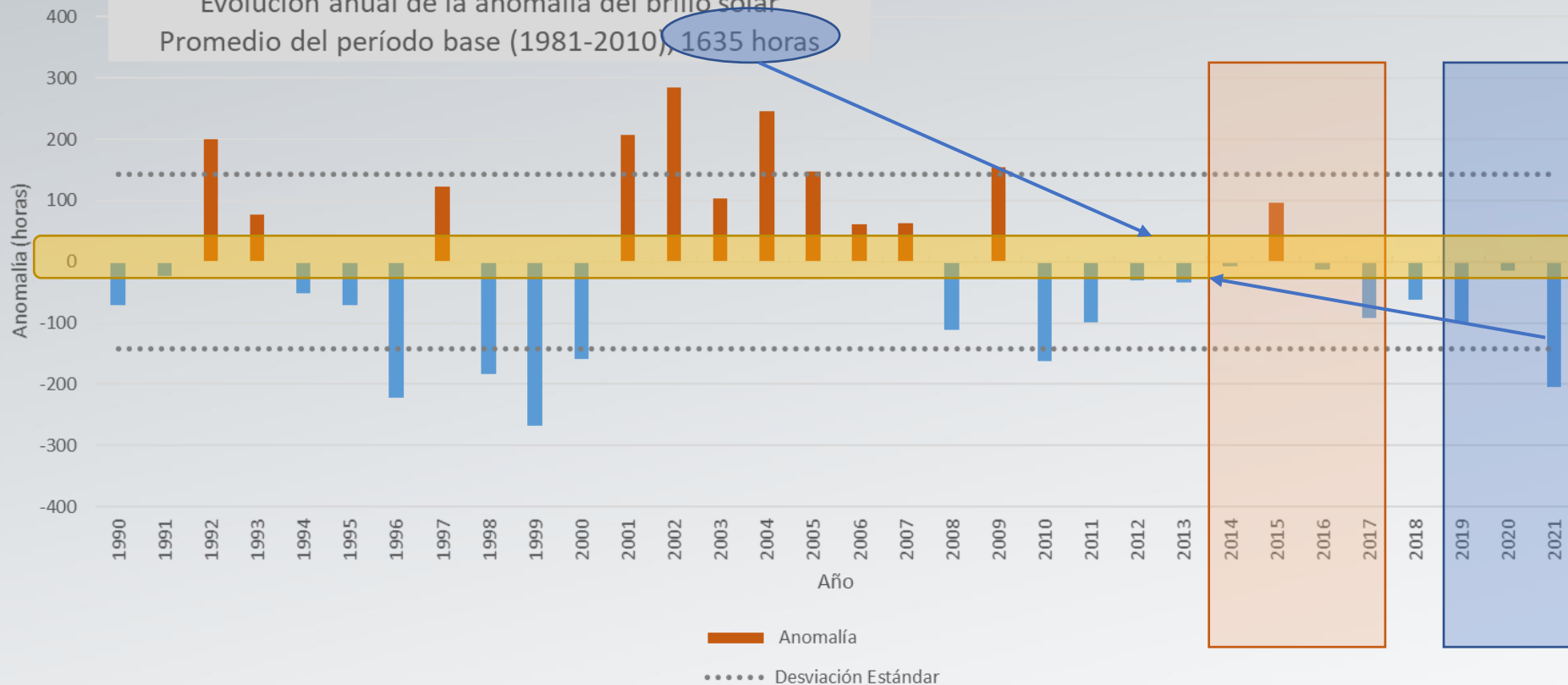
■ - Neutro ■ - El Niño ■ - La Niña

Estación meteorológica Paraguaicito - Buenavista (Quindío)
Evolución anual de la anomalía de precipitación
Promedio del período base (1981-2010), 2200 mm.

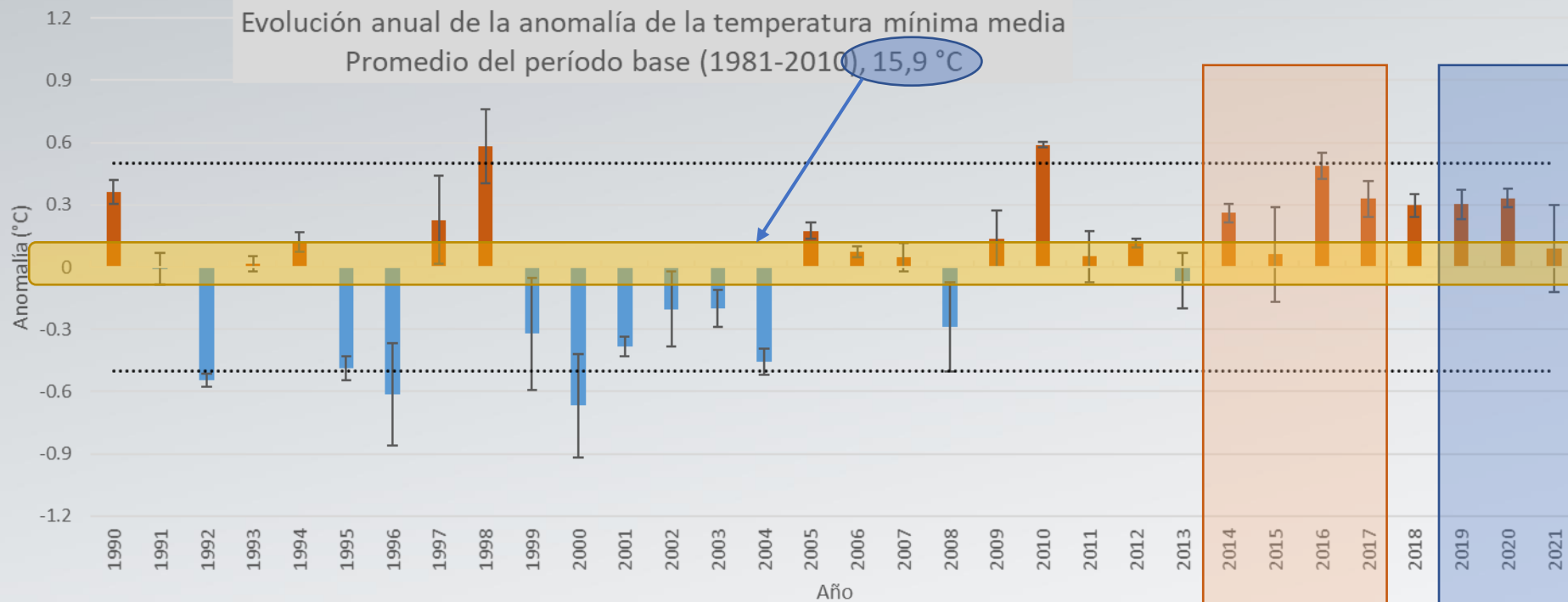


■ Anomalía
..... Desviación Estándar

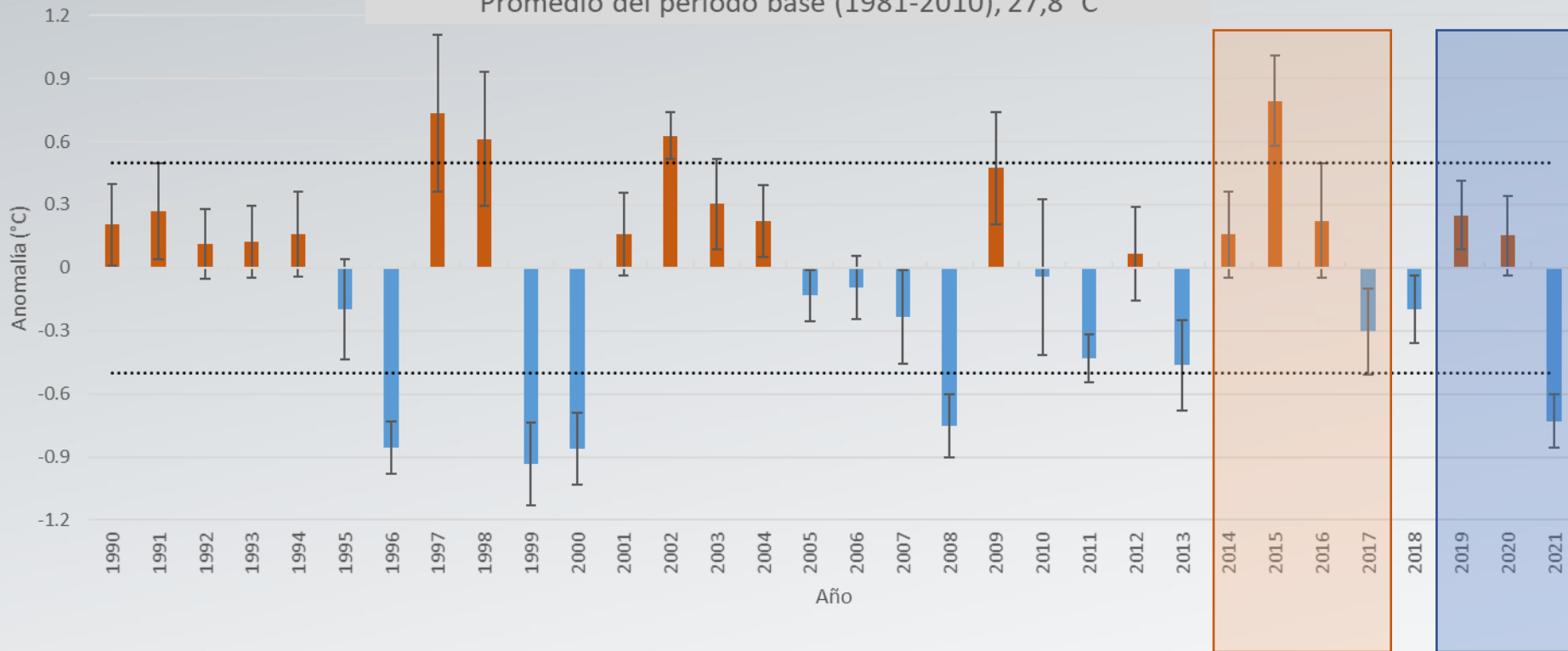
Estación meteorológica Paraguaicito - Buenavista (Quindío)
 Evolución anual de la anomalía del brillo solar
 Promedio del período base (1981-2010), 1635 horas



Estación meteorológica Paraguaicito - Buenavista (Quindío)
 Evolución anual de la anomalía de la temperatura mínima media
 Promedio del período base (1981-2010), 15,9 °C



