



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

“Dinámica de captura de dióxido de carbono (CO_2) en condiciones de radiación solar directa y difusa en los páramos de Zhurucay (Sur del Ecuador)”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental.

Autora:

Karen Anabela Matute Loayza.

C.I: 0705935989

Correo electrónico: karen-96-9@hotmail.com

Director:

Ing. Galo José Carrillo Rojas, PhD.

C.I: 0101799096

Cuenca-Ecuador

21- octubre-2020



Resumen

El comportamiento de carbono (C) en el Páramo Andino no ha sido explorado totalmente, por consiguiente, el conocimiento acerca de captura de dióxido de carbono (CO₂) en función del tipo de radiación solar en el ecosistema es casi inexistente. Este estudio identifica el comportamiento de captura de CO₂ ante los tipos de radiación difusa y directa; y las condiciones de activación fotosintética, mediante la medición de estas variables con técnica de covarianza de remolinos (Eddy Covariace) y sensores de radiación (piranómetro BF3 y sensor cuántico LICOR LI-190R). Se realizó un análisis intradiario de intercambio ecosistémico neto (-NEE), densidad de fotones fotosintéticos (PPFD), radiación difusa y directa en 17 días identificados; 12 días soleados y 5 días nublados, en el periodo de dos años (2017-2018). Se obtuvo una diferencia de respuesta del 8% entre los dos tipos de sensores de radiación. La actividad fotosintética (PPFD) presentó un comportamiento normalizado en días soleados, mientras que en días nublados demostró lo contrario. La duración y captura de CO₂ (-NEE) a nivel promedio resultó ser cuantitativamente mayor en días soleados que en días nublados. El comportamiento de fijación de C se observó entre 07h30–18h00 en días soleados, en comparación con los días nublados siendo entre 08h30-18h00. Interesantemente, se demostró que con valores inferiores de radiación, se puede alcanzar valores cercanos de -NEE a los que se obtienen con valores de radiación mayor en meses menos soleados. Finalmente, se destaca que el páramo de Zhuruca y presenta limitaciones de captura de CO₂ en días nublados, siendo análogo con pastizales, bosques deciduales y agujas. Este estudio aporta a una mejor comprensión del comportamiento de captura de C, lo que permitirá el desarrollo de futuras investigaciones, y el contraste con estudios que sustenten una diferente conclusión.

Palabras clave: Covarianza de remolinos. Densidad de flujo de fotones para fotosíntesis. Intercambio ecosistémico neto. Carbono. Fotosíntesis. Captura de CO₂.

**Abstract**

The behavior of carbon (C) in the Andean páramo has not been thoroughly investigated and as a result, knowledge about the capture of carbon dioxide (CO₂) based on the type of solar radiation in the ecosystem is almost nonexistent. This study identifies CO₂ capture behavior based on the types of diffuse and direct radiation—and the photosynthetic activation conditions—by measuring these variables with an Eddy covariance technique (Eddy Covariance) and radiation sensors (BF3 pyranometer and LICOR LI-190R quantum sensor). We analyzed net ecosystem exchange (–NEE), photosynthetic photon flux density (PPFD), and diffuse and direct radiation over 17 identical days (12 sunny days and 5 cloudy days) throughout a period of 2 years (2017-2018). We obtained a response difference of 8% between the two types of radiation sensor. The photosynthetic activity (PPFD) showed normal activity on sunny days, contrary to the results on cloudy days. The average duration and capture of CO₂ (–NEE) were quantitatively greater on sunny days than on cloudy days. The carbon fixation behavior was observed from 7:30 a.m. to 6:00 p.m. on sunny days and from 8:30 a.m. to 6:00 p.m. on cloudy days. Interestingly, it was shown that, with lower radiation values, values close to the –NEE measurements that were obtained at higher radiation values could also be obtained in less sunny months. Finally, this study highlights the limitations of CO₂ capture in the Zhurucay páramo on cloudy days, similar to that of grasslands and deciduous and pine forests. This study contributes to a better understanding of carbon capture behavior by providing new insights that challenge existing studies and that will aid in the development of future investigations.

Keywords: Eddy covariance. Photon flux density for photosynthesis. Net ecosystem exchange. Carbon. Photosynthesis. CO₂ capture.



Índice:

Resumen.....	2
Aspectos destacados.....	11
Abstract.....	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
1. Introducción.....	12
1.1 Pregunta de investigación	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
2. Contenido teórico.....	13
2.1 Carbono: comportamiento – ciclo del carbono	13
2.1.1 El carbono en la atmosfera y la superficie.....	15
2.1.2 Producción primaria bruta (GPP).....	15
2.1.3 La producción primaria neta (NPP)	15
2.1.4 Intercambio ecosistémico neto (NEE).....	16
2.1.5 Factores influyentes en el flujo de carbono	16
2.2 Energía Solar	17
2.2.1 Radiación directa e irradianza	18
2.2.2 Balance de radiación en la tierra.....	20
2.2.3 Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)	21
2.3 Fotosíntesis.....	22
2.4 Productividad	23
2.4.1. Comportamiento del Carbono en los Páramos Andinos Ecuatorianos	24
2.5 Métodos de medición de radiación	25
2.5.1 Piranómetro BF3.....	26



2.5.2	Sensor de radiación cuántico (LI-COR LI-190R).....	28
2.6	Métodos de medición de CO ₂ y el H ₂ O.....	30
2.6.1.	Covarianza de remolinos	30
3.	Metodología.....	32
3.2	Sitio de Estudio	33
3.3	Adquisición de datos.....	35
3.4	Procesamiento de información	35
3.5	Determinación de días idóneos.....	37
3.6	Determinación de diferencia de resultados de la radiación total (BF3) y el PPFD: identificación de días nublados y soleados.....	37
3.7	Correlación del intercambio ecosistémico neto y radiación difusa, radiación directa y PPFD: Gráfica de dispersión y ecuación de dichas gráficas.....	38
3.8	Determinación de diferencia de comportamiento de la captura de carbono en radiación difusa y directa.....	40
4.	Resultado y Discusión	41
5.	Conclusiones y recomendaciones	53
6.	Bibliografía.....	55



Índice de figuras

Figura 1. Ciclo del carbono	14
Figura 2. Fraccionamiento de la luz solar	19
Figura 3. Componentes de la irradiación.....	20
Figura 4. Distribución de las diferentes formas de la radiación	21
Figura 5. Piranómetro BF3	27
Figura 6. Sensor Cuántico LI-COR LI-190R	29
Figura 7. Comportamiento del difusor en LI-COR LI-190R.....	29
Figura 8. Mecanismo del Sistema de Remolinos	30
Figura 9. Sistema Covarianza de Remolinos	31
Figura 10. Ubicación del sitio de estudio	33
Figura 11. Gráfica de PPFd de Julio 2018.....	37
Figura 12. Gráfica de PPFd, radiación solar difusa y directa de acuerdo a la hora diurna	38
Figura 13. Correlación de PPFd y NEE del 14 de Julio del 2017	39
Figura 14. Correlación de la Radiación Difusa y NEE del 14 de Julio del 2017.....	40
Figura 15 Correlación de la Radiación Directa y NEE del 14 de Julio del 2017.....	40
Figura 16. Proporción de radiación difusa y directa en los días idóneos	42
Figura 17. Comportamiento de PPFd, Radiación Difusa y Directa de acuerdo a la Hora Diurna. a) Día Nublado (04 de Julio del 2017); b) Día Soleado (14 de Julio del 2017).....	44
Figura 18. Comportamiento del NEE de acuerdo a la hora diurna. a) Día Nublado (04 de Julio del 2017); b) Día Soleado (14 de Julio del 2017).....	45
Figura 19. Comportamiento del NEE diurno. a) Día Nublado (24 de Septiembre del 2017); b) Día Nublado (18 de Septiembre del 2017);c) Día Soleado (04 de Julio del 2017); d) Día Soleado (10 de Julio del 2018).....	47
Figura 20. Comportamiento del NEE diurno. a) Día Soleado (07 de Enero del 2018); b) Día Soleado (09 de Enero del 2018); c) Día Soleado (25 de Febrero del 2018); d) Día Soleado (21 de Julio del 2017)	48
Figura 21. Dispersión del PPFd, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE. a) Día Soleado (23 de Agosto del 2017); b) Día Soleado (05 de Noviembre del 2017); c) Día Soleado (07 de Noviembre del 2018); d) Día Soleado (06 de Septiembre del 2018).....	49
Figura 22. Dispersión del PPFd, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE del 24 de Julio del 2017	51
Figura 23. Dispersión del PPFd, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE del 24 de Septiembre del 2017	51



Figura 24. Gráfica de error de valores promedios de PPFD y NEE en el mes de Julio del 2017-2018	53
---	----

Índice de tablas

Tabla 1. Porcentajes de radiación difusa y directa.....	42
Tabla 2. Datos de PPFD, NEE y coeficiente de correlación de las radiaciones respecto a NEE en días soleados.....	48
Tabla 3. Datos de PPFD, NEE y coeficiente de correlación de las radiaciones respecto a NEE en días nublados	50
Tabla 4. PPFD (promedio) y NEE (promedio) de Julio del 2017-2018.....	52



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Karen Anabela Matute Loayza en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Dinámica de captura de dióxido de carbono (CO₂) en condiciones de radiación solar directa y difusa en los páramos de Zhuruca (Sur del Ecuador)", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre del 2020

Karen Anabela Matute Loayza

C.I.: 0705935989



Cláusula de Propiedad Intelectual

Karen Anabela Matute Loayza, autora del trabajo de "Dinámica de captura de dióxido de carbono (CO₂) en condiciones de radiación solar directa y difusa en los páramos de Zhuruca (Sur del Ecuador)", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 21 de octubre del 2020



Karen Anabela Matute Loayza

C.I.: 0705935989



Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de Cuenca, por permitirme ser parte de esta institución y darme las herramientas necesarias para la formación de mi vida profesional, así como también a mis docentes que me brindaron su conocimiento, consejos y su apoyo incondicional.

De igual manera, agradezco al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca por el aporte de datos para este trabajo. Con respeto y admiración, agradezco al Ing. Galo Carrillo por su dedicación, criterio, paciencia, dirección y motivación. Además, por darme la oportunidad de contar con su capacidad y conocimiento científico que aportó a la realización de este trabajo de titulación.

En el ámbito personal, agradezco en primer lugar a Dios por acompañarme, cuidarme y por hacer posible este momento. Agradezco de todo corazón a mi familia, en especial a mis padres, Hipatia Loayza y Oscar Matute por darme la oportunidad del estudio, por su apoyo, sus consejos y por siempre tratar de estar junto a mí, sacándome una sonrisa en los momentos más caóticos. Agradezco a mis tíos, Lucila y Huberto, que me abrieron las puertas de su hogar, por su apoyo, paciencia, cuidados y consejos a lo largo de esta etapa. Agradezco a mis primas y hermana, Emily, Vicky y Doménica, por siempre contar con su compañía y ánimos. De igual manera, agradezco a mi amiga Wen Chun y a su familia, ya que conté con su ayuda y compañía en todo momento.

Gracias a mi novio, Israel Astudillo por su compañía y apoyo incondicional en todo momento, tanto académicamente como personal, gracias por tu motivación y siempre creer en mi capacidad, aun cuando yo no lo hacía. Agradezco a mis amigos, Kristi, Hermel y Eliana ya que aportaron tanto en mi vida académica como personal, convirtiéndose en personas muy especiales.

La ayuda brindada de estas partes, ha sido sumamente importante para la culminación de este trabajo.



Aspectos destacados

- La diferencia de respuesta entre el sensor LI-190R y el sensor solar BF3 es de alrededor de un 8%.
- El análisis de PPF_D demuestra un comportamiento normalizado en días soleado, mientras que en nublados es lo contrario.
- La duración y captura de CO₂ es cuantitativamente mayor en días soleados que en días nublados.
- Valores inferiores de radiación alcanzar equivalentes de captura de CO₂ a los que se obtienen con valores elevados de radiación en Zhurucay.
- El comportamiento de sumidero en el páramo Zhurucay para días soleados es de 07h30–18h00, mientras que para días nublados es de 08h30-18h00.



1. Introducción

La cuantificación de la cantidad de carbono (C), así como la definición del comportamiento de un bioma como sumidero o emisor de este elemento, es vital para el Páramo Andino Ecuatoriano, ya que al ser un ecosistema andino tiende a ser vulnerable a cualquier cambio que se genere sobre él directa o indirectamente. De hecho, el Páramo Andino se reconoce por el rol hídrico y biodiversidad; sin embargo, el rol del carbono no ha sido explorado en su totalidad (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017).