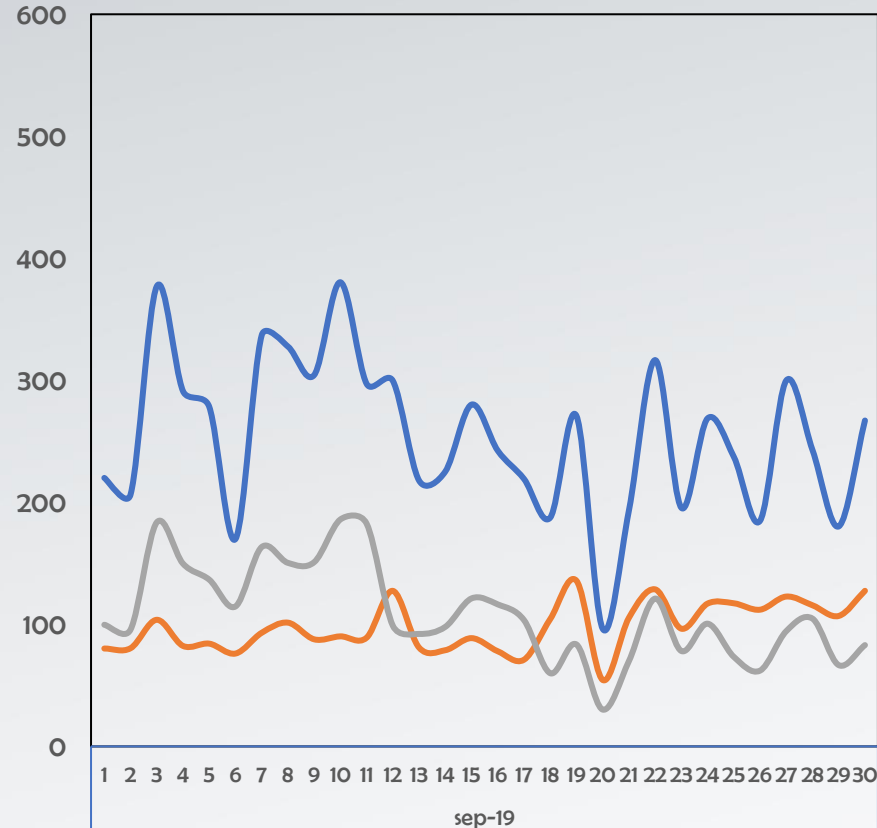
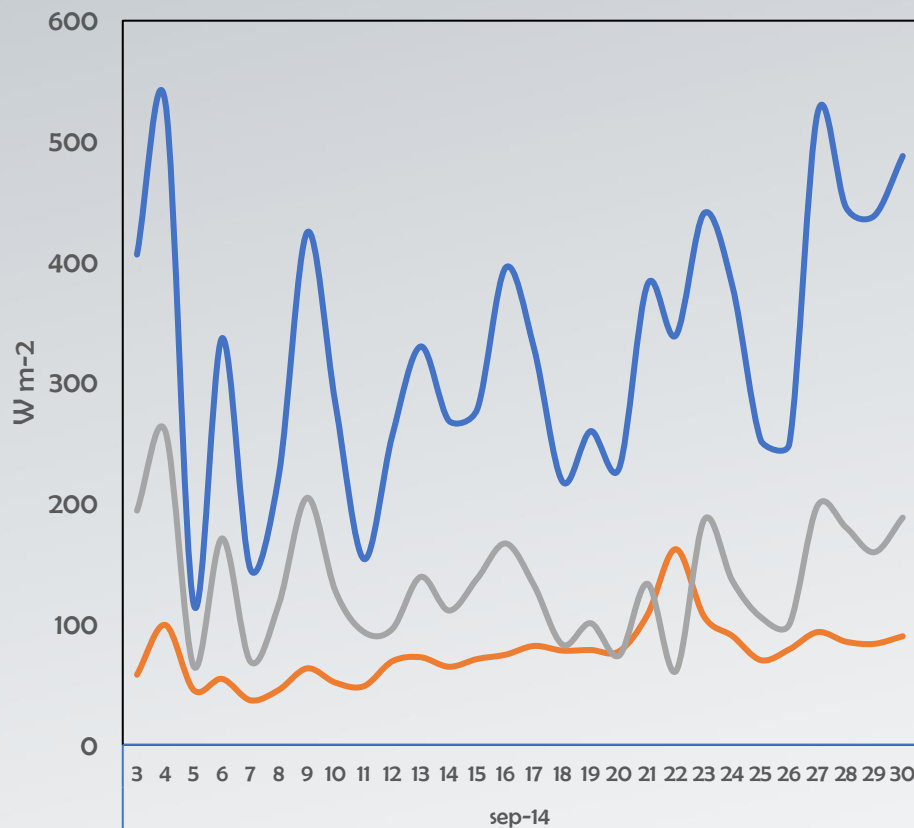
Estación meteorológica Paraguaicito - Buenavista (Quindío)
Evolución anual de la anomalía de la temperatura máxima media
Promedio del período base (1981-2010), 27,8 °C





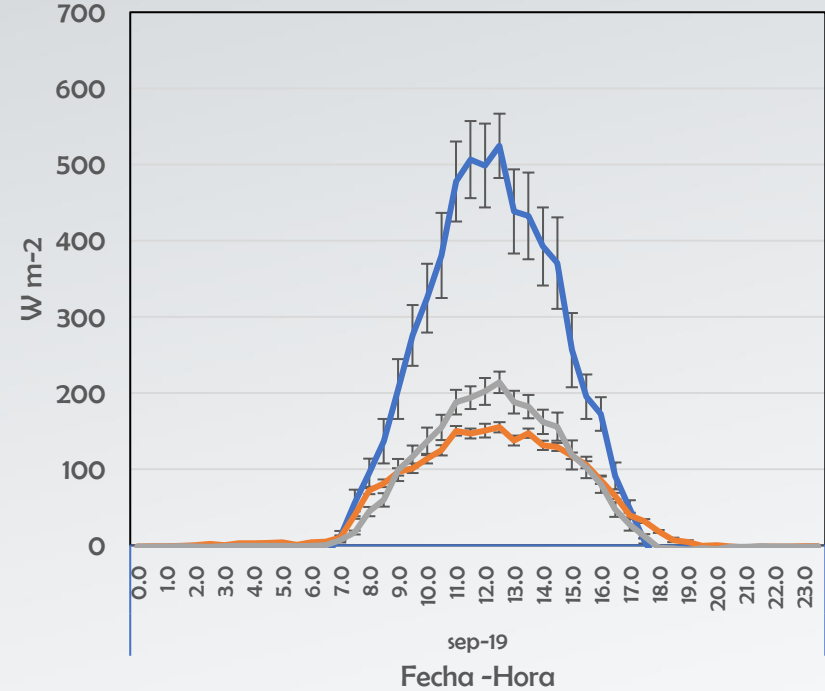
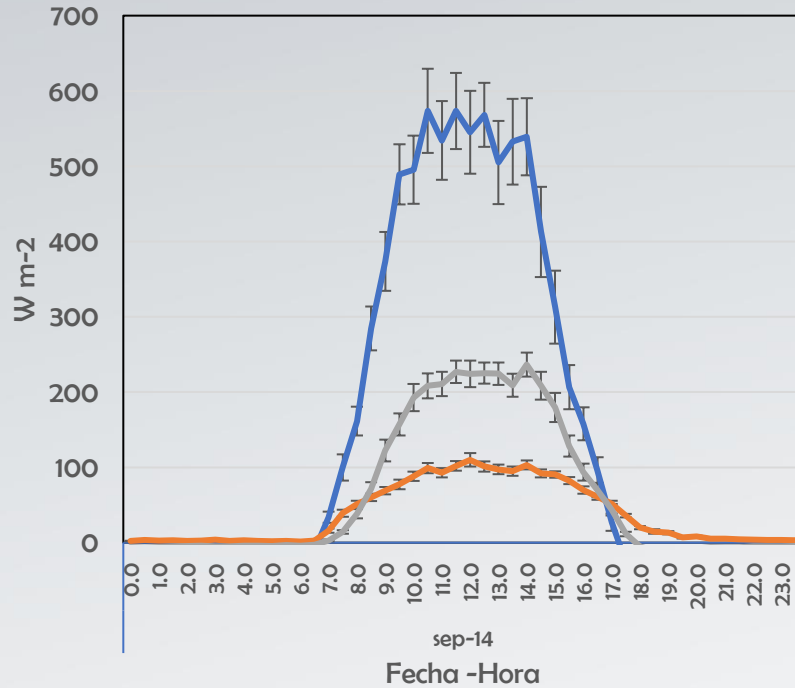
Balances de energía y agua

Flujos de energía



— Radiación Neta — LE — H

Flujos de energía

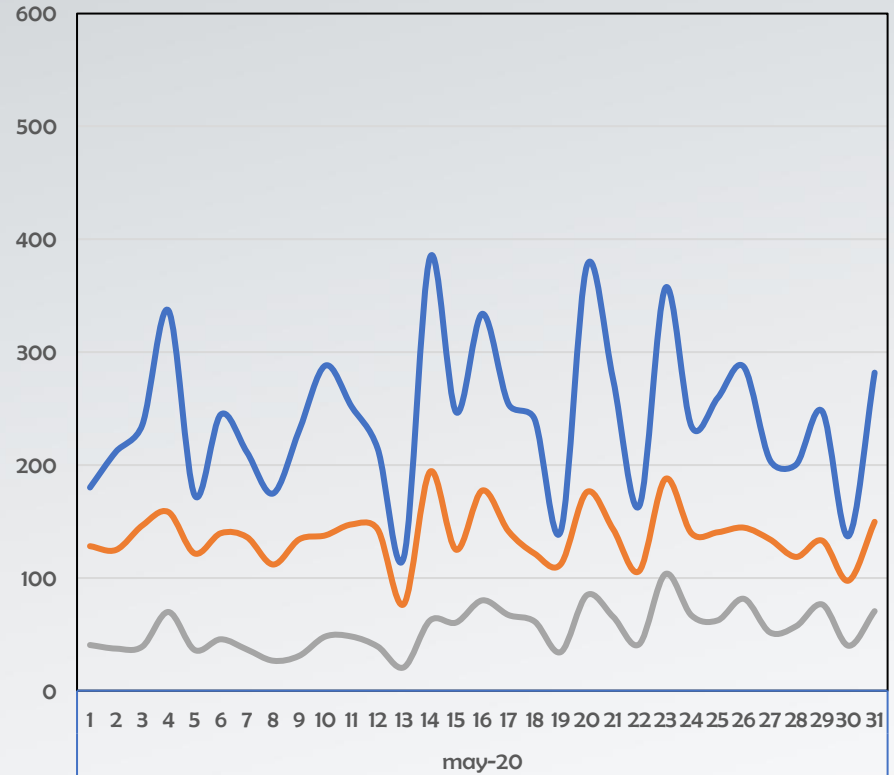
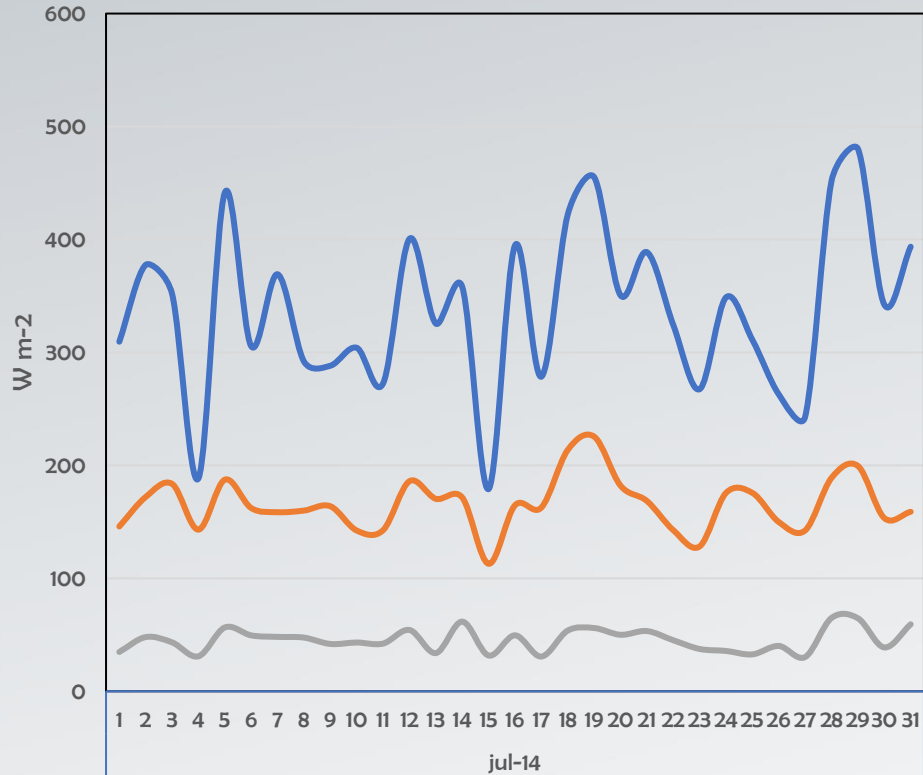


— Radiación Neta

— LE

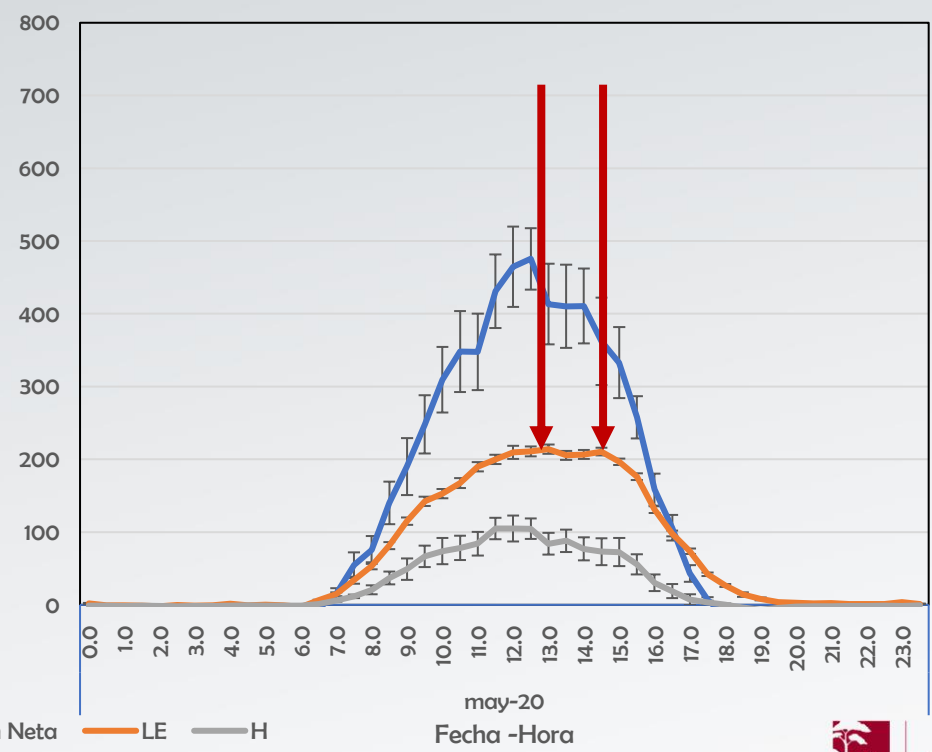
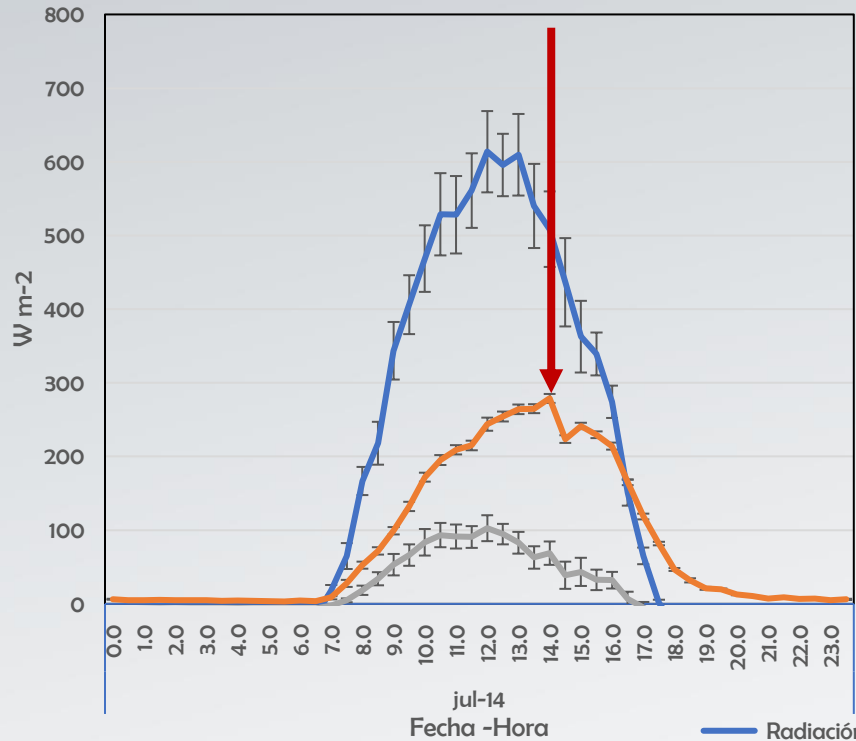
— H

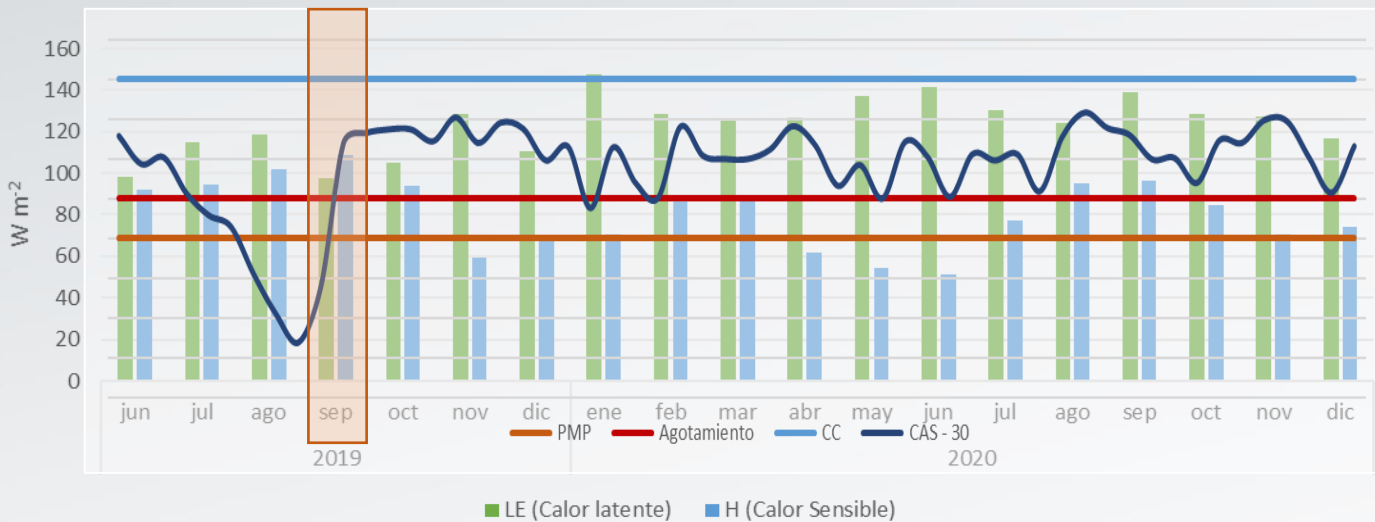
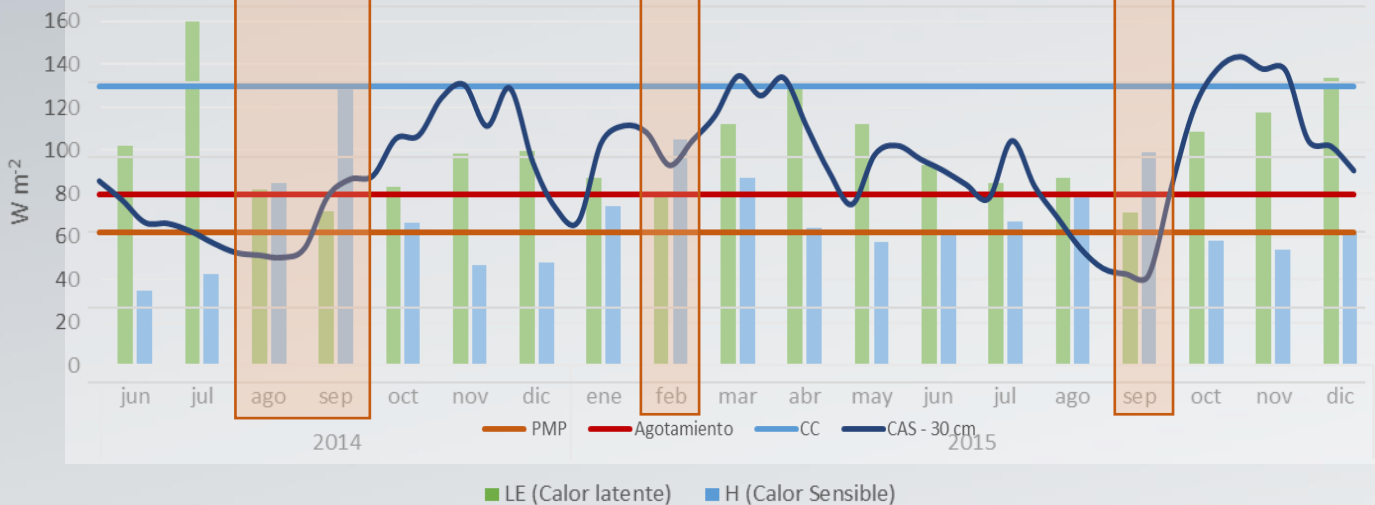
Flujos de energía

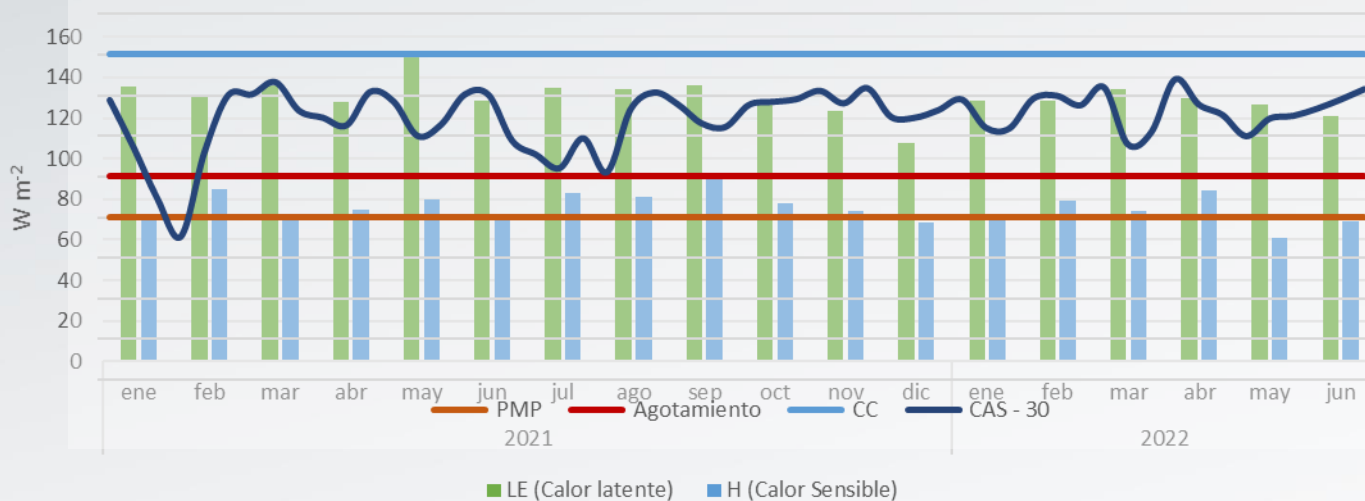
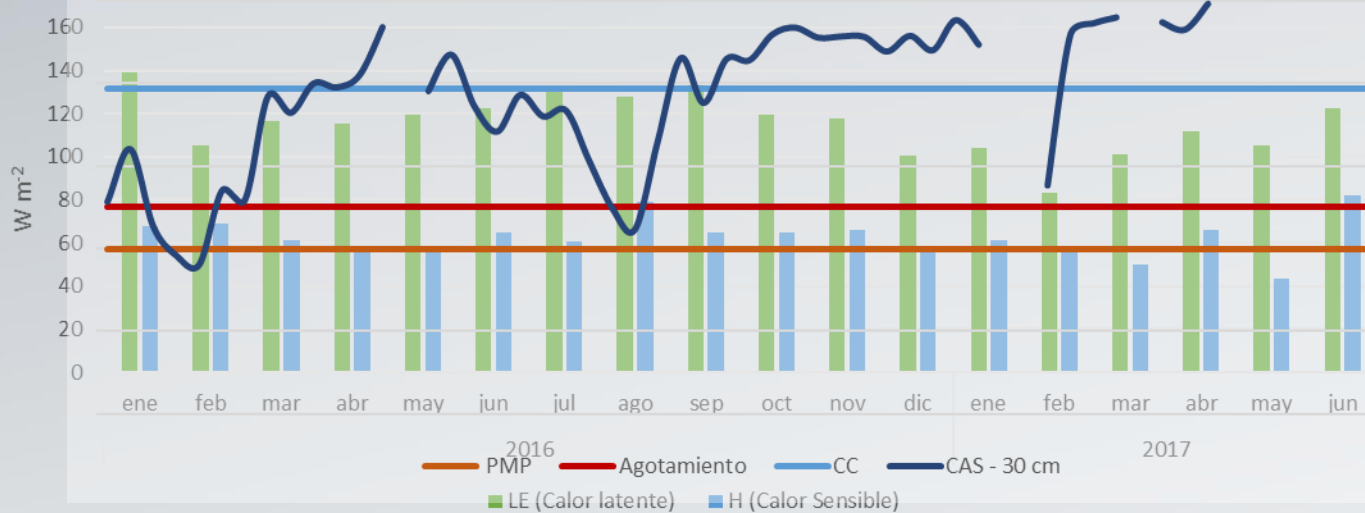