Por consiguiente el comportamiento de la captura de dióxido de carbono (CO₂), en función del tipo de radiación y las condiciones de activación de la fotosíntesis PPF_D (densidad de flujo de fotones de fotosíntesis en $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$) son importantes, puesto que existe una incertidumbre de la captación de carbono por parte de este ecosistema, el cual es caracterizado por tener un clima cambiante (Carrillo-Rojas, Silva, Rollenbeck, Célleri, & Bendix, 2019); (Lee et al., 2018).

Bajo este contexto, se observa pocas investigaciones en ecosistemas andinos y particularmente que hayan abordado análisis en el páramo ecuatoriano. Al respecto, según Gibbon, Silman, Malhi, Fisher, Meir, Zimmermann & Garcia (2010) sostienen que el conocimiento de la dinámica de carbono en los ecosistemas altoandino, muestra algunas limitaciones, pues estudios previos realizados a inicios del siglo señalaban que existen reservorios importantes de carbono, los cuales pueden ser beneficios para reducir los gases de efecto invernadero.

Para Suárez, Acurio, Chimbolema y Aguirre (2016) destacan en un estudio realizado que la humedad es relevante para el secuestro de carbono, no obstante prácticas ancestrales comunes entre los habitantes de los páramos como la quema y pastoreo llevan a la liberación de CO₂ destacando la necesidad de realizar estudios relacionados con la dinámica del carbono.

La relación de captura de CO₂ con la energía disponible, los periodos de tiempo limitados de secuestro de este en el páramo se puede favorecer por el aumento de la densidad de flujo de fotones Fotosintéticos (PPFD por sus siglas en inglés). Un estudio realizado por Carrillo-Rojas et al (2019) encontró que el páramo efectivamente es una fuente de CO₂, teniendo un intercambio neto positivo, por ello la fotosíntesis se ve afectada por las



limitaciones de la luz solar en estos lugares, pues la región andina tiene alta nubosidad y precipitaciones, características que son fundamentales para la emisión de CO₂.

Con lo expuesto en párrafos anteriores, los estudios son pocos al analizar el comportamiento de los flujos de carbono frente a las condiciones de energía de luz en el ecosistema páramo, no obstante, estudios como el de Hollinger, Kelliher, Byers, Hunt, McSeveny & Weir (1994) analizaron los factores ambientales que regulan el intercambio de CO₂ del ecosistema, evidenciando que en bosques de Nueva Zelanda se obtuvo un aumento aproximado del 50% en el secuestro de carbono en días con presencia de nubosidad.

1.1 Pregunta de investigación

¿La radiación solar difusa induce a que la captura de CO₂ sea cuantitativamente menor en magnitud y en duración que en condiciones de radiación solar directa para el ecosistema de páramo de Zhurucay?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Identificar el comportamiento de captura de CO₂ del ecosistema de páramo versus el tipo de radiación difusa y directa, y las condiciones de activación de fotosíntesis matutina, mediante la técnica de covarianza de remolinos y sensores de radiación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Explorar la actividad diurna de captura de CO₂ en la vegetación de la zona de estudio según las condiciones de radiación difusa y directa.
- Determinar el momento en el que se genere la transición de respiración a captura de CO₂ por la activación energética sobre el dosel de pajonal.

2. Contenido teórico

2.1 Carbono: comportamiento – ciclo del carbono

El carbono comprende un elemento esencial en el ambiente, considerando que todos los procesos biológicos como la respiración y la fotosíntesis son base de este elemento y es

por ello que todos son dependientes del ciclo del carbono (Eyherabide, Sainz, Barbieri y Echeverria, 2014).

El ciclo del carbono circula continuamente en la biosfera, litosfera e hidrosfera de forma inorgánica y orgánica, al referirse al ciclo en un panorama general se considera que una parte del CO_2 atmosférico se dirige hacia el suelo mediante las plantas y los animales, para posteriormente ser transformado en carbono orgánico disuelto, mientras que otra parte aporta nuevamente con CO_2 y metano. Es importante mencionar que existe un flujo adicional de carbono inorgánico disuelto derivado de la meteorización del carbono de calcio que se dirige hacia los ríos y mares, que van a contribuir nuevamente con CO_2 a la atmósfera proporcionando la continuidad del ciclo, tal como se muestra en la *Figura 1* (Scholes et al., 1996).

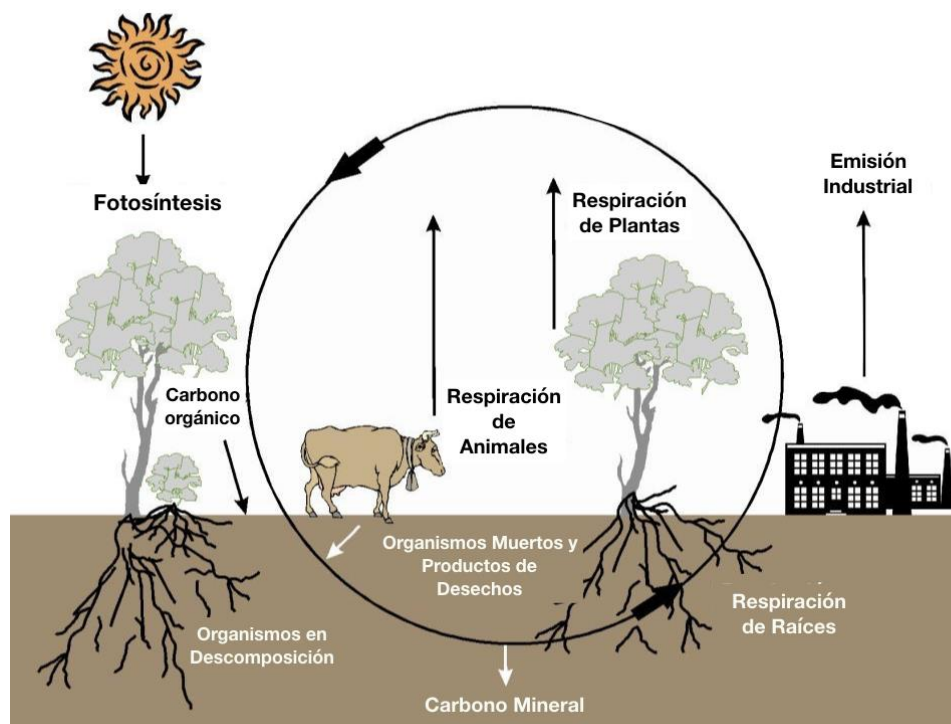


Figura 1. Ciclo del carbono

Descripción de la imagen: El CO_2 atmosférico es producto del equilibrio de los procesos biogeoquímicos mencionados, del carbono orgánico, de la erosión de rocas y de la emisión industrial.

Fuente: (Scholes et al., 1996)



2.1.1 El carbono en la atmósfera y la superficie

La atmósfera es el conjunto de gases y pequeñas partículas sólidas o líquidas que envuelven a la tierra; como CO₂ en su mayor parte, nitrógeno, oxígeno, entre otros. La absorción atmosférica del C (CO₂) se da gracias a la fotosíntesis realizada por la vegetación a estos de la radiación (Coronel & Echeverría, 2016). El CO₂ en la atmósfera interacciona en las reacciones fotosintéticas de fijación de C, una variación de concentración repercutirá en el comportamiento de este proceso, por lo tanto, un incremento de CO₂ origina un aumento de la velocidad de reacción y disminuye la velocidad de oxigenación, el efecto de estas variaciones es el aumento de la fotosíntesis, generando el rápido crecimiento de la vegetación en un lapso de tiempo menor (Scholes et al., 1996).

2.1.2 Producción primaria bruta (GPP)

Los procesos biológicos de respiración y fotosíntesis son de vital importancia para el transporte del carbono ya que estos originan procesos auxiliares de igual importancia que los anteriores (Scholes, Wallace, Archer, Ashmore, Aumont, Baker & Yool, 1996). La producción primaria bruta (GPP) es uno de estos, hace referencia a la cantidad de carbono orgánico total producido y fijado en forma de biomasa por el proceso de fotosíntesis, y es el mayor flujo global de carbono que impulsa las funciones del ecosistema como la respiración y el crecimiento de las plantas. En estudios recientes, se ha determinado que el GPP se asocia directamente con la precipitación con una asociación del 50% al 70%, mientras que en los bosques tropicales y boreales presenta una asociación del 30% y una correlación negativa por ende efectos adversos en la radiación o temperaturas por causa del balance de agua, estas dos variables climáticas están asociadas con la evapotranspiración con altas tasas ocasionando un balance negativo de agua y elevaciones de temperatura y radiación incidente (Beer et al., 2010).

2.1.3 La producción primaria neta (NPP)

La NPP representa el aporte neto de carbono que la atmósfera proporciona a la vegetación durante cierto periodo (Jin, Dong, Qi & An, 2010), siendo la diferencia entre la GPP y la respiración autotrófica y heterotrófica (respiración ecosistémica), del ecosistema a la



atmósfera (Raich et al., 1991). Es decir que la fijación de C consiste en el balance de la producción primaria neta (NPP) y las pérdidas de carbono mediante la respiración (Chapin et al., 2005). Por otro lado, la efectividad de la absorción del CO₂, como sumidero, va a depender del intercambio de carbono realizado en plazos largos (Scholes et al., 1996).

2.1.4 Intercambio ecosistémico neto (NEE)

El balance neto de carbono es evaluado por la producción neta del ecosistema (NEP), la diferencia con el NPP, la respiración ecosistémica y por el intercambio ecosistémico neto, este es el flujo neto de CO₂ del ecosistema hacia la atmósfera (Verlinden et al., 2013), dicho de otra forma es la asimilación del carbono por medio de la fotosíntesis, cuando esta es negativa y la pérdida de CO₂ cuando es positiva (Noormets et al., 2014). NEE y NEP es la misma clase de producción, sin considerar el origen ya sea de sumidero o de fuente de CO₂.

Al considerar el origen de CO₂, se interpreta al NEE negativo (sumidero) a la captación de CO₂ mientras que un NEE positivo es la emisión de CO₂ (fuente). El intercambio neto positivo (+NEE) representa la producción neta del ecosistema negativo (-NEP), por lo tanto, el NEP hace referencia a la asimilación de C en el ecosistema (sumidero) (Carrillo et al., 2019); (Chapin et al., 2005); (Lovett, Cole & Pace, 2006).

De Robertis et al (2000) en su investigación determinó que el NEE no presenta un comportamiento gaussiano, lo que concluyó que la variabilidad interanual es muy grande originado por las implicaciones de GPP o la respiración, así como determinó que las variaciones interanuales de NEE son susceptibles a las anomalías climáticas y meteorológicas, que promueven a la fotosíntesis y a la respiración en eventos climáticos extremos. Por otro lado, se encontró que los ecosistemas con hojas perennes, bosques de coníferas húmedos y pastizales son más vulnerables a cambiar de fuente a sumidero de carbono por las perturbaciones presentes en el medioambiente.

2.1.5 Factores influyentes en el flujo de carbono

Las características que presenta el ecosistema (estructural y funcional) causan una variabilidad en el flujo del C, tal es el caso del cambio de estructura en el cambio del índice foliar que afecta la proporción de intercepción de la luz, el área de superficie de las



fuentes y a los sumideros, mientras que en los cambios funcionales se puede presentar el caso de las variaciones de niveles de nitrógeno (N) que alteran la capacidad de fotosíntesis. Existen factores exógenos que también pueden alterar dicho flujo los cuales podemos citar a la actividad antrópica, insectos, plagas y enfermedades (Noormets et al., 2014)

Por otro lado, además de los flujos o procesos biogeoquímicos mencionados, se incluye el intercambio de océano-atmósfera como uno de los flujos más relevantes en el flujo del C. Este intercambio es importante pues presenta la particularidad del aumento de las tasas de (CO₂) atmosférico en la mayoría de los años donde se ha presentado el fenómeno EL Niño (ENSO), mismo que se presenta y probablemente ese aumento sea explicado por las reducciones de absorción de C a consecuencia de las temperaturas altas en los trópicos (Scholes et al., 1996).

Uno de los fenómeno exógeno que afecta el comportamiento del C es el cambio climático en el páramo, a pesar de contar con algunas investigaciones sobre el tema, no se cuenta con un amplio conocimiento debido a la gran variación local, por ende, es difícil describirlo en un lugar específico del páramo (Hofstede et al., 2014). De forma específica no se ha determinado cual es el factor más importante que delimite el comportamiento normal del páramo, entre estos están la temperatura del aire o del suelo, la asimilación de carbono entre otros (Cuesta et al., 2012).