— Radiación Neta — LE — H

Flujos de energía





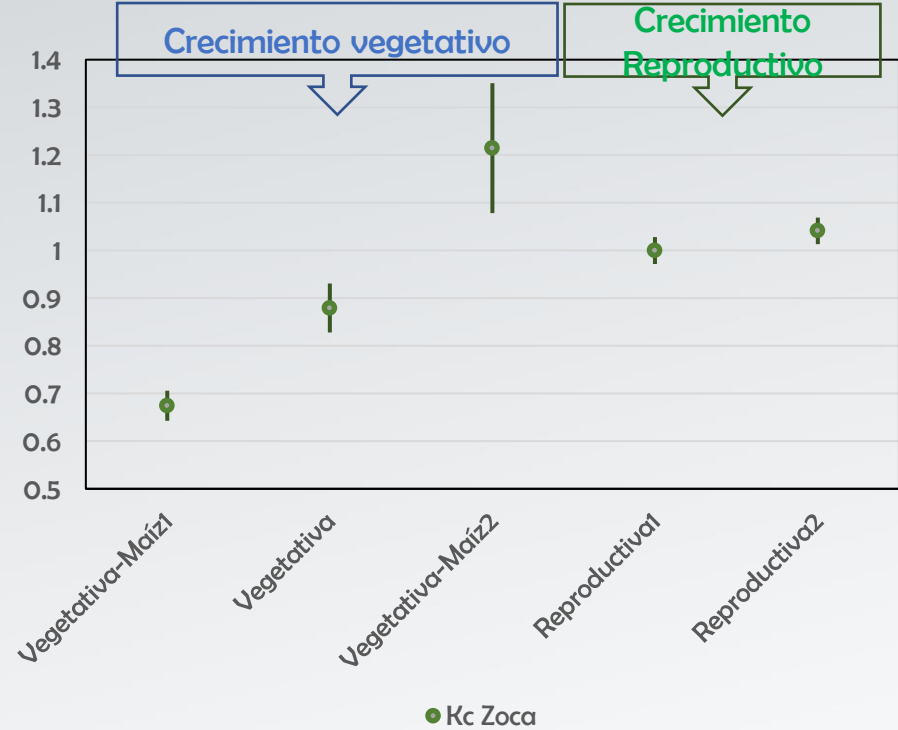
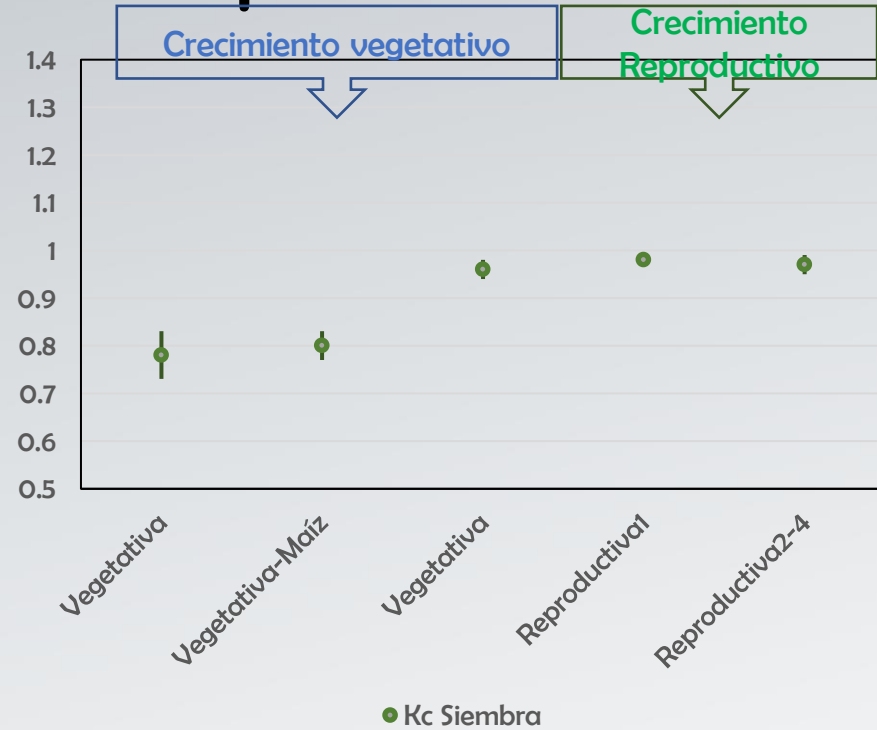


Dinámica evapotranspirativa del ecosistema

Ciclo	Etapa	Fecha inicial	Fecha final	% días con déficit hídrico	ETc	EE_Etc	ETo	EE_Eto
Siembra*	Vegetativo1	jun-14	jun-14	77%	3.71	0.09	4.02	0.25
	Vegetativo-Maíz	jul-14	dic-14	54%	3.47	0.1	4.7	0.14
	Vegetativo2	ene-15	feb-15	69%	4.17	0.16	4.46	0.19
	Reproductivo1	mar-15	feb-16	52%	4.32	0.07	4.62	0.1
	Reproductivo2-4	mar-16	dic-17	82%	4.09	0.03	4.63	0.05
Zoca	Vegetativo-Maíz1	jun-19	oct-19	40%	2.20	0.21	3.24	0.23
	Vegetativo	nov-19	mar-20	14%	3.01	0.29	3.40	0.17
	Vegetativo-Maíz2	mar-20	jul-20	12%	3.28	0.20	2.77	0.17
	Reproductivo1	ago-20	jun-21	6%	3.26	0.09	3.27	0.06
	Reproductivo2	jul-21	jun-22	0%	3.13	0.07	3.03	0.09

* Castaño-Marín, A. M., Riaño-Herrera, N. M., Góez-Vinasco, G. A., García-López, J. C., & Figueroa-Casas, A. (2022). Evapotranspiration and crop coefficients for coffee production systems in Colombia using the eddy covariance method. *Agronomy Journal*, 114(1), 678-688. <https://doi.org/10.1002/agj2.20960>

Coeficiente del cultivo ($K_c = ET_c / ET_o$) por etapa de desarrollo



*Kc Siembra: Castaño, et al., 2022



Intercambio Neto de Carbono del Ecosistema (INCE)

24-Ene-2014



19-May-2014



17-Sep-2014



27/06/2014

04-Jun-2014



15-Oct-2014



23-Ago-2014



10-Feb-2014



12-Nov-2014



03-Feb-2015



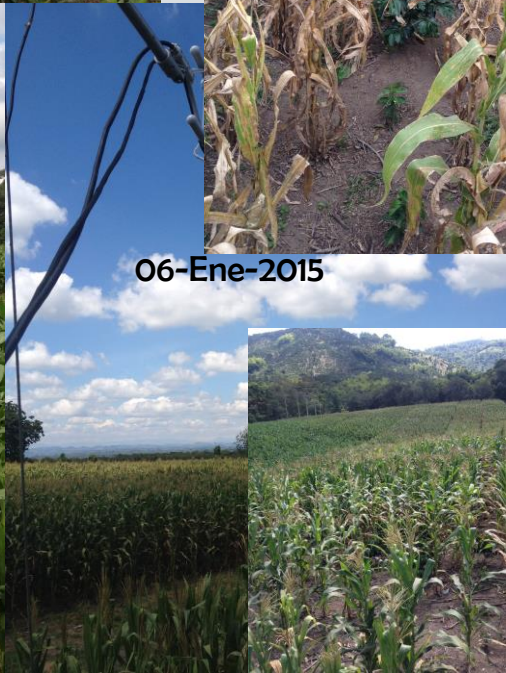
05-Dic-2014



17-Mar-2015

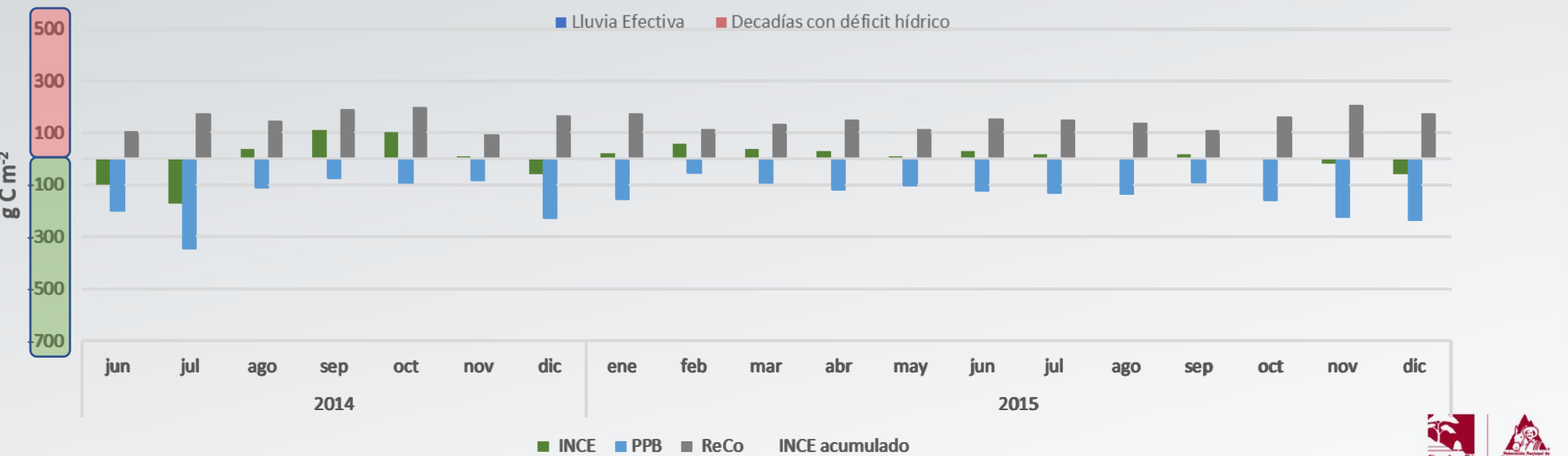
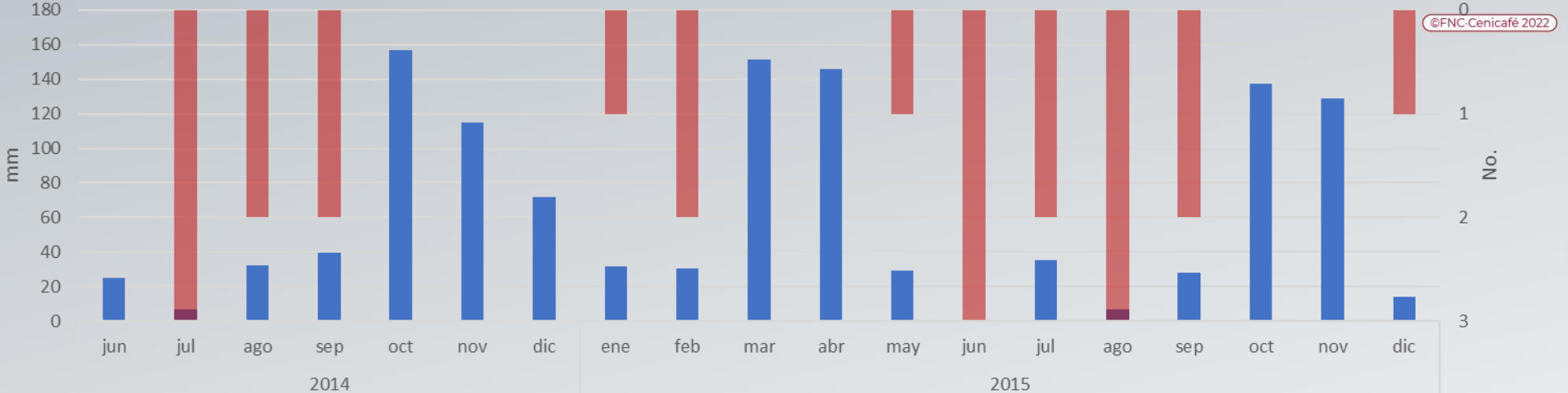