2.2 Energía Solar

La radiación solar es la fuente principal de energía en la mayoría de interacciones de la atmósfera con la superficie, conduce a varios procesos físicos, químicos y biológicos (Marques et al., 2016). Cuando la radiación cruza la atmosfera ocurren varios efectos atenuantes, presentándose dos clases generales dentro de este proceso; absorción, dispersión y reflexión, caso especial de dispersión (Günther, 2012).

La radiación llega a la superficie de la tierra solamente en un 52%, siendo la parte restante reflejada al espacio por el efecto albedo que origina la atmosfera y la superficie de la tierra, lo que origina que parte de la radiación llegue al suelo de forma dispersa y directa, por ello se conforma de un componente directo y difusa, la radiación difusa no tienen una dirección específica. La radiación directa llega a la superficie en forma de línea recta



desde el sol, existe otra fracción además de la difusa que contribuye a la radiación no direccional, esta no se debe a la dispersión sino a la reflexión en el suelo, que varía dependiendo de la superficie (Günther, 2012).

2.2.1 Radiación directa e irradianza

Dentro del sistema tierra-atmósfera, se encuentra varios procesos de intercambio de radiación y calor. Entre estos esta la parte de la radiación emitida por la superficie terrestre misma que es absorbida por las nubes y por componentes atmosféricos reemitiéndose parcialmente en el espacio y parcialmente de regreso a la superficie terrestre (Álvarez, Montaña & Maldonado, 2014).

Por otro lado, se genera la dispersión que no convierte la radiación en otras formas de energía, sino reduce el haz de la radiación (Günther, 2012). Es así que la radiación difusa se genera por la dispersión de rayos solares dependiendo de la cantidad de moléculas en el aire y el grado de nubosidad (Wringht, 2008).

Con respecto a la fracción difusa coincide con otros factores ambientales (nubes y aerosoles) que infieren en el balance del carbono (Lissarrangue, Baeza, & Sánchez, 2005). Por otro lado, las nubes tienen los efectos más importantes sobre la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre a pesar de esta influencia (Günther, 2012) y ésta permite altas ganancias de energía (Wringht, 2008).

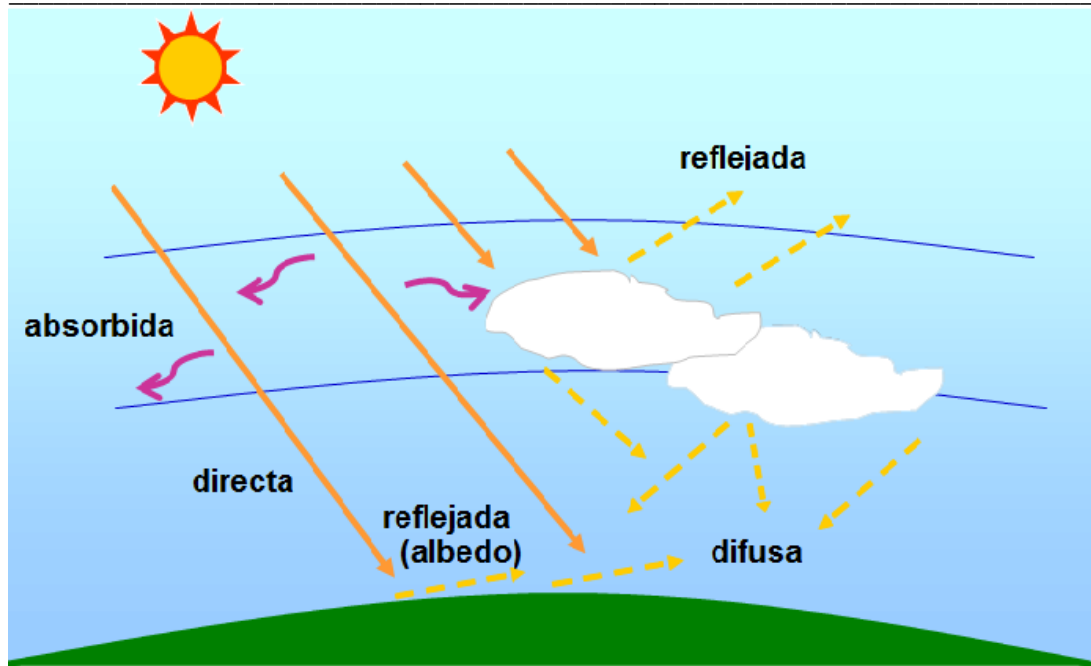


Figura 2. Fraccionamiento de la luz solar

Descripción de la imagen: Fraccionamiento de la luz solar de la luz difusa y directa

Fuente: (Seslab, s.f.)

La *Figura 2* muestra que existe otra fracción además de la difusa que contribuye a la radiación no direccional, esta fracción no es originada por la dispersión sino a causa de la reflexión del suelo y de las nubes; siendo mayor en superficie de nieve fresca que en una superficie con vegetación.

La irradiancia comprende la superficie y es la suma de estos tres componentes mencionados, la irradiación debido a la radiación directa, radiación difusa y la radiación reflejada, esta suma se llama irradiación total como se muestra en la *Figura 3*.

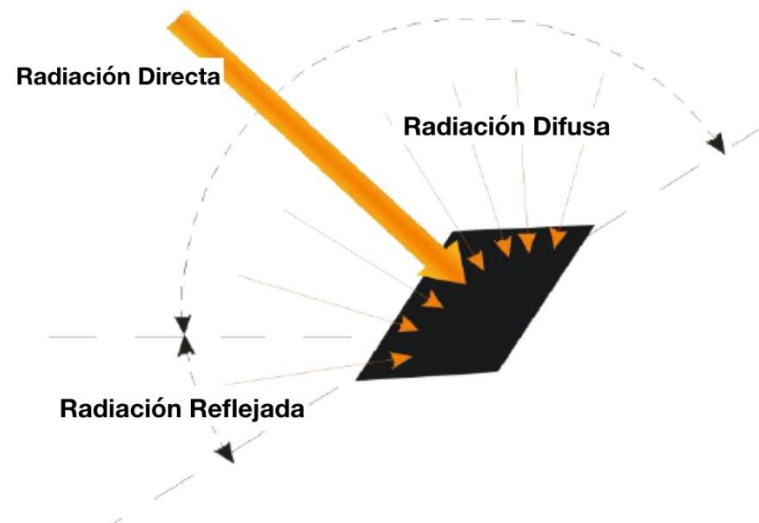


Figura 3. Componentes de la irradiación

Descripción de la imagen: radiación directa, difusa y reflejada

Fuente: (Günther, 2012)

2.2.2 Balance de radiación en la tierra

Según el balance de radiación de la tierra, aproximadamente un 50% de la radiación proveniente del sol incide en la superficie de la tierra, dentro de este porcentaje la mitad es radiación directa y la otra parte es radiación difusa, mientras que el 50% restante de la radiación no alcanza a impactar en la superficie ya que aproximadamente un 25% es absorbida por el ozono, vapor de agua, partículas de aerosol y por las nubes, y el 25% restante se dispersa en el espacio. El 30% de la radiación que llega a la atmósfera se refleja o es dispersado al espacio en gran parte ocasionado por las nubes presentes, por la atmósfera o por propia superficie de la tierra, como se muestra en la *Figura 4*. El resto de la radiación es absorbida por la atmósfera, nubes y por la superficie terrestre (Günther, 2012); (Papadopoulos & Pararajasingham, 1997).

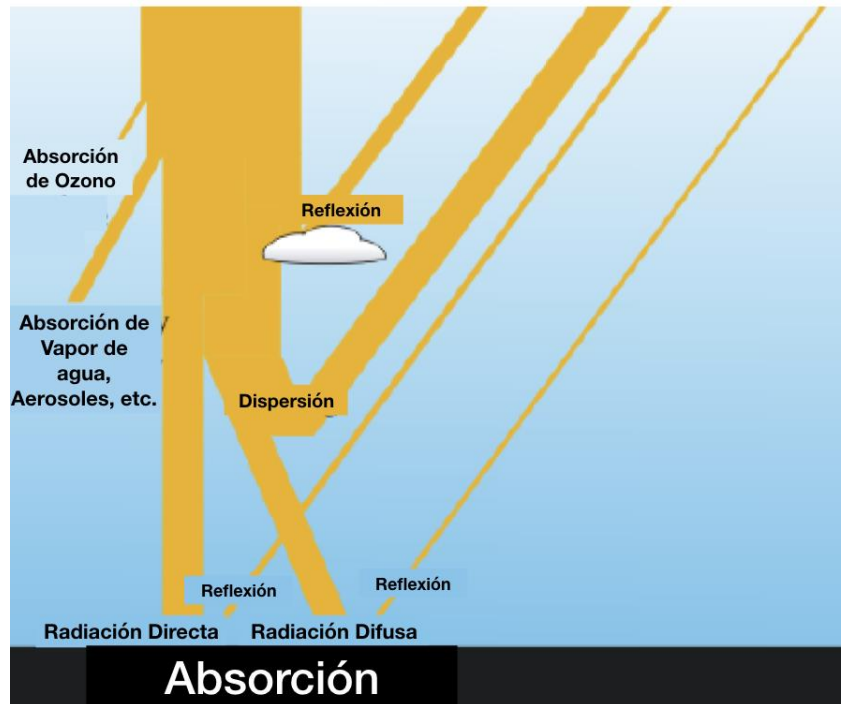


Figura 4. Distribución de las diferentes formas de la radiación

Descripción de la imagen: diferentes formas de absorción

Fuente: (Günther, 2012)

2.2.3 Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)

La luz visible con un rango de (400-700 nm), es considerada un factor esencial para la fotosíntesis. McCree (1972), en su investigación demostró un comportamiento activo fotosintético (flujo de fotones) en este rango de espectro, con variaciones mínimas en respuesta biológica, concluyendo que la actividad fotosintética es mediante interacciones de flujo de fotones, la cual denominarse radiación fotosintéticamente activa (PAR). Esta medición de luz en la fotosíntesis se expresa como densidad de flujo de fotones fotosintético (PPFD) (Iddio, Wang, Thomas, McMorrow, & Denzer, 2020).

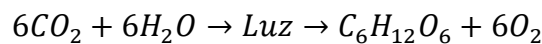
La eficiencia de la medición de PPFD puede verse afectada por diferentes factores, como el tipo de plantas y la fracción difusa (Lissarrangue, Baeza, & Sánchez, 2005). El comportamiento de PPFD bajo estos factores es un tema de debate en la comunidad científica. Parte de la comunidad asegura que las hojas sometidas a sombras se benefician del incremento en la PPFD con respecto a las hojas expuestas a plena luz del sol, demostrando que el uso de luz fotosintética (LUE) de la cubierta de dosel aumenta en presencia de nubosidad. Mientras que la otra parte, asegura que una distribución vertical



más uniforme del PPFd debería mejorar la eficiencia de (LUE) (Alton, 2008); (Lee et al., 2018).

2.3 Fotosíntesis

La radiación solar es determinante para la vida en el planeta, mediante su espectro da paso a la activación de energía en los ciclos naturales, como en procesos de la fotosíntesis (Carrasco, 2009). Este proceso captura el carbono en las plantas gracias a la interacción de energía solar. La fotosíntesis por medio de la clorofila de la vegetación absorbe la luz solar en forma de fotones para transformarlo en energía química, este proceso consiste en la combinación de CO_2 y H_2O para crear hidratos de carbono con liberación de oxígeno (De Robertis, Hib & Ponzio, 2000), así como se muestra en la siguiente ecuación.



Donde:

CO_2 : Dióxido de carbono.

H_2O : Agua.

$C_6H_{12}O_6$: Glucosa.

O_2 : Oxígeno.

En la ecuación de la fotosíntesis la energía solar es convertida en química, la misma que se acumula en forma de glucosa, el CO_2 , agua y luz solar se utilizan para producir glucosa, oxígeno y vapor de agua (Narravo, 2003).

Dentro de la fotosíntesis, intervienen dos moléculas de ATP (adenocin trifosfato) y de NADPH (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato), las ATP son las encargadas de proporcionar energía mientras que las NADPH se encargan de transportar hidrógeno y otros electrones los cuales son necesarios para las reacciones de las clorofilas en las plantas (Taggart y Starr, 2014), ya que el CO_2 ingresa a la planta, ésta se difumina y se ubica en la estoma del cloroplasto, donde posterior a esto crea un azúcar que va a participar en el desarrollo de la planta (Coronel & Echeverría, 2016).

Generalmente la orientación de las hojas y el aumento de la radiación han producido cambios en distintos grupos de plantas, ya que influye en la capacidad de interceptar la radiación. Las plantas adaptadas a condiciones extremas de alta radiación (alta montaña),



caracterizadas por tener una morfología compacta y de tamaño pequeño, ha sido directamente relacionada con la altura de las plantas y la intensidad de radiación, el cual es susceptible a ser degradado por radiación (Carrasco, 2009).