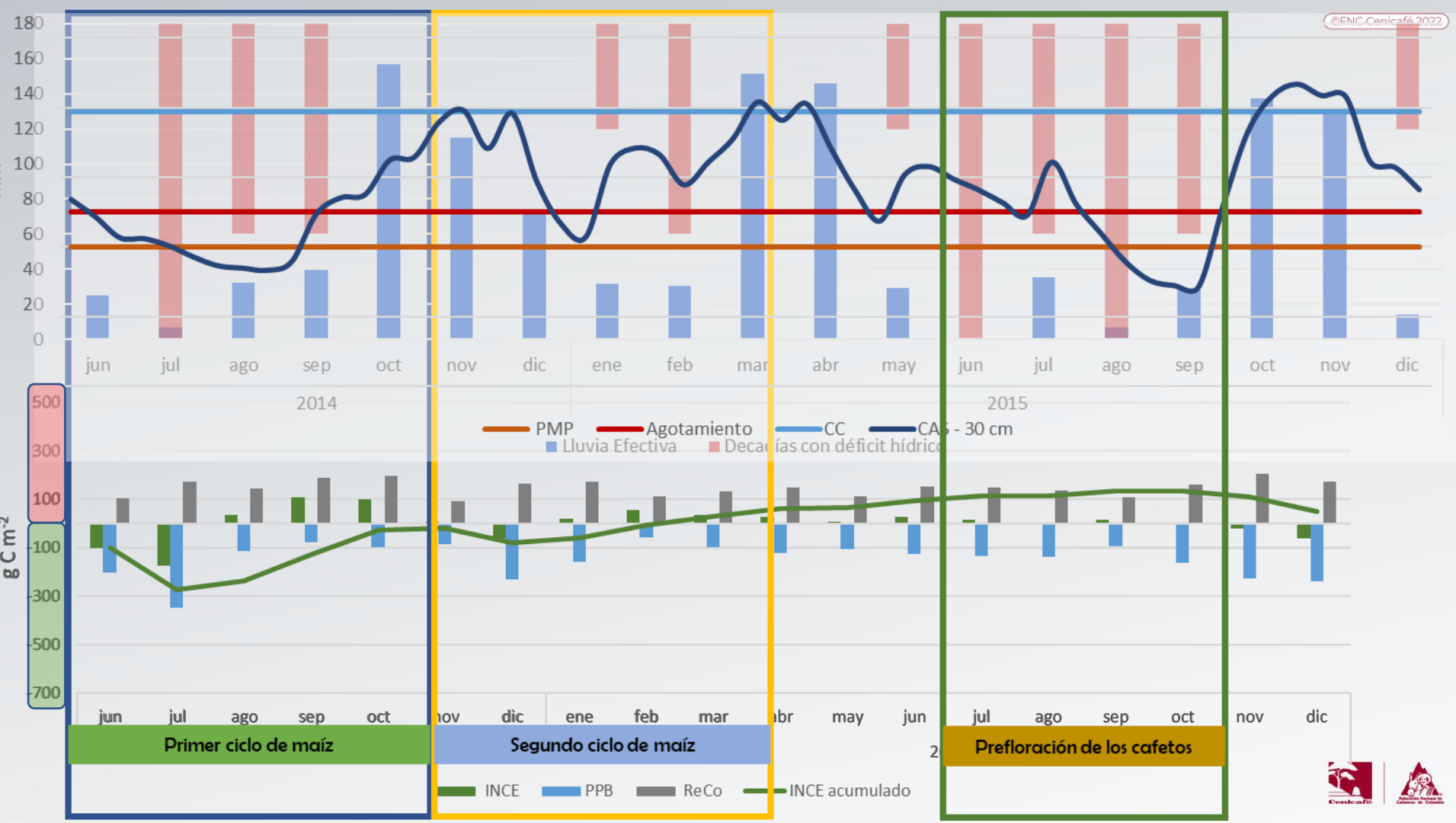
06-Ene-2015



21-May-2015









23-May-2019



12-Jul-2019



04-06-2019

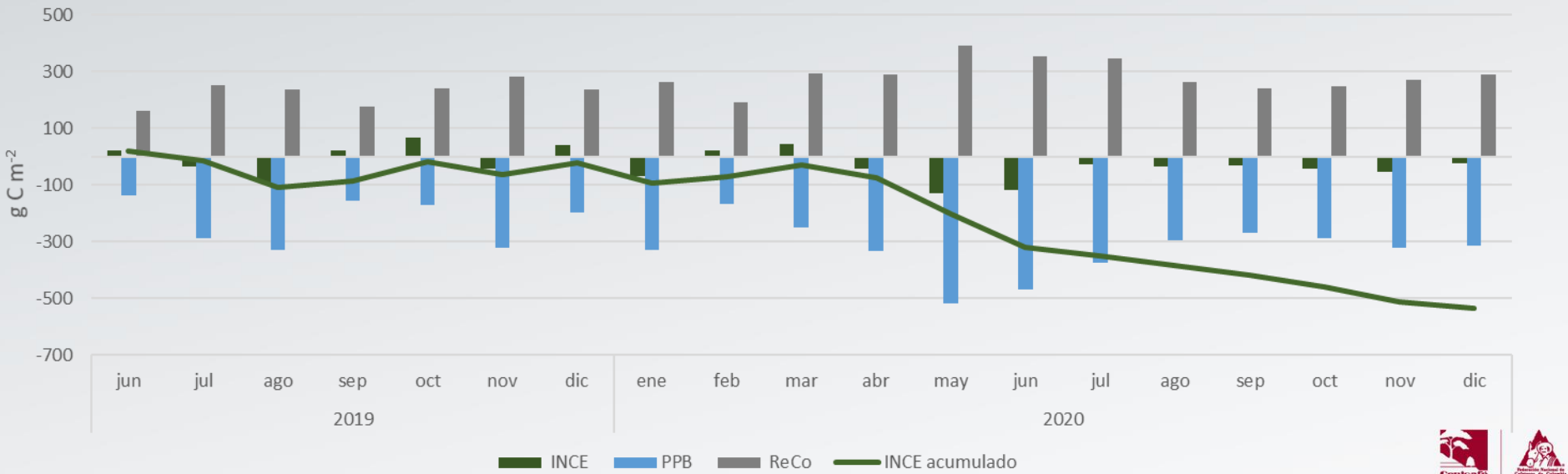
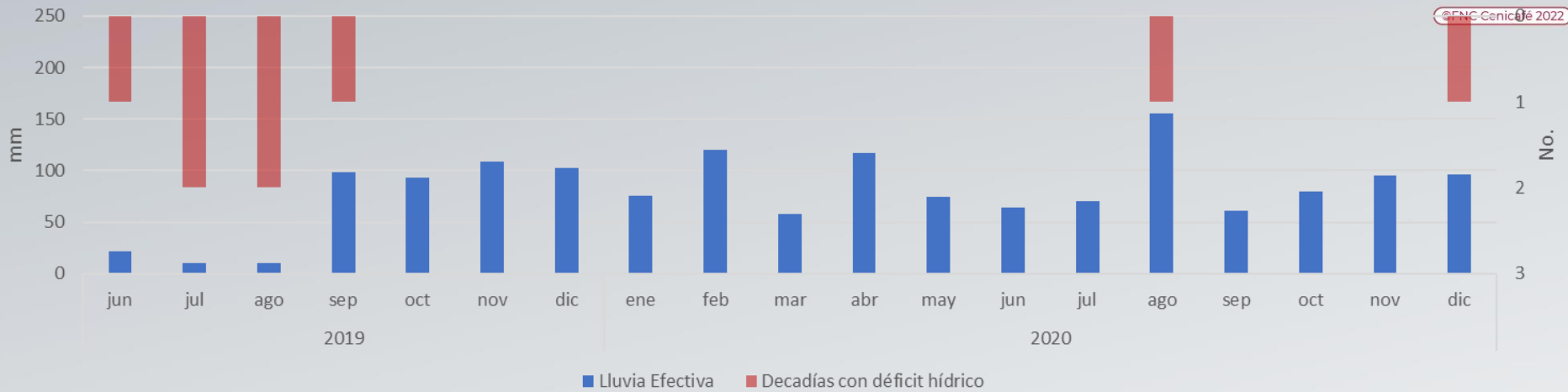


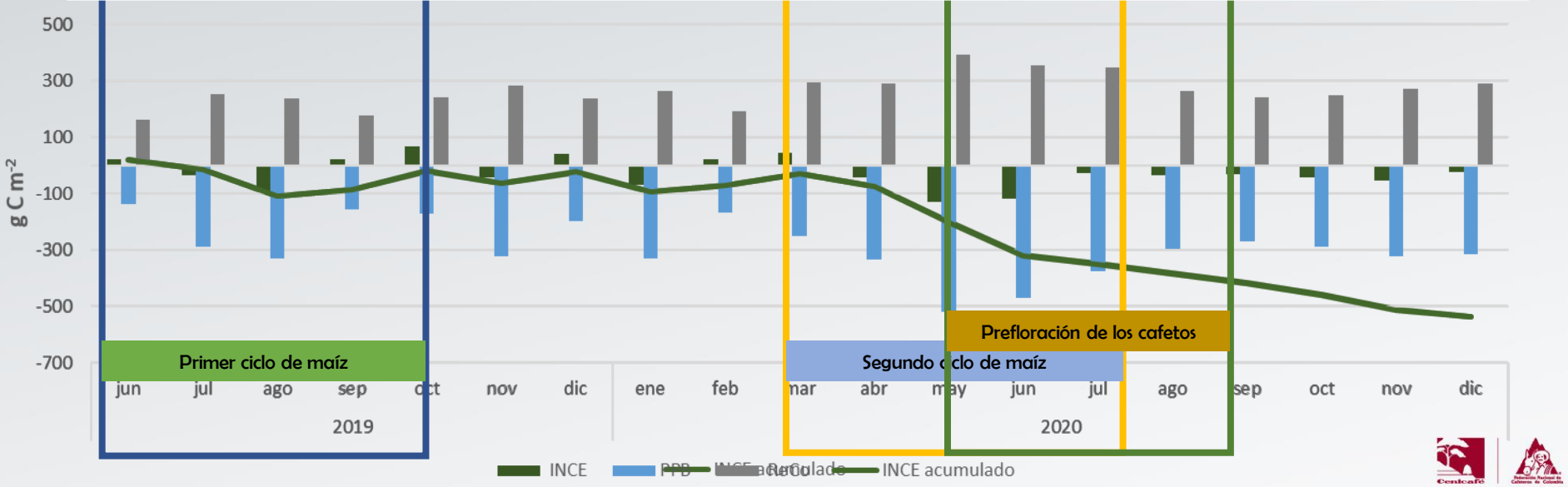
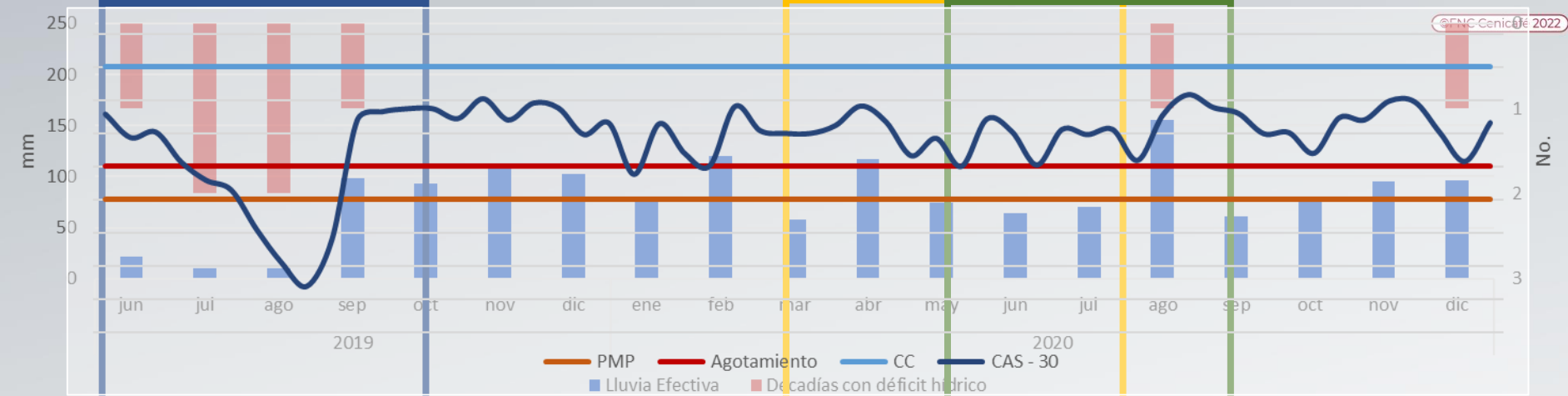
06-Sep-2019