La fotosíntesis es un mecanismo bioquímico que utiliza el agua, dióxido de carbono del aire CO_2 y la luz para formar carbohidratos y liberar oxígeno O_2 al planeta. Esta actividad es de vital importancia para el planeta ya que el mismo comprende el ciclo global del intercambio gaseoso entre los diferentes seres vivos (Almeraya y Sánchez, 2015).

2.4 Productividad

Varios estudios demostraron que la acumulación de C mantiene relación con el índice de radiación que incide en un área determinada por el comportamiento de la radiación, por lo que variaciones, como incrementos o disminuciones, en la cantidad de radiación que alcanzan la superficie afecta al nivel de C libre en la atmósfera. Dentro del ámbito científico, esto se ha convertido en un tema de debate, pues los resultados de algunos estudios revelan la correlación que existe entre el comportamiento de la concentración de carbono en presencia de la radiación difusa (día nublado) y como esta aumenta mientras que, otras investigaciones afirman lo contrario (Gu et al., 2002).

Para ejemplificar esta situación Gu et al (2002), analizó el sotobosque de abeto mixto, en el cual pudo medir un incremento en los niveles de carbono en los días nublados, en relación con los días de sol directo. Los autores señalaban que esto podría ser debido a la mayor densidad de flujo difuso y el aumento de potencial hídrico de las plantas bajo condiciones de cielo nublado. De manera similar; en bosques de coníferas y de hoja caducas demostraron que la eficiencia en el uso de la radiación en días nublados era superior en comparación con los días soleados. Dentro de este mismo análisis se demostró que la acumulación máxima de C en bosques templados sucede en un nivel de radiación solar alrededor del 80% de irradiancia solar con cielo despejado, la presencia de nubes se redujo en un 50% de radiación, no obstante, no disminuyó la capacidad de almacenamiento (Young & Smith, 1983).

Por otra parte, un estudio realizado en un bosque de Norteamérica, con árboles de hoja de aguja, hoja ancha, pastizales y arbustos registraron una reducción significativa en el ecosistema en la absorción de C en días nublados en comparación con los días no



nublados estacionalmente equivalentes. Promediando la reducción del secuestro de C en todas las zonas dio un equivalente del 61% de disminución. Este estudio también concluyó que la diferencia en NEE entre los cielos nublados y soleados es más grande cuando se analiza sólo en horas de luz en día. Esto indica una inducida reducción de la respiración durante la noche después de un nublado día, el desplazamiento de la respiración de CO₂ en la noche es equivalente un tercio de la reducción diurna (Alton, 2008).

2.4.1. Comportamiento del Carbono en los Páramos Andinos Ecuatorianos

El comportamiento del C varía según la región del planeta en donde se encuentre el ecosistema. El área en donde se desarrolla el Páramo Andino mantiene condiciones climáticas particulares, cielo nublado, lluvias frecuentes, oscilaciones frecuentes de temperatura e incidencia directa de luz solar, entre otras. Estas condiciones climáticas, como el clima frío y la humedad, promueven la acumulación de materia orgánica en el suelo, esta materia orgánica al estar asociada con los minerales del suelo (aluminio= Al³⁺; hierro= Fe³⁺) crean un suelo estable, siendo resistente a la descomposición microbiana. El aluminio y el hierro son característicos de suelos originados por cenizas volcánicas, por ende los suelos predominantes, de acuerdo a la FAO, son los andosoles e histosoles, caracterizados por ser suelos negros y húmedos. Debido a los suelos estables y las condiciones climáticas mencionadas; no promueven un gran intercambio de nutrientes, por lo que ocasiona que estos suelos adquieran grandes cantidades de carbono (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017).

Las condiciones climáticas también impactan a la vegetación del páramo, ocasionando que cambie morfológicamente para su adaptación y supervivencia, como la presencia de cubiertas naturales (vellosidades) y pequeño tamaño de la planta. La cubierta vegetativa en el páramo andino consta de diferentes especies.

La principal cobertura vegetativa, con más del 80%, son los pastos perennes de *Calamagrostis Intermedia*, las cuales alcanzan altura entre 30 y 80 cm, sus hojas tienen un tiempo de vida de 2.02 a 1.67 años con una tasa de crecimiento aproximadamente de 6,7 cm por año y un índice estimado de área foliar (LAI) 2.8 a 3.4 m² m⁻². Un estudio a nivel suelo en el páramo ecuatoriano demostró que los pastos perennes fijan más carbono en la fotosíntesis que las otras especies presentes (Minaya, Corzo, VanDer, & Galárraga,



2015). Adicional a estos pastos, el páramo cuenta con vegetación endémica, como *Fetisca sp.* con un 5% de cobertura, estos son pastos con el comportamiento similar a la especie ya mencionada, y plantas cojín que tienen presencia del 10%, por ejemplo *Azorella sp.*, *Gentiana sp.*, *Plantago sp.*, *Valeriana sp.* y *Xenophyllumhumile sp.*

Por último, se tiene a los parches de bosques, como *Polylepis sp.*, y arbustos bajos, como *Weinmannia sp.* y *Buddleia sp.*, que entre los dos constan el 5% del territorio. En general, a causa de las bajas temperaturas las hojas de la cubierta vegetal de páramo tienen una baja tasa de crecimiento, por ende un largo periodo de vida y a su vez la descomposición es lenta de su hojarasca, lo que ocasiona un aporte más de materia orgánica al suelo (Minaya et al., 2015); (Jan Sevink et al., 2014).

De acuerdo a lo señalado anteriormente, el suelo y la vegetación promueven la acumulación de carbono, por lo que a nivel suelo el páramo es un sumidero de carbono (Minaya et al., 2015). Sin embargo, Galo Carrillo et al. (2019) en su investigación analizó el comportamiento del C a nivel suelo-atmósfera, involucrando al intercambio de carbono atmosférico, evapotranspiración y el clima, donde concluyó que los niveles de respiración supera los niveles de productividad, convirtiendo al páramo en una fuente de C. Además de este aporte científico, la investigación determinó que el páramo efectivamente presenta limitaciones de secuestro de C a causa de los niveles bajos de energía solar, alta humedad de suelo y elevadas tasas de respiración, lo que limita a la fotosíntesis. A su vez, se estableció que los secuestros de CO₂ y el GPP en el páramo son promovidos por el aumento de PPFD.

A pesar de existir investigaciones del comportamiento de C en el páramo Ecuatoriano con diferentes conclusiones, ya sea fuente o sumidero de C, el páramo no deja de ser un ecosistema importante las interacciones del C. Este ecosistema al igual que los demás es propenso al deterioro por la intervención del hombre, debido a factores de menor escala, como la explotación del suelo, o el uso del mismo en actividades de ganadería; y factores globales como las alteraciones el clima producidas por calentamiento global. Ante este escenario es necesario que los gobiernos focalicen sus acciones en medidas de conservación, preservación y restauración del páramo en los Andes Ecuatorianos.

2.5 Métodos de medición de radiación



Para la medición de radiación es necesario tomar muestras en el área de estudio por esta razón, para este fin existen algunas opciones como mediciones en tierra (*in situ*) y por satélite, diferenciándose entre sí por elementos funcionales (Günther, 2012).

Las mediciones *in situ* son realizadas con diferentes instrumentos, técnicas y se enfocan con evaluar los diferentes tipos de radiación (global, difusa y directa). Para estos existen diferentes dispositivos que miden varios rangos de longitud de onda; la utilización de cada instrumento dependerá del objetivo de la medición (Kostic & Mikulovic, 2017); (Günther, 2012).

El dispositivo estándar para la medición de la radiación total y difusa es el piranómetro, como por ejemplo el pirómetro BF3, este instrumento cuantifica el nivel de irradiancia en un determinado rango de longitud de onda igual al de la radiación solar. Los detectores de termopila son cúpulas de vidrio o cuarzo, se conforman de un domo que protege al dispositivo y aparte filtra el rango de longitud de onda, estas cúpulas cuentan con una forma específica que permite una transmisión igual en todas las direcciones. Estos dispositivos emplean el principio fotoeléctrico, la termopila tiene un revestimiento de color negro; esta pintura tiene la característica de ser no espectralmente selectiva por lo cual causa que el coeficiente de absorción sea muy alto (Kostic & Mikulovic, 2017); (Günther, 2012). Aparte de los dispositivos estándar de medición de radiación, se han desarrollado sensores que aporten con mediciones más precisas ante complicaciones de origen y rango de espectro de luz, como el sensor cuántico LICOR LI-190R (LI-COR Biosciences, 2018).

2.5.1 Piranómetro BF3

El piranómetro modelo BF3, mide la incidencia de radiación solar total, la radiación difusa y el estado del sol, así pues, la fracción directa se la obtiene a partir de la resta de la energía solar total menos la fracción difusa.



Figura 5. Piranómetro BF3

Fuente: (Meteorcomm, 2020)

Correspondiente con el objetivo de la medición se puede configurar las unidades de en las que se expresa las muestras obtenidas:

- Para medir la actividad fotosintéticamente activa (PAR): de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
- Para medir energía: W m^2 .
- Para medir la luminancia: klux.

Las mediciones obtenidas a través de este dispositivo cuentan con una precisión del 95%, es decir, 95 de cada 100 lecturas individuales están dentro de los límites establecidos bajo condiciones climáticas normales. Este dispositivo no contiene elementos móviles pues no requiere de ajustes manuales para configurar el seguimiento del sol motivo por el cual este mantiene su precisión la colocarse sobre una superficie plana. Por otro lado, la versión caliente del BF3 permite el uso en situaciones de lluvia y heladas. Este dispositivo se conecta a un sistema SunScan para evaluar la radiación fotosintéticamente activa que se intercepta por el dosel de las plantas y por lo tanto la estimación del índice de área de la hoja (LAI), este dispositivo mide de manera instantánea de la radiación incidente en el dosel; radiación difusa y radiación total (Wood & Potter, 2002).



2.5.2 Sensor de radiación cuántico (LI-COR LI-190R)

El sensor cuántico LI-COR LI-190R, fue creado para la medición de respuesta de la fotosíntesis a la luz incidente. Esta medición ha sido una problemática en la comunidad científica, a causa de la variedad de especies vegetales. McCree (1972) propuso la definición PAR considerando los flujos de fotones en el rango de fotones (400-700 nm), ya que en su investigación las plantas demostraron un comportamiento activo fotosintético en este rango de espectro con variaciones mínimas en respuesta biológica. La comunidad científica, en base al hallazgo de McCree, acordó que un sensor ideal debe considerar las interacciones de fotones a través de 400 nm a 700 nm sin involucrar la respuesta de las plantas, claramente al no involucrar la actividad biológica puede haber una variación significativa en la respuesta espectral de la fotosíntesis debido a la variedad de especies, por lo que no hay un sensor único que tenga una respuesta espectral adecuada para todas las plantas (LI-COR Biosciences, 2018).

En la actualidad, se puede contar con una variedad de sensores que brinden mediciones PAR en cielo abierto, sin embargo han demostrado tener complicaciones con fuentes (artificiales y naturales) de luz y problemas de sobre estimación o subestimaciones. LI-190R por su parte, ha demostrado ser un dispositivo ideal para la medición del espectro fotosintético al no presentar complicaciones de respuesta a causa de la fuente de luz, o errores de sobre estimación y subestimación, sólo mostrando una ligera sobrestimación en 660 nm, lo que convierte a este dispositivo como un sensor ideal para su uso (LI-COR Biosciences, 2018).

En la *Figura 6* podemos observar el sensor LI-COR LI-190R, el cual mide la actividad fotosintéticamente activa (PAR: $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) o la densidad de fotones fotosintéticos (PPFD: $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Este sensor es capaz de captar todas las longitudes de onda correspondientes a la onda PAR (400-700 nm) (LI-COR Biosciences, 2018), a través de una combinación de fotodiodo de silicio y de un filtro óptico de vidrio, este filtro es encargado de excluir las longitudes de onda fuera de PAR, lo que asegura una precisión independiente a la fuente de luz. Este sensor es resistente a la interperie; a altas temperaturas (Rango de temperatura de funcionamiento: -40°C a 65°C) y humedad (Rango de humedad relativa (HR): 0% a 95% HR) (LI-COR Biosciences, s.f.).



Figura 6. Sensor Cuántico LI-COR LI-190R

Fuente: (LI-COR Biosciences, s.f.)

Los sensores de luz de LI-190R están corregido con coseno, para proporcionar mediciones más precisas de radiación hasta ángulos de incidencia de hasta 82° . El mecanismo de incidencia de radiación consiste en recibir el haz de luz mediante un disco acrílico llamado difusor, cuando mayor es el ángulo de la incidencia de radiación el difusor es el que recepta la mayor cantidad de incidencia, al aproximarse al ángulo de 80° el difusor bloquea una porción de luz para mantener la respuesta correcta, en un ángulo de 90° de incidencia, el difusor se bloquea para mantener una respuesta adecuada de coseno, lo podemos observar en la *Figura 7* (LI-COR Biosciences, s.f.).

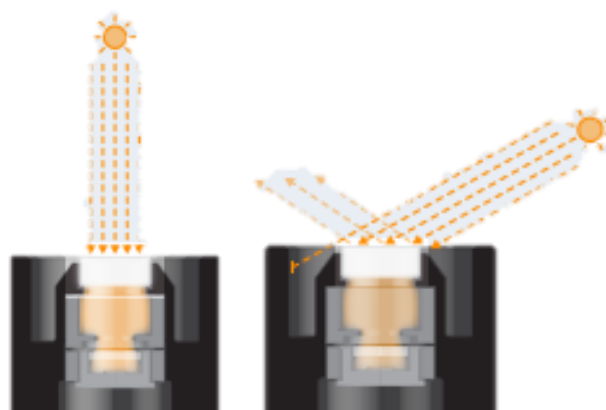


Figura 7. Comportamiento del difusor en LI-COR LI-190R

Fuente: (LI-COR Biosciences, s.f.)

2.6 Métodos de medición de CO_2 y el H_2O

2.6.1. Covarianza de remolinos

La metodología de covarianza de remolinos, evalúa los intercambios netos de calor y masa en elementos como el CO_2 y el H_2O presentes en la atmósfera y el límite de una superficie horizontal homogénea, en esta zona los flujos son constantes, pero existe un mecanismo de transporte llamado turbulencia. Los intercambios se realizan mediante numerosos remolinos, de acuerdo la *Figura 8*, se evidencia que en la primera parte el remolino, por acción de flujo que sigue la dirección a las manecillas del reloj a una velocidad específica transporta el aire, luego esta misma masa se transporta en un sentido contrario con una velocidad específica. Son precisamente estos intercambios los que permiten medir los cambios que se producen en el movimiento vertical (Wang, Guo, Li, Lan, & Sui, 2010); (Burba, 2013). Estos flujos de intercambio son constantes en la capa superficial, como se mencionó anteriormente, de esta manera la metodología propuesta arroja datos representativos de los flujos de los intercambios netos entre el ecosistema y la atmósfera (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

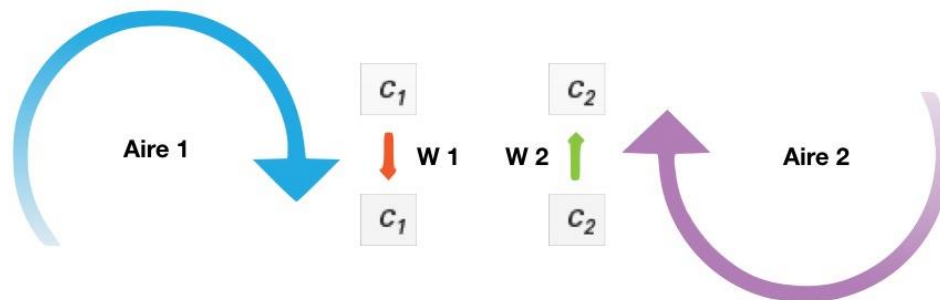


Figura 8. Mecanismo del Sistema de Remolinos

Fuente: (Burba, 2013)

Los datos obtenidos de manera experimental, muestra la dificultad que inherente presenta este tipo de sistemas durante su representación, motivo por el cual los instrumentos arrojan datos de baja calidad y consecuentemente la toma de muestra se reduce a intervalos de tiempo grandes; lapsos de tiempo de alrededor de 30 minutos (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

La estación necesaria para el análisis de covarianza consta de tres instrumentos esenciales: un analizador de gas infrarrojo o IRGA (por sus siglas en inglés); un anemómetro sónico anteriormente mencionado y de un sistema para el almacenamiento de datos; tal como se muestra en la *figura 9*.

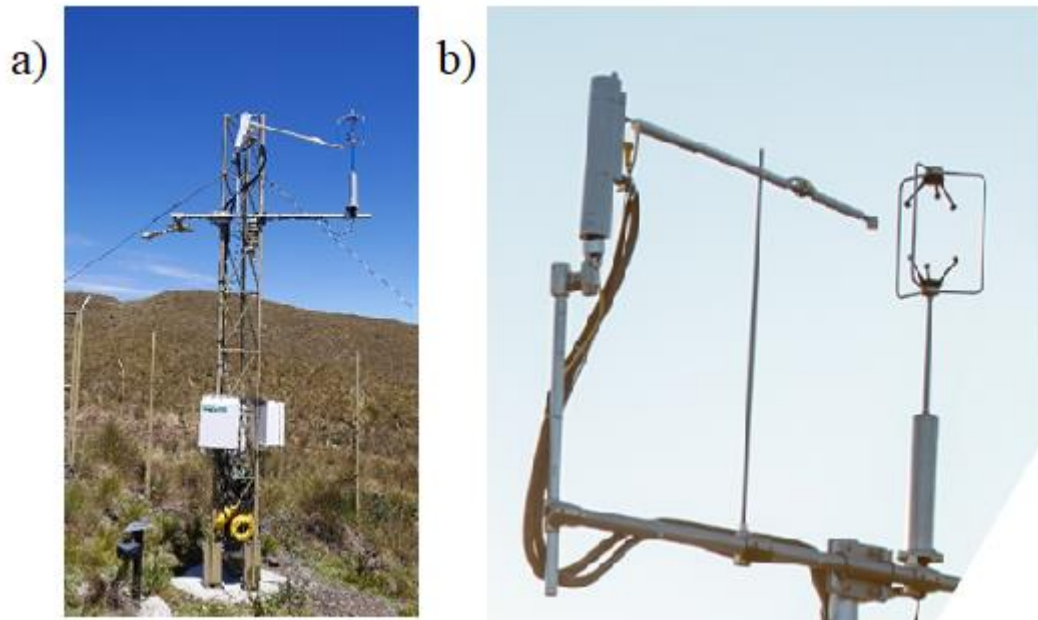


Figura 9. Sistema Covarianza de Remolinos

Fuente: (LI-COR Biosciences, s.f.)

El equipo de recolección de datos denominado *datalogger* tiene conexión con todos los equipos de la torre, pues este debe registrar de manera constante los datos provenientes de los demás instrumentos de medición siguiendo el esquema programado de acuerdo a las necesidades que se requiera.

El IRGA es el dispositivo encargado de medir la densidad del CO_2 y del H_2O mediante dos posibles maneras, la primera conocida como lazo cerrado, absorbe el aire y lo transporta por tubos hasta el interior de este equipo para ser analizado; mientras que, en la segunda opción, el proceso de estudio del aire se lo realiza in situ.

El tercer elemento de la torre es el anemómetro sónico cuyo propósito es medir los niveles de vapor de agua y de dióxido de carbono. El anemómetro sónico mide la velocidad del viento en tres dimensiones, esto lo realiza mediante transductores sónicos de alta frecuencia, emitiendo una onda sónica hacia un traductor especiales, como se puede visualizar en la *Figura 9b*.



Además de estos tres elementos, la torre covarianza de remolinos cuenta con los siguientes dispositivos adicionales: un radiómetro que mide la energía radiante entrante menos la reflexión de la tierra, en otras palabras mide la energía disponible para que la tierra ocupe y realice sus procesos naturales; sensores que miden las longitudes de onda de la radiación que las plantas utilizan para su fotosíntesis, en otras palabras es la densidad fotosintéticamente activa (PPFD) (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

Los ecosistemas cuentan con una serie de factores que tiene un comportamiento no determinista, lo que puede influenciar en la obtención de los datos; como respuesta a esto la instrumentación e infraestructura deben mantener sólidas para hacer frente a las diferentes condiciones naturales (nieve, vientos fuertes, animales, etc.). En cuanto a la instrumentación es esencial, que los dispositivos están calibrados y validado para recopilar datos con menos incertidumbres.

La estabilidad de la torre afecta directamente la medición de los vientos y la turbulencia por este motivo una torre de covarianza de remolinos estable debe tener una precisión de medición de momentos del viento de entre 10-20 Hz. Por este motivo la torre tiene que ser colocada de manera que se optimice de tiempo de exposición de los vientos teniendo en cuenta las particularidades de la topografía del lugar de estudio.

Las mediciones anuales e interanuales del intercambio ecosistémico neto (NEE) se beneficia de mediciones contiguas, en virtud de esto los sensores de la torre deben colocarse a un alta suficiente para que sobrepasen el dosel, sin sobrepasar el límite de la superficie (Aubinet, Vesala, & Papale, 2012).

Para propósitos de esta tesis, es preciso resaltar que las mediciones de flujo de covarianza se realizan sobre los pastizales cerca de la superficie del suelo, lo que representa una ventaja para el flujo de almacenamiento pues resulta menor que el flujo de Foucault por ende el error es pequeño para el intercambio de CO₂ del ecosistema neto.

3. Metodología

El presente estudio es de diseño observacional debido a que se recolectarán datos sin manipular las variables y, de tipo transversal porque es el más apropiado para el procesamiento de datos que serán útiles para el cumplimiento de los objetivos planteados, así como para el desarrollo general del trabajo de investigación.

3.2 Sitio de Estudio

El estudio se realizó en la cuenca de Zhurucay, específicamente en el observatorio eco-hidrológico situado en la región sur de los Andes Ecuatorianos, aproximadamente a 85 km al sureste de Cuenca. La cuenca comprende un área de 7.53 km² a 3200-3900 m.s.n.m., la precipitación que registra es de entre 900 y 1600 mm con estacionalidad débil (Padrón et al., 2015). La precipitación del sector es bimodal, lo que significa que en los meses de diciembre a febrero presenta lluvia, mientras que de agosto a septiembre presenta una estación menos húmeda, interrumpida por periodos de sequías. Cabe mencionar que la niebla, en este ecosistema, no es interceptada; por lo tanto, éste no favorece al reservorio de agua en el suelo (Crespo et al., 2011).

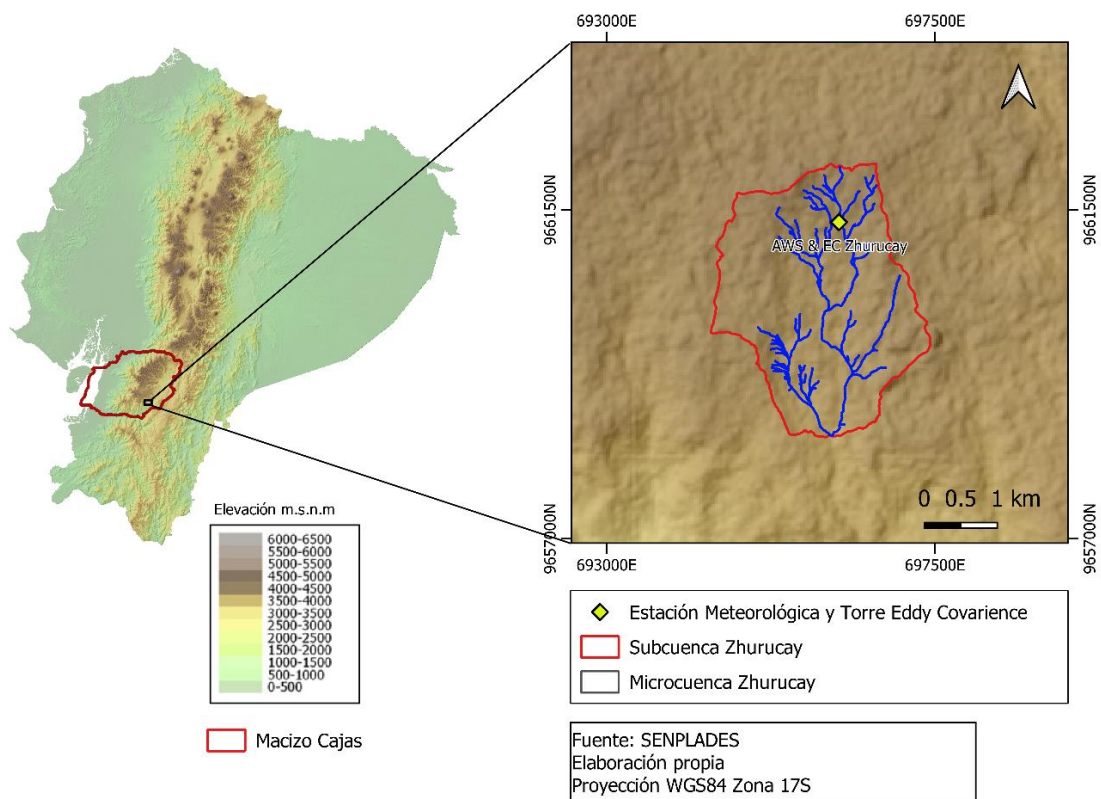


Figura 10. Ubicación del sitio de estudio

Fuente: Elaboración propia



La pendiente de la cuenca es del 18-20%, esto marca la existencia de variabilidad en el flujo de duración de curva, esta pequeña pendiente oculta la diferencia en los patrones de precipitación (Crespo et al., 2011).