25-Oct-2019





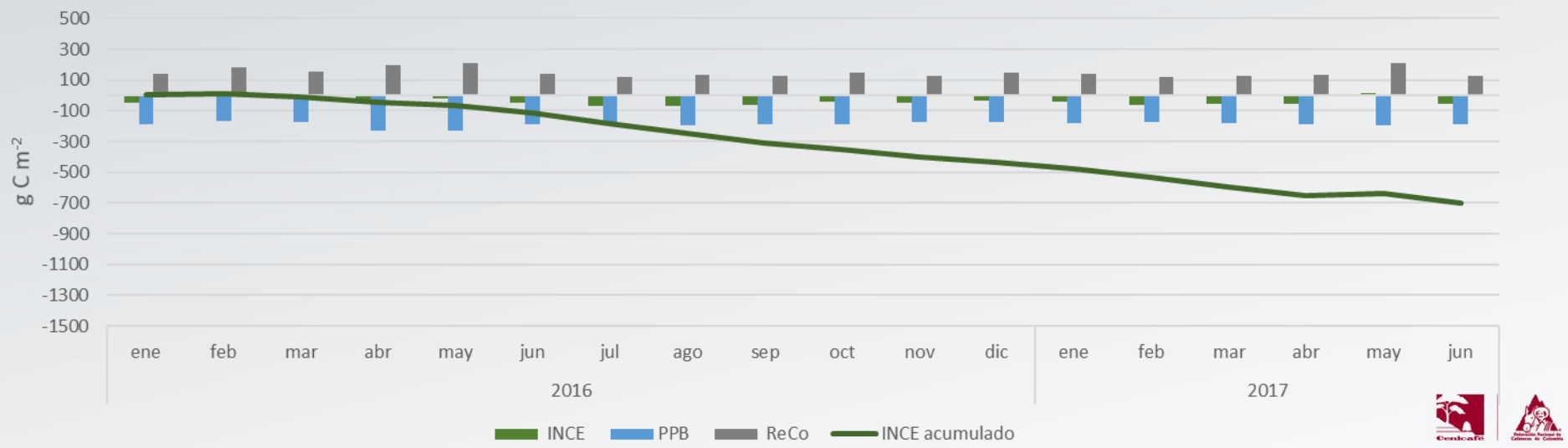


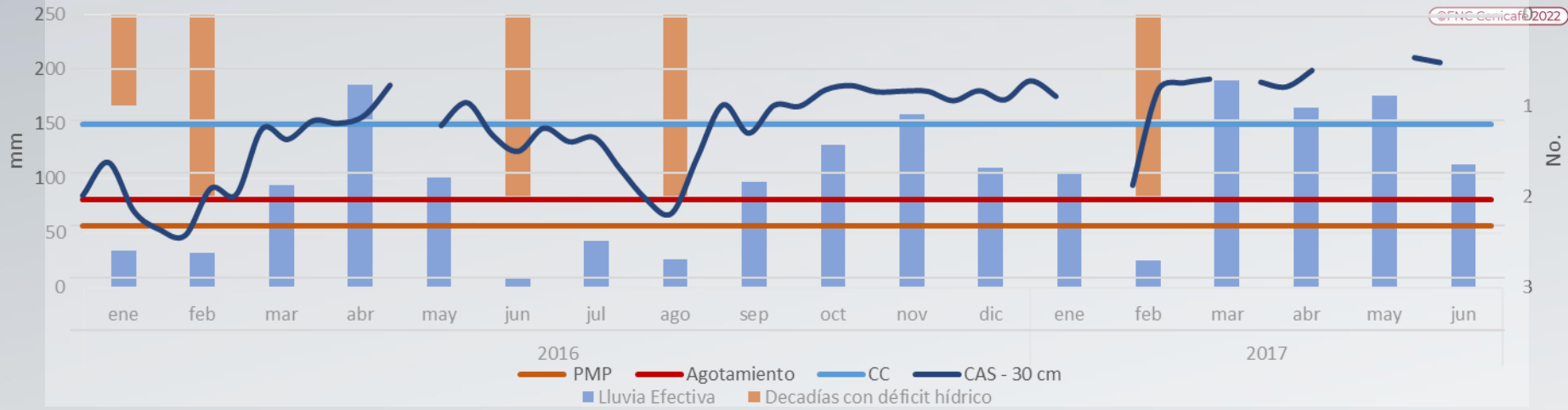
13-04-2016



11-04-2017







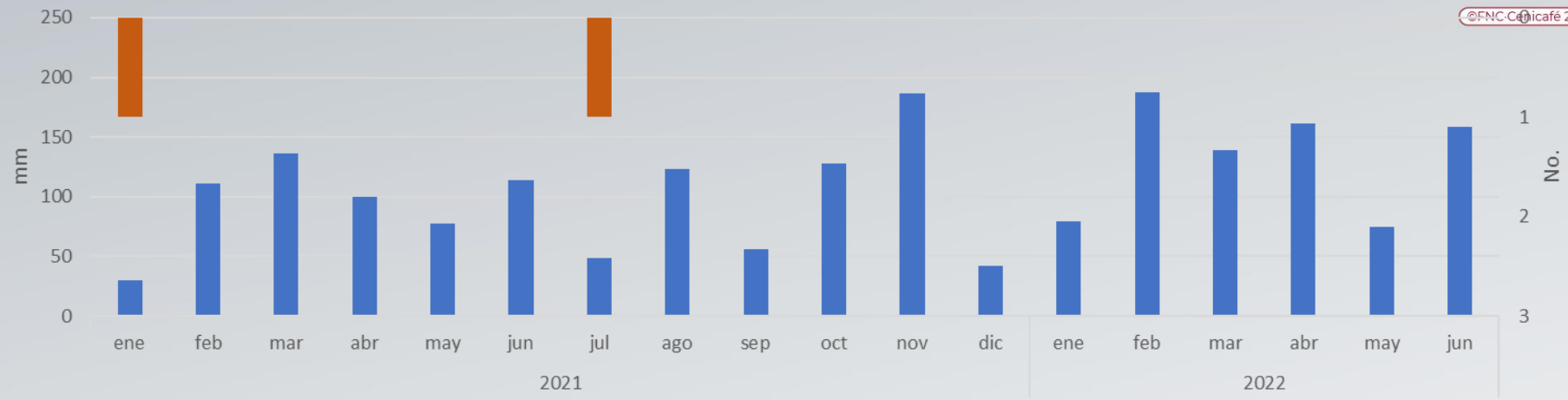
27-10-2020



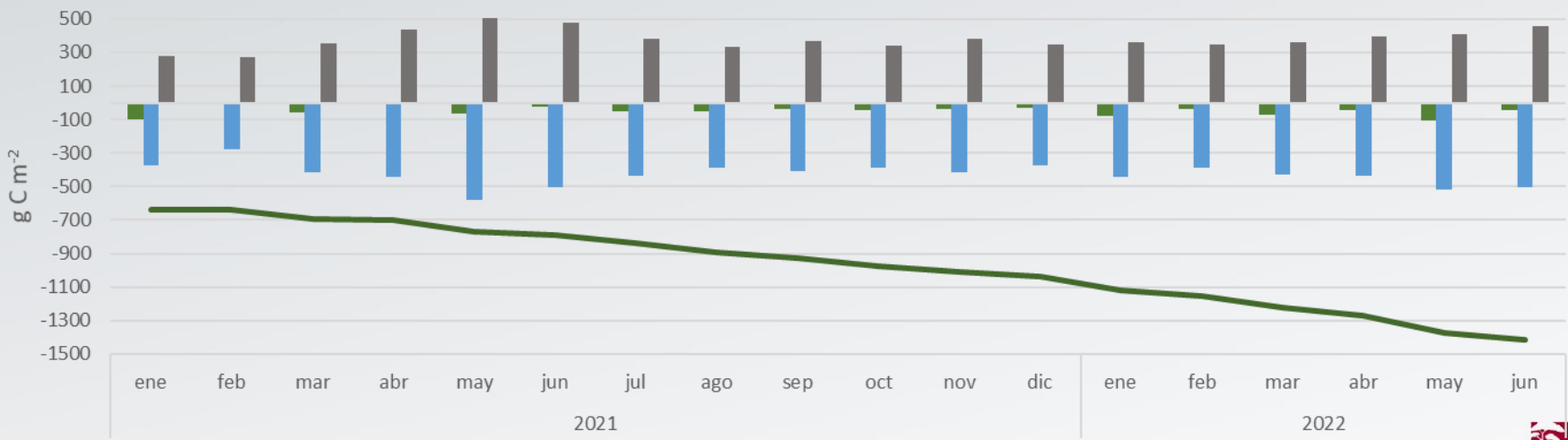
16-06-2021



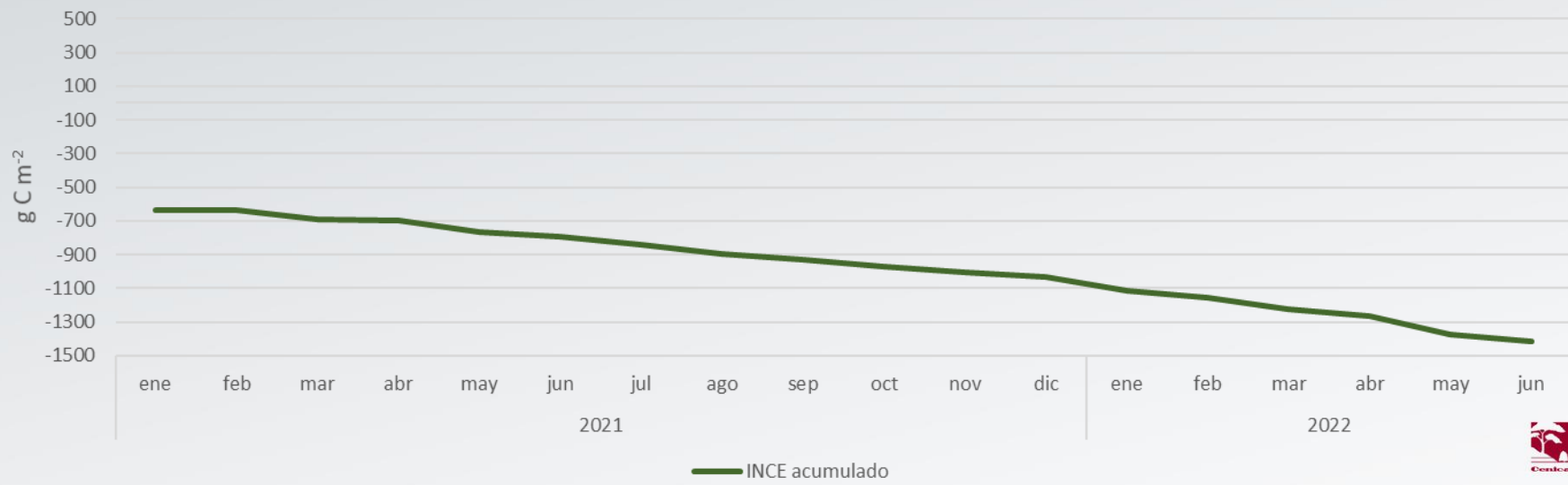
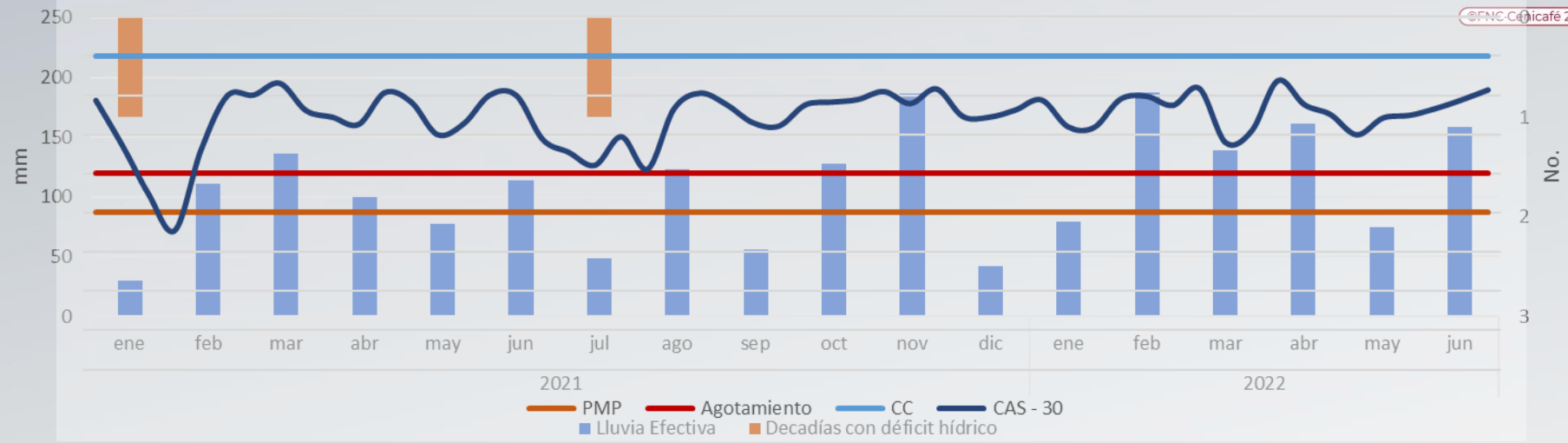
14-06-2022



■ Lluvia Efectiva ■ Decadías con déficit hídrico



■ INCE ■ PPB ■ ReCo ■ INCE acumulado



Relación entre el método EC y el método de muestreo directo y relaciones fenológicas – Sistema de zoca –