La temperatura media es de 7°C a 3500 m.s.n.m., siendo constante durante el año pero con variabilidad marcada entre los días; por tal razón, la temperatura intradía puede llegar a 20°C, la temperatura en este sitio disminuye entre 0.5 y 0.7 grados Celsius por cada 100 metros (Crespo et al., 2011), El mismo efecto de la temperatura intradía sucede con la radiación solar, la radiación solar promedio es de $13.90 \text{ MJ } m^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Córdova, Carrillo-Rojas, Crespo, Wilcox, & Céleri, 2015); los páramos andinos presentan altos valores ya que se encuentran cerca de la línea ecuatorial y, por la altura respecto al nivel del mar, los altos picos de radiación se presentan al medio día, mientras que los valores bajos ocurren en la noche hasta llegar a cero (Llambí et al., 2012).

El clima de la zona de estudio se ve influenciado por el régimen del Pacífico y el aire continental predominante de la cuenca del Amazonas, los valores pico de precipitaciones estacionales se relacionan con el paso de la Zona Intertropical de convergencia (ITCZ) a través de la región, produciendo un clima frío, frecuentemente nublado con niebla y con precipitaciones diarias. La cuenca se encuentra en el suelo Quimsacocha, cubierto por: rocas volcánicas, flujos de basalto, fenocristales de feldespato y depósitos piroclásticos andesíticos; en cuanto a la hidrología, los suelos son casi permeables y la densidad es baja en la superficie del suelo (Crespo et al., 2011).

La vegetación dentro del área de estudio se caracteriza por su resistencia a condiciones extremas de temperatura, radiación y viento; las características morfológicas y fisiológicas de esta flora son las que facilitan su favorable respuesta ante eventos extremos (Llambí et al., 2012); así también, estas características son útiles para la captación y regulación de agua a efecto de ubicarse en una zona de condensación. En el sitio de estudio, se evidencia la presencia de pastizales de páramo de los géneros *Calamagrotis* y *Festuca*, y plantas cojín como *Plantago rígida*, *Xenophyllum*. La vegetación endémica del sitio de estudio presenta pastos como *Festuca Sp.* y plantas cojín. Las malezas de hierba cubren más del 70% de la tierra y las plantas de almohada cubren menos del 25%.



Los bosques de *polylepis* y pino no cubren más del 5% del área total de la cuenca (Mosquera et al., 2015).

Los cojines están en zonas constantemente saturadas y, por lo tanto, corresponden casi exactamente al recubrimiento de histosoles. Se llama a estos humedales, constantemente, humedales del páramo andino; los humedales en páramo usualmente aparecen en el fondo de los valles (Mosquera et al., 2015).

3.3 Adquisición de datos

Los datos de radiación y captura de CO₂ fueron extraídos del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay de la Universidad de Cuenca considerando el periodo (2017-2018). Para la medición de radiación y densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) se usaron equipos ópticos. Específicamente en la estación mencionada, se encuentra el sensor solar BF3 y sensor LICOR-190R, mediante los cuales se obtuvieron datos de radiación solar total, difusa y PPFD, respectivamente.

En dicho observatorio de Zhurucay se encuentra la torre de covarianza de remolinos (Carrillo et al., 2019), a través de la que se obtuvieron los datos de captura de carbono (NEE), donde GPP y Reco se obtienen como estimados de NEE.

Estos datos fueron almacenados en una unidad logger y se realizaron correcciones instrumentales utilizando el paquete REddyProc para la eliminación de picos, ajuste de la zona de generación de flujos debido a topografía del sitio, problemas de cobertura temporal (pérdidas de datos) y subestimaciones en la respiración del ecosistema (Reco) (Carrillo-Rojas et al., 2019).

3.4 Procesamiento de información

En primer lugar se procesaron los datos obtenidos del sensor solar BF3 respecto a radiación solar difusa y directa. El piranómetro BF3 está programado para generar lecturas de datos de radiación cada cinco segundos con unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR), por lo que, por medio del programa Microsoft Excel se realizó un promedio de dichos datos clasificándolos según intervalos de 30 minutos, esto con el fin de facilitar el procesamiento posterior y con miras a minimizar errores, los datos micrometeorológicos



requieren una escala de tiempo integral en correlación con la turbulencia, la información debe estar disponible en datos estándar de 30 minutos (Aubinet et al., 2012). Una vez cumplida esa acción, se analizaron los datos de PPF_D, obtenidos por el sensor LI-190R, que reporta datos cada media hora con unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR), para adjuntar nuevos datos promediados del BF3.

Posterior a ello, se escogió un día al azar para realizar, con sus datos, una gráfica de curvas de radiación total del BF3 y de PPF_D para así visualizar si existe un desfase entre estos dos. Con base en esta gráfica, se evidenció la existencia de dicho desfase, lo que obligó la realización de un nuevo promedio de datos BF3; de esta manera, se otorgó el nuevo primer valor promedio al anterior dato de día, por ejemplo: si se le otorgó el promedio a 01/01/2017 12:30, en el nuevo promedio se otorgó a 01/01/2017 12:00.

Luego de la determinación del desfase y de la readecuación de promedios, se procedió a procesar la información referente a radiación directa; para ello, se restaron los datos de PPF_D (PAR) y de radiación solar difusa (PAR) (Radiación directa = PPF_D - Radiación difusa). Al contar con todos los datos de radiación, estos fueron clasificados según el mes correspondiente a los datos.

Los datos de captura de carbono (-NEE) obtenidos por el sistema covarianza estaban, de igual manera, agregados cada media hora y con unidades de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PAR), se procedió a unir dichos datos con los de radiación de acuerdo al mes correspondiente.

Considerando que la captura de carbono se representa en -NEE, se observó el comportamiento de secuestro de carbono en la zona y se determinó el periodo de secuestro de carbono en la zona, de fuente a sumidero de carbono y de sumidero a fuente de carbono. A partir de este momento, se realizó el análisis sobre datos de nivel diurno, este procesamiento minimiza la influencia de la humedad del suelo y cambio fisiológico en los resultados obtenidos. Por lo tanto, se entiende que esta técnica guarda cierta independencia respecto a las variables modeladas (Alton, 2008).

3.5 Determinación de días idóneos

Para la determinación de los días idóneos, se tomaron en cuenta todos los datos de PPFD por cada mes, siendo los datos con mayor precisión aquellos de radiación total. Posterior a ello, se realizó un gráfico de curvas para visualizar campanas de gauss y, como se muestra en la *Figura 11*, a través de ellas, fijar si el inicio y el final de las campanas representan los límites de un día para que permita determinar si el comportamiento del PPFD es congruente con las horas del día.

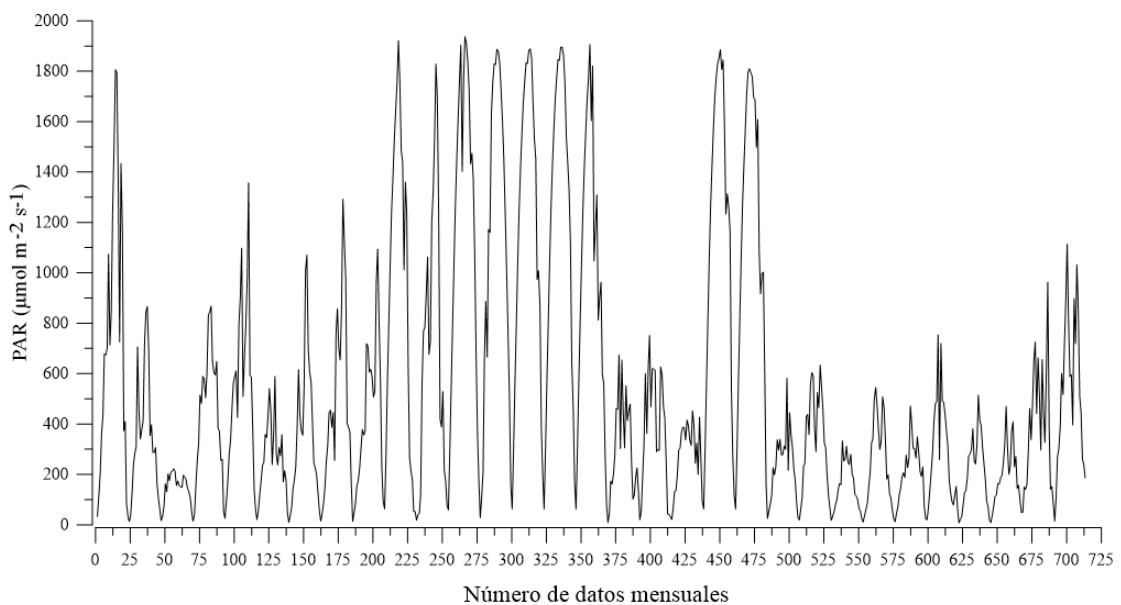


Figura 11. Gráfica de PPFD de Julio 2018

3.6 Determinación de diferencia de resultados de la radiación total (BF3) y el PPFD: identificación de días nublados y soleados.

A cada día idóneo identificado se le realizó la sumatoria de datos de radiación total, radiación difusa, radiación directa (proveniente del sensor BF3) y de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) (proveniente de LI-190R).

Posterior a ello, se determinó para cada día el porcentaje de radiación difusa (*ecuación 1*) y directa (*ecuación 2*); es decir, se determinó si el día era nublado o soleado. Un día nublado se consideró como tal cuando el porcentaje de radiación difusa (rad DIF) es mayor que el porcentaje de radiación directa (rad DIR), mientras que, si el porcentaje de

radiación directa es mayor que el porcentaje de radiación difusa se clasificó tal día como soleado. Los porcentajes mencionados se obtuvieron de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de rad DIF (\%)} = \frac{\sum \text{rad DIF}}{\sum \text{Radiación Total}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Porcentaje de rad DIR (\%)} = \frac{\sum \text{Rad DIR}}{\sum \text{Radiación Total}} * 100 \quad (2)$$

Para la determinación de la diferencia de resultados, entre los dos sensores, se calculó el porcentaje de radiación difusa con base a la radiación dada por el sensor del sistema de covarianza (PPFD) mediante la *ecuación 3*, para así establecer el porcentaje de diferencia de resultado entre el sensor BF3 y el sensor de covarianza de remolinos.

$$\text{Porcentaje de diferencia (\%)} = \frac{(\sum \text{Radiación Total} - \sum \text{Densidad de flujo de fotones fotosintéticos})}{\sum \text{Densidad de flujo de fotones fotosintéticos}} * 100 \quad (3)$$

Por último, a través del software Grapher 12 se realizó una representación gráfica del PPFD, radiación total y de la radiación difusa de cada día perfecto identificado, como se demuestra en la figura 12.

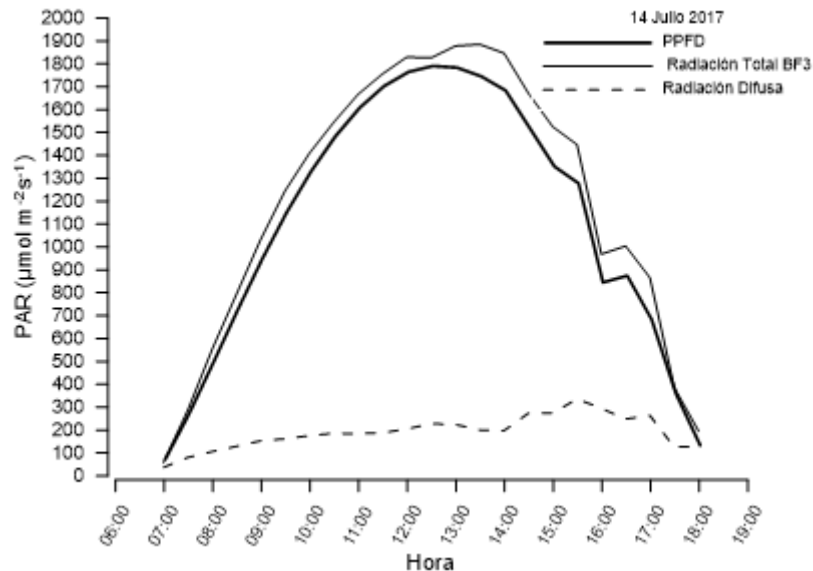


Figura 12. Gráfica de PPFD, radiación solar difusa y directa de acuerdo a la hora diurna

3.7 Correlación del intercambio ecosistémico neto y radiación difusa, radiación directa y PPFD: Gráfica de dispersión y ecuación de dichas gráficas.