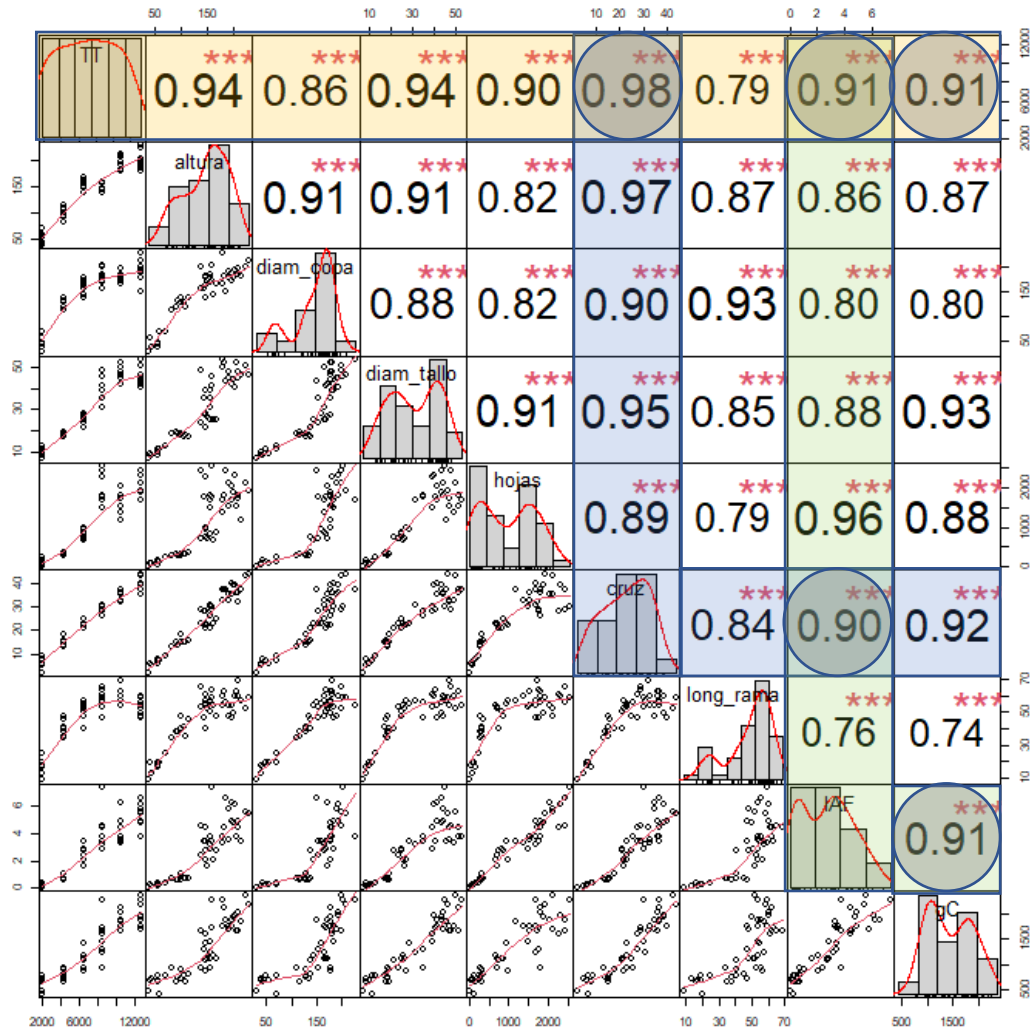


17-03-2015

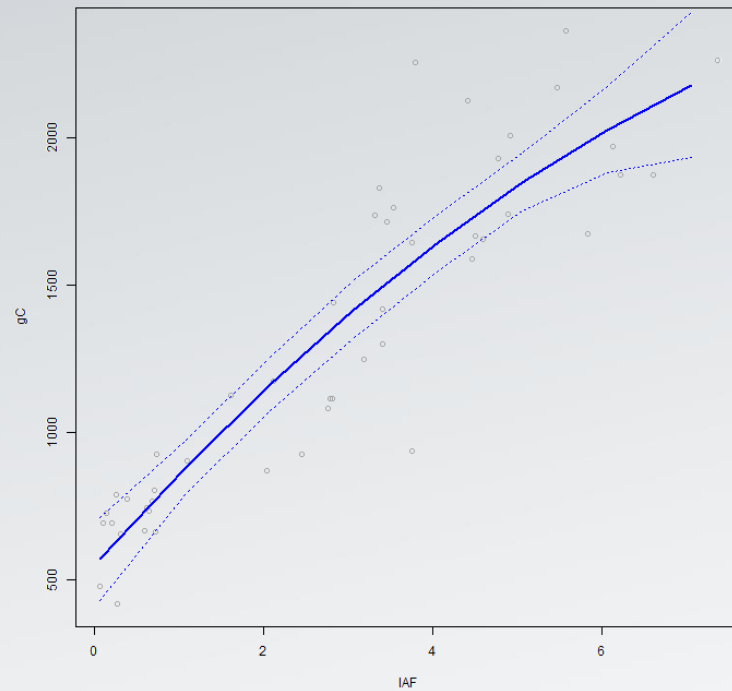
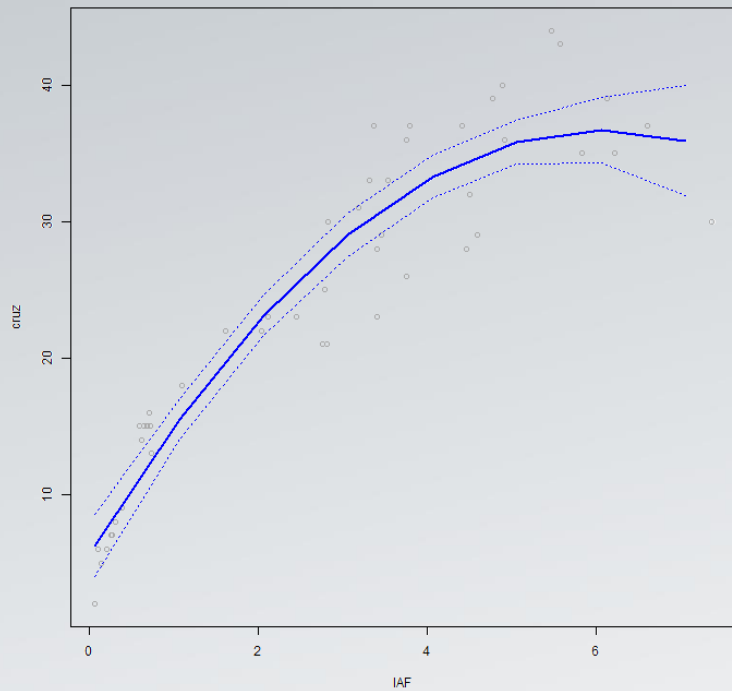


16-06-2021

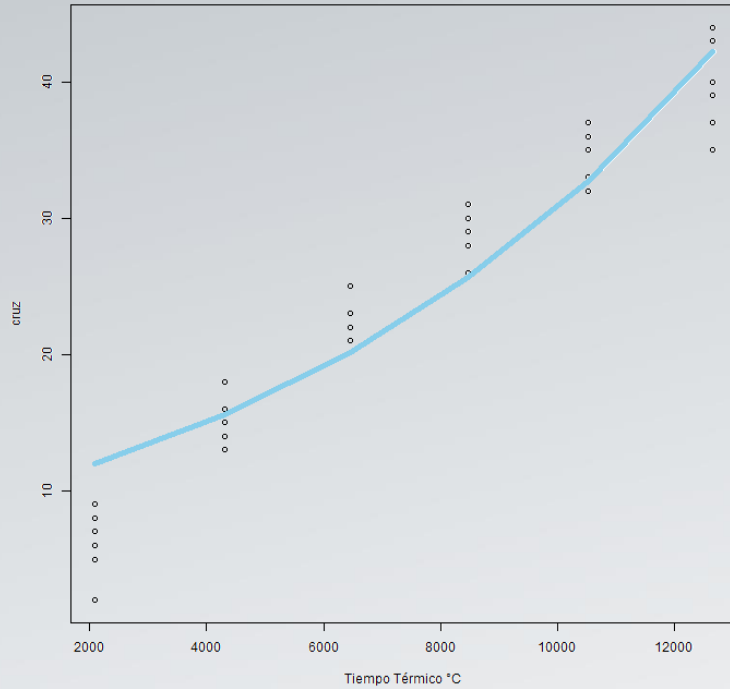
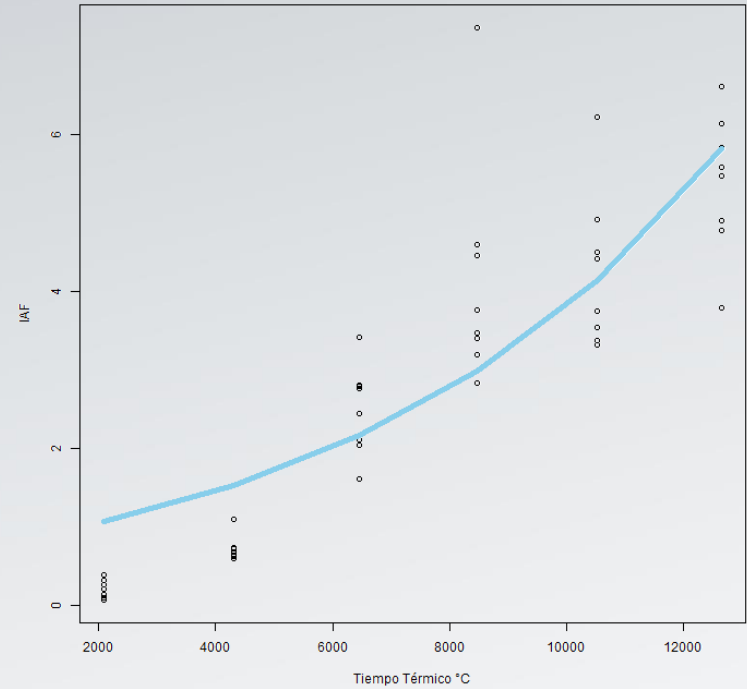




Sigla	Variable	Unidad
TT	Tiempo térmico	Grados día ⁻¹
Altura	Altura de la planta	cm
diam_copa	Diámetro de la copa del árbol	cm
hojas	Total de hojas por árbol	No.
cruz	Número de cruces por árbol	No.
long_rama	Promedio de la longitud de las ramas primarias	cm
IAF	Índice de área foliar	
gC	Carbono por planta	g