Para demostrar la existencia de relación entre el NEE, radiación difusa, radiación directa y PPF, se utilizó el paquete ggplot2 del programa R-studio, el cual realiza una gráfica de correlación con base en estas variables. Este software contiene la herramienta “geoms” a cargo de los elementos visuales, específicamente se utilizó “geo_point” para generar una capa que represente los datos con puntos y “geo_smooth” para trazar la línea de tendencia (Matloff & Meetup, 2011), los cuales fueron útiles a demostrar gráficamente lo que se requería en este punto.

Este script arrojó el modelo de las siguientes figuras (Figuras de la 13 a la 15) con un umbral de confianza, por defecto del paquete, del 95% y su respectiva línea de tendencia.

Para la obtención del coeficiente de correlación se ajustaron las variables en un modelo lineal con la función “lm” que ingresa una variable dependiente (NEE) y una variable independiente (radiación difusa, radiación directa, radiación total). Luego se corrió el script “anova” para obtener un análisis de la desviación para los modelos ajustados anteriormente, entonces se obtuvo información de la prevalencia de correlación entre las dos variables. Finalmente, se ingresó la herramienta “summary”, misma que facilita información estadística de la gráfica, destacan la media y el coeficiente de correlación de la variable independiente escogida y la dependiente.

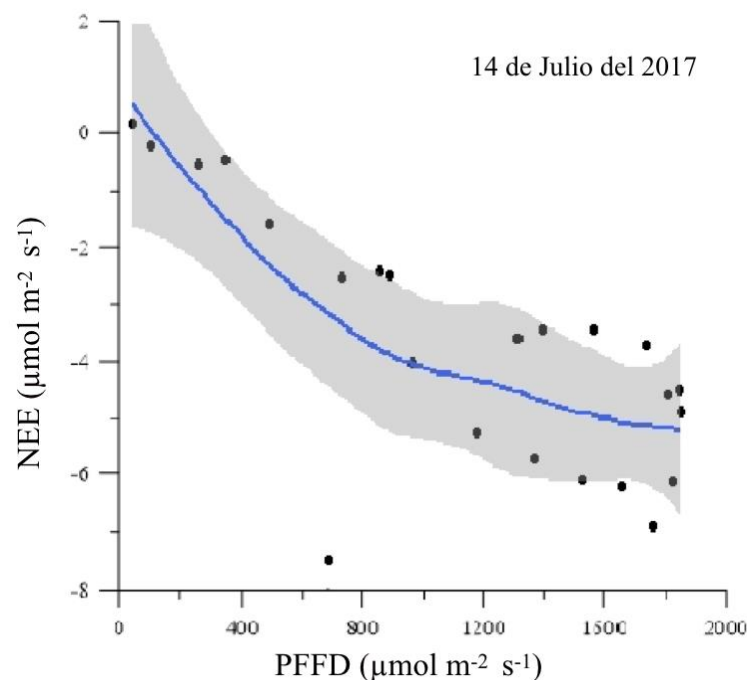


Figura 13. Correlación de PPF y NEE del 14 de Julio del 2017

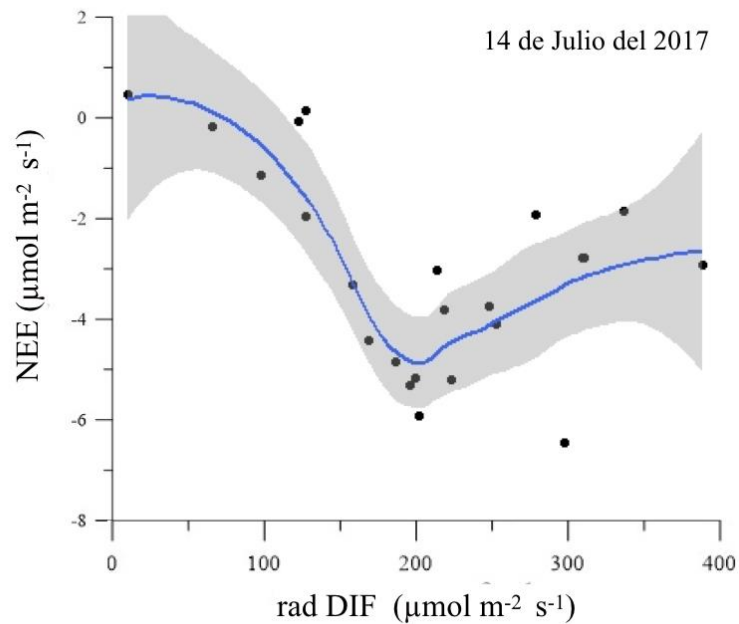


Figura 14. Correlación de la Radiación Difusa y NEE del 14 de Julio del 2017

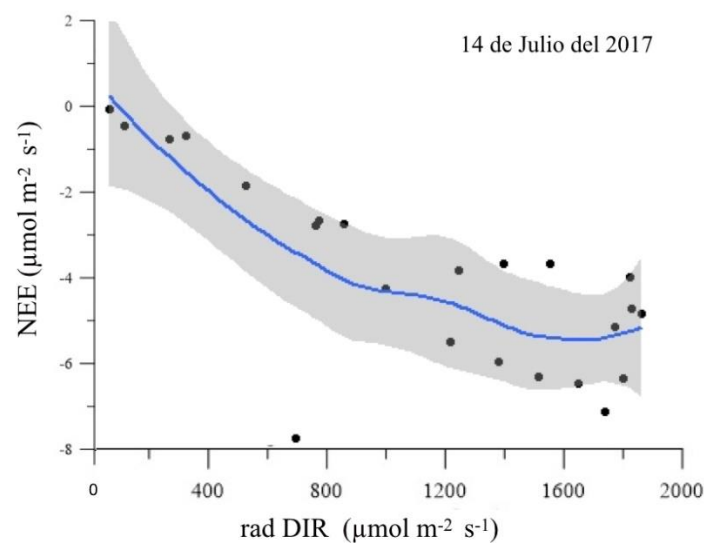


Figura 15 Correlación de la Radiación Directa y NEE del 14 de Julio del 2017

3.8 Determinación de diferencia de comportamiento de la captura de carbono en radiación difusa y directa.

Para el análisis de la determinación de diferencia sobre el comportamiento de captura de carbono con respecto a la radiación, se escogió el mes de julio de los años 2017 y 2018, correspondientes a un mes de periodo seco. Dentro del periodo seleccionado, se



recolectaron los días idóneos identificados en la sección “3.5” (días nublados y días soleados). Cada día fue sometido a un promedio intradiario de PPFD y de NEE y, a dichas variables se calculó un error con la finalidad de obtener valores que brinden mayor confiabilidad.

Se debe considerar la existencia de otros errores que no pueden ser determinados, ni tratados en esta investigación (asociados al instrumento y a flujos vespertinos y nocturnos indetectables por su baja turbulencia, que en un balance diario de carbono pueden generar una sobrestimación de captura) (Aubinet et al., 2012); (Carrillo et al., 2019). Los errores aleatorios tienden a ser bastante grandes en la escala de tiempo de media hora y no pueden ser ignorados, incluso en el contexto de integrales de flujo anual, especialmente a medida que se propagan a través de series de tiempo de intercambio de ecosistemas netos (NEE) con falta de datos (medición) (Aubinet et al., 2012). La pérdida por el sistema de datos de NEE de covarianza de remolinos es del 5% (Aubinet et al., 2012).

Estos datos obtenidos fueron ingresados en el programa NCSS 2019 que permitió realizar una gráfica de error que categorizó los resultados según días nublados y días soleados. Por último, se identificaron las diferencias en el comportamiento de estos diferentes días.

4. Resultado y Discusión

Mediante el análisis, se identificó que el porcentaje de diferencia que más se repitió entre el piranómetro BF3 y el sensor LI-190R, fue del 8% y, un valor mínimo de diferencia de porcentaje del 1%, tanto en días con mayor radiación difusa como en días con mayor radiación directa; mientras que, en un día con mayor radiación difusa se presentó el pico máximo de diferencia de un 12%.

En el análisis de curvas del PPFD de los meses en el periodo (2017-2018), se identificaron 17 días idóneos. Del total de días idóneos, se identificaron 12 días soleados y 5 días nublados, la *Figura 16* nos ayuda a identificar la proporción de radiación difusa en cada día y facilita la identificación de los días nublados y soleados.

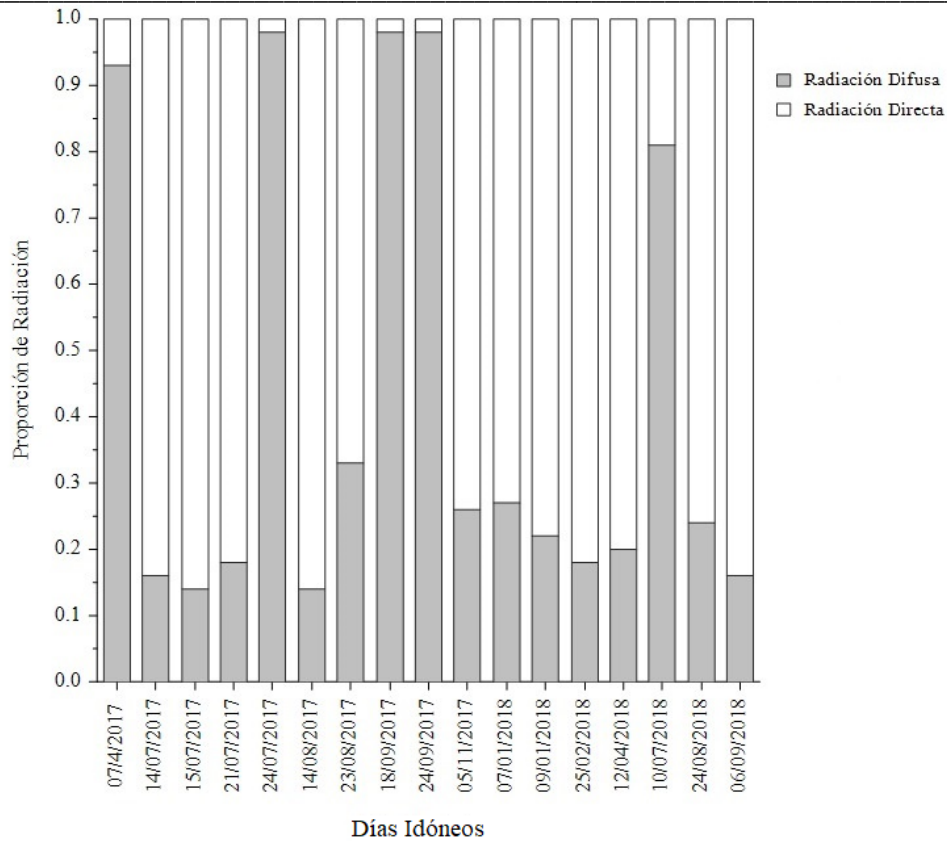


Figura 16. Proporción de radiación difusa y directa en los días idóneos

En la *Tabla 1*, se observa la cuantía de los días idóneos, el porcentaje de las radiaciones (directa y difusa) y la identificación de los días en periodos húmedos y secos. En el periodo seco, se obtuvieron tanto días nublados como soleados; mientras que, en el periodo húmedo sólo se obtuvieron días soleados.

Tabla 1. Porcentajes de radiación difusa y directa.

N	Día	Radiación	Radiación
		Difusa %	Directa %
1	04/07/2017*	93,22%	6,78%
2	14/07/2017*	15,78%	84,22%
3	15/07/2017*	14,49%	85,51%
4	21/07/2017*	17,73%	82,27%
5	24/07/2017*	97,55%	2,45%
6	14/08/2017*	13,86%	86,14%
7	23/08/2017*	33,10%	66,91%



8	18/09/2017*	97,60%	2,39%
9	24/09/2017*	98,05%	2,50%
10	05/11/2017*	25,69%	74,31%
11	07/01/2018**	27,34%	72,66%
12	09/01/2018**	22,50%	77,50%
13	25/02/2018**	17,90%	82,10%
14	12/04/2018**	20,36%	79,64%
15	10/07/2018*	80,75%	19,25%
16	24/08/2018*	24,16%	75,84%
17	06/09/2018*	16,29%	83,72%

* Período Seco

** Período Húmedo

Fuente: (Matute, 2020)

En los doce días soleados, se mostró un porcentaje máximo de radiación difusa del 33,10%, con un rango porcentaje de radiación difusa del (13,86% - 33,10%). Mientras que, en los cinco días nublados se identificó un porcentaje máximo de radiación difusa del 98,05%, con un rango de porcentaje de radiación difusa del (80,75% - 98,05%).