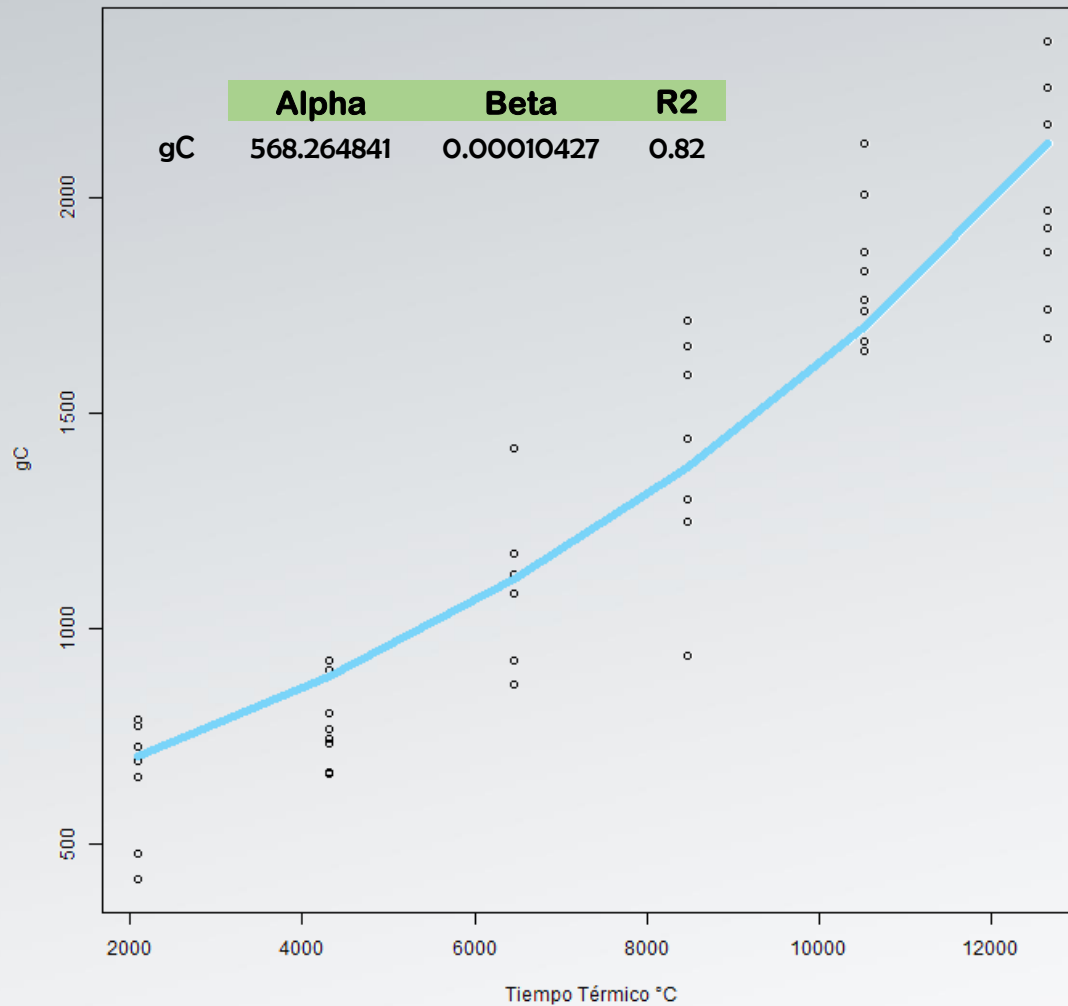


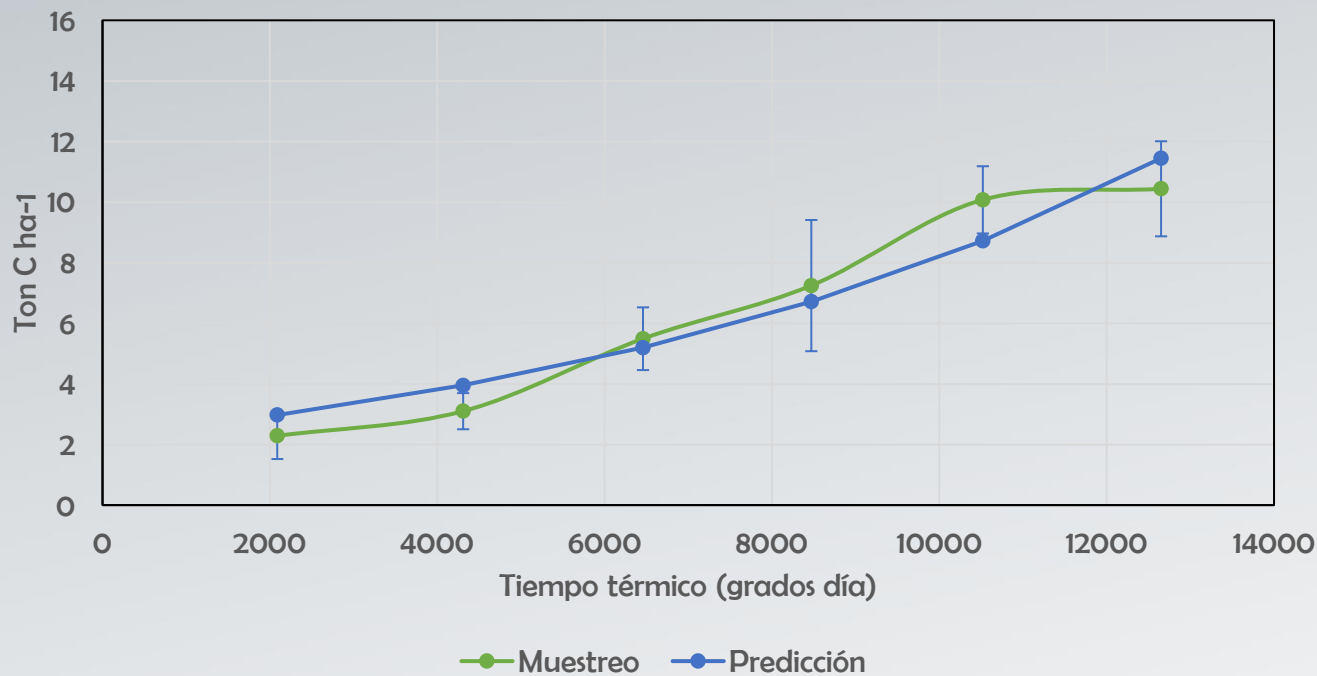
	(Intercept)	poly(x, 2)1	poly(x, 2)2	R2	
cruz	24.48	71.47	-	23.50	0.90
gC	1,314.11	3,440.37	-	365.07	0.83

Cruz**IAF**

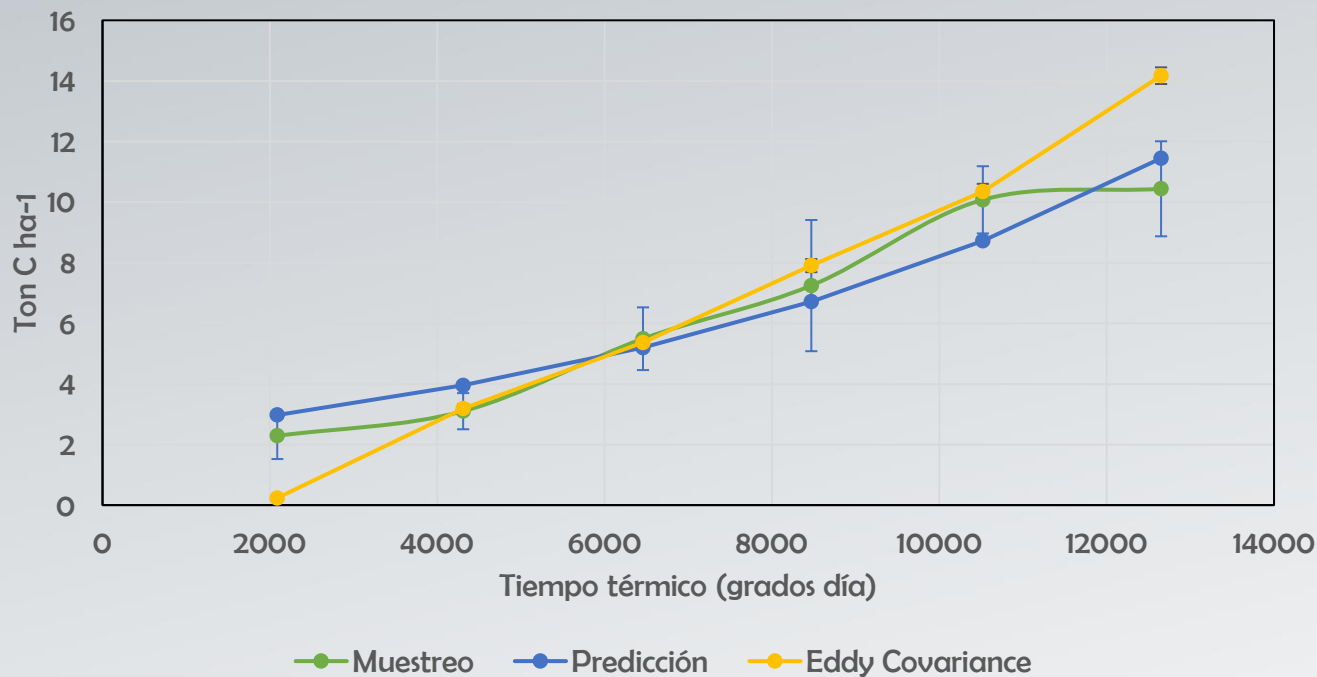
Ecuación $f=\alpha*\exp(\beta*x)$

	Alpha	Beta	R2
cruz	9.33721145	0.00011923	0.89
IAF	0.76628716	0.00016026	0.74





Ciclo de Zoca -Año	1	2	3
Órgano	TT 4310	TT 8470	TT 12650
Hojas	6%	15%	16%
Raíz	33%	32%	23%
Ramas	2%	10%	17%
Tallo	60%	43%	40%
Necromasa	ND	ND	5%



Incremento Año	Ton C ha ⁻¹		
	Café muestreo	Maíz muestreo	Café - Maíz EC
1	3.11	4.79	3.19
2	4.14		4.72
3	3.19		6.27
Tasa anual promedio	3.48	1.60	4.73

Resumen del seminario en cifras

- Cultivo de café a libre exposición en etapa de zoca con maíz intercalado, en sus primeros 37 meses

Flujos de energía $W m^{-2} d^{-1}$

Etapa	Radiación neta		LE (Calor latente)		H (Calor Sensible)	
		±EE		±EE		±EE
Café - Maíz con restricción hídrica	261	5.9	108	2.1	100	2.6
Café - vegetativo	272	6.4	126	2.1	74	2.1
Café - Maíz sin restricción hídrica	246	6.6	132	2.2	66	2.4
Café - reproductivo año1	262	4.1	131	1.4	79	1.5
Café - reproductivo año2	251	4.2	128	1.3	76	1.5
Promedio general	258	3.6	127	1.9	78	2.2

Resumen del seminario en cifras

- Cultivo de café a libre exposición en etapa de zoca con maíz intercalado, en sus primeros 37 meses

Flujos de agua (mm d ⁻¹)						
Etapa	ETc	±EE	ETo	±EE	Kc	±EE
Café - Maíz con restricción hídrica	2.2	0.2	3.2	0.2	0.67	0.03
Café - vegetativo	3.0	0.3	3.4	0.2	0.88	0.05
Café - Maíz sin restricción hídrica	3.3	0.2	2.8	0.2	1.21	0.14
Café - reproductivo	3.2	0.1	3.1	0.1	1.02	0.03

Resumen del seminario en cifras

- Cultivo de café a libre exposición en etapa de zoca con maíz intercalado, en sus primeros 37 meses

Flujos de Carbono g C d ⁻¹						
Etapa	PPB	±EE	ReCo	±EE	INCE	±EE
Café - Maíz con restricción hídrica	-8.02	0.26	7.49	0.18	-0.53	0.19
Café - vegetativo	-8.18	0.23	8.21	0.15	0.03	0.16
Café - Maíz sin restricción hídrica	-13.06	0.33	10.97	0.21	-2.09	0.21
Café - reproductivo año1	-12.24	0.20	10.91	0.20	-1.32	0.08
Café - reproductivo año2	-14.01	0.13	12.29	0.12	-1.72	0.06
Ton C acumulado 36 meses	-132.54		118.36		-14.18	

89%

Conclusiones

Si validamos el sistema, respecto a los balances de carbono, energía y agua, se pueden considerar los siguientes beneficios o servicios ecosistémicos:

- ✓ Las condiciones ambientales restrictivas, como las reportadas en este estudio con relación al déficit hídrico en el suelo, encuentran en el sistema de intercalamiento de maíz con café, un efecto amortiguador, ya que se reduce la alta tasa evaporativa, se regula la temperatura y se disipa menor energía en calentamiento del aire.
- ✓ La dinámica observada en los valores del balance de agua, atribuible a los cambios en el sistema productivo, permitirá ajustar variables como ET_c y K_c en el modelo de balance hídrico.
- ✓ En términos de dinámica de CO_2 , en los primeros 30 meses después de la renovación (siembra o zoca), se identifica al sistema de producción de café a libre exposición como sumidero de carbono.
- ✓ En un proceso de renovación de cafetos por zoca, los residuos tendrían un efecto emisor de CO_2 preponderante, por lo cual, el intercalamiento con otros cultivos, tendrá una función adicional de neutralizar o contrarrestar las emisiones.

Reflexiones

- Es necesario continuar con el estudio para obtener información, al menos de 20 años, para entender **“¿Cómo los ecosistemas completos responden a la variabilidad de las condiciones atmosféricas en el tiempo?”**
- **“Se necesita un pueblo, nosotros no podemos hacerlo solos”**: es necesario que confluyan diferentes disciplinas, adicionalmente que puedan fomentarse recursos para mantener la infraestructura, los cultivos y promover la capacidad de analítica.
- **“Fomentar la colegialidad y colaboración: Nadie roba los datos de nadie si se suma a la infraestructura científica, para hacer cosas más grandes, más allá de los que podemos hacer en nuestros sitios individuales”**, es necesario capturar las **“tendencias de los ecosistemas en la respiración de una biósfera cambiante”**
- Si bien la mayoría de estudios de productividad primaria neta se basan en relaciones alométricas, existe limitación por su poca representatividad espacial y temporal.

Proyecciones

- ❖ Determinar la eficiencia del agroecosistema de maíz – café en el uso de la energía, el agua y el carbono.
- ❖ Argumentar y actualizar los modelos de producción, en particular el de café en etapa de zoca.
- ❖ Desarrollar un acuerdo de cooperación para compartir los datos e información con otras redes colaborativas.
- ❖ Continuar documentando el intercambio de gases en el ecosistema cafetero, para entender las tendencias en los cambios en las concentraciones atmosféricas y contribuir con datos e información para mejorar los modelos de predicción de GEI.

Agradecimientos

- MADR, convenio 0255 – 2012 MADR – FNC
- Programa RICCLISA RC No. 0853-2012 WP5 Ejecutores FNC – Cenicafé, CIAT
- Ing Agr. PhD Ángela María Castaño
- DIR: Álvaro Gaitán
- Equipo EE Paraguaicito, Daniel Antonio Franco, Diego Osorio, Jeison Penagos, Wiston Restrepo, Myriam Cañón
- TIC: Kevin Adolfo Hincapié, Leonardo Adolfo Velásquez, Audberto Quiroga, Daniel Orozco, Juan Pablo Carvajal, Arley Valencia
- BSM: Jorge Hernán Marulanda, José Gildardo Aguirre, Alberth Agudelo, Cristian Andrés Chica
- ACL: Jorge Willmar Valencia, Jorge Alejandro Builes, Ninibeth Sarmiento, Carolina Ramírez, Jonier Alejandro Hoyos
- FIS: Natalia Catalina Flechas, José Ricardo Acuña
- SUE: Vanessa Catalina Díaz, Siavosh Sadeghian

Fuentes de imágenes

- Elaboración propia, Slidesgo, Flaticon.es
- Fotografías: Ángela María Castaño, Jorge Willmar Valencia, Juan Carlos García



GRACIAS

cenicafe@cafedecolombia.com 

PORTALES WEB



www.cenicafe.org



agroclima.cenicafe.org



biblioteca.cenicafe.org

REDES OFICIALES



[Cenicafé FNC](https://www.facebook.com/Cenicafé-FNC)



[@cenicafe](https://twitter.com/cenicafe)



[cenicafé](https://www.instagram.com/cenicafe)



[CenicaféFNC](https://www.youtube.com/CenicaféFNC)