Para representar el siguiente análisis de días nublados y soleados se escogerán como ejemplo los días: 4 de julio del 2017 y 14 de julio 2017, respectivamente.

En el análisis intradiario de los días nublados, (*Figura 17a*), se presentó un comportamiento anormal (fluctuaciones frecuentes con picos prominentes) del PPF, lo que puede ser ocasionado por la presencia de alta nubosidad en dichos días, condición que aumenta la proporción de radiación difusa; por otra parte, el análisis intradiario de los días soleados, (*Figura 17b*), presentó un comportamiento del PPF que se ajusta a una forma normalizada (Gaussiano), este resultado puede encontrar explicación en la ausencia de nubosidad y, a su vez, aumentar los niveles de radiación directa, así como se demuestra en la *Figura 17*. Por lo tanto, en periodos secos (días soleados y nublados) el PPF tiene un comportamiento normalizado y no normalizado, en cambio, en el periodo húmedo (días soleados) el PPF tiene un comportamiento normalizado.

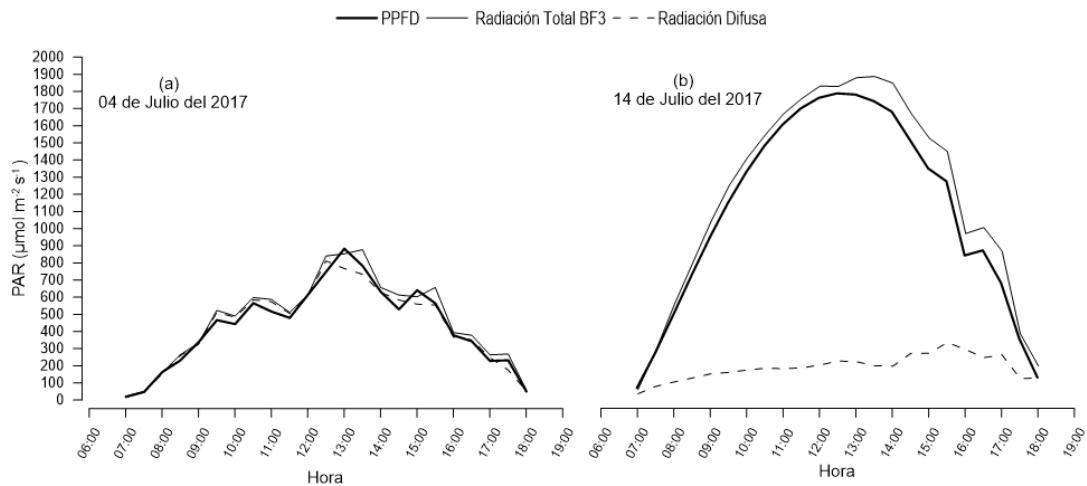


Figura 17. Comportamiento de PPFD, Radiación Difusa y Directa de acuerdo a la Hora Diurna. a) Día Nublado (04 de Julio del 2017); b) Día Soleado (14 de Julio del 2017)

En la *Figura 17*, se evidencia gráficamente el comportamiento intradiario de la radiación entre los dos casos. Específicamente, en los días difusos (*figura 17a*) el PPFD alcanza valores menores respecto al PPFD en los días soleados (*figura 17b*), mientras que, los niveles de radiación difusa en la *Figura 17a* son superiores a los que se obtuvieron en la *Figura 17b*. Así como también, la radiación difusa en días difusos representa prácticamente la totalidad de PPFD en dicho día, mientras que en los días soleados el nivel de la radiación difusa es visiblemente menor que el PPFD, siendo mayor la proporción de radiación directa.

Los días con mayor radiación directa obtuvieron valores promedio de radiación PPFD de $1\,088,35\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ (máx= $2\,128,3\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$), mientras que los días con mayor radiación difusa alcanzaron niveles promedio de radiación PPFD de $295,96\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ (máx= $1\,330,7\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$). De esta información podemos desprender que, a nivel promedio, la PPFD en los días nublados es un 73% más baja que en los días soleados y, en base a los valores máximos de PPFD, en los días nublados es un 38% más baja que en los días soleados; mientras que, Hollinger et al (1994) determinó que en los bosques de Nueva Zelanda (terrazza glacial) la PPFD en los días nublados es entre 21% y 45% más baja que en los días despejados, reflejando que la influencia de la nubosidad es diferente entre estos dos ecosistemas.

En la *Figura 18* se muestra la actividad fotosintética tanto de días nublados como soleados, la cual se encuentra activa en el periodo 07h00 – 17h30. Específicamente, en días con mayor radiación directa, la actividad fotosintética inicia en el rango de horas de 07h00 – 07h30, mientras que en días con mayor radiación difusa la actividad fotosintética inicia en el rango de horas de 07h30 – 08h00.

Posterior al inicio, los valores de PPFD se incrementaron con el pasar de las horas hasta llegar a 12h00 – 13h00, cuando se presentan los valores máximos de actividad fotosintética activa en días soleados, mientras que en los días nublados los valores máximos se presentan de 10h00 – 10h30. Luego de alcanzar los valores máximos en el día, el comportamiento de PPFD en los dos casos tiende a disminuir en las horas de la tarde como consecuencia de la nubosidad característica del páramo andino, manteniéndose así hasta las 17h30 – 18h00, como lo evidencia la *Figura 18*.

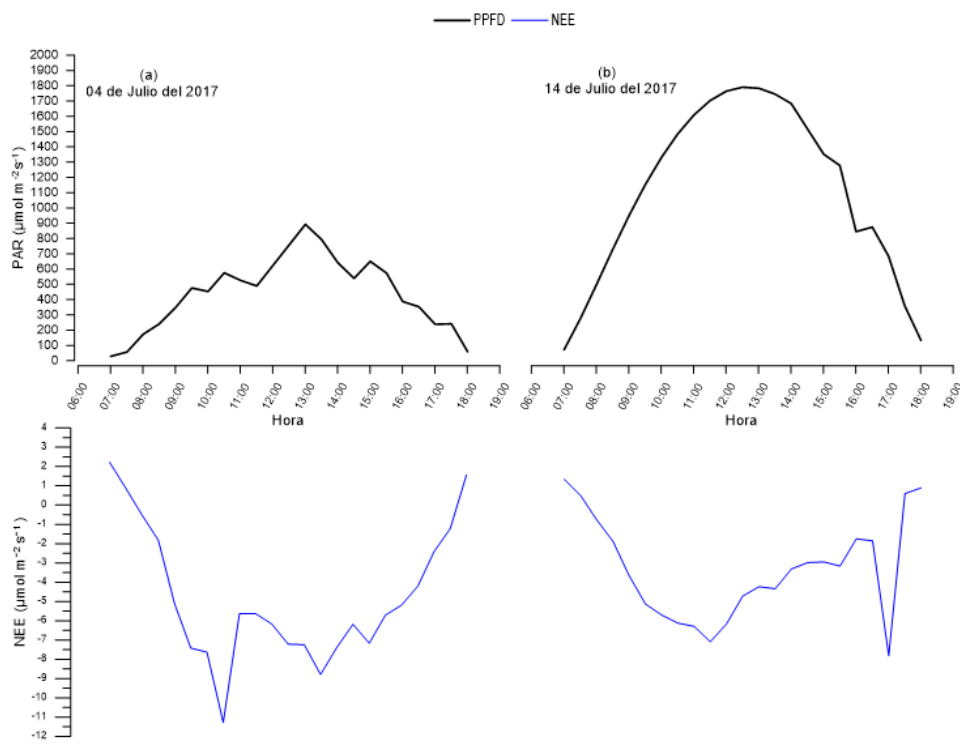


Figura 18. Comportamiento del NEE de acuerdo a la hora diaria. a) Día Nublado (04 de Julio del 2017); b) Día Soleado (14 de Julio del 2017)

En el análisis intradiario de -NEE se observó que el comportamiento de -NEE presenta fluctuaciones, picos ascendentes y descendentes. En el mes de septiembre-2017 (*Figura*

19a y 19b) se presentaron picos de variación frecuentes en comparación con los otros meses.

En días nublados, el paso de fuente de carbono a sumidero de carbono varió entre 08h30 – 09h30 para posteriormente ascender y fluctuar constantemente el nivel de $-NEE$. El cambio de comportamiento de sumidero (captura) a fuente de carbono (respiración) se marcó en el rango de 17h00 – 18h00, esto puede deberse a la presencia constante e irregular de la nubosidad del páramo (Zhurucay).

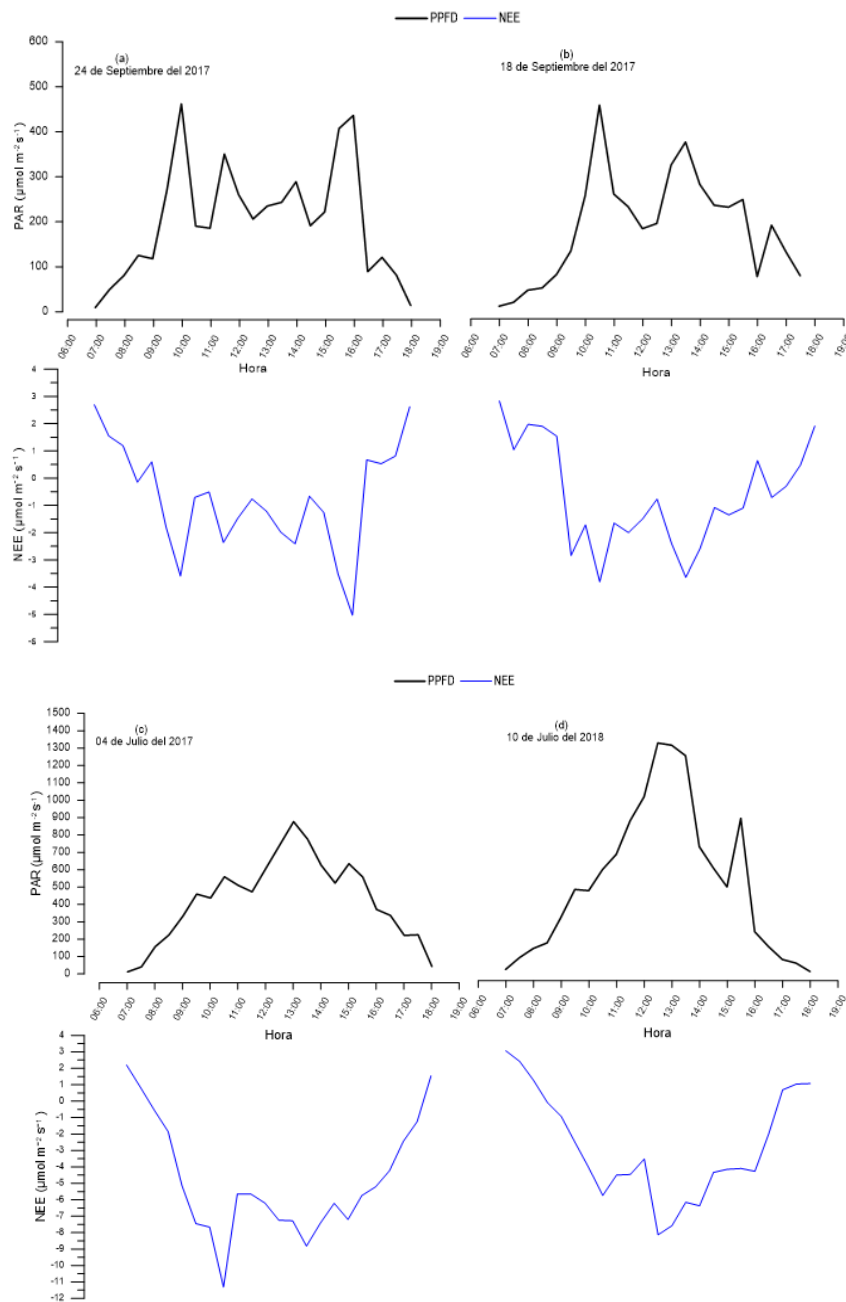
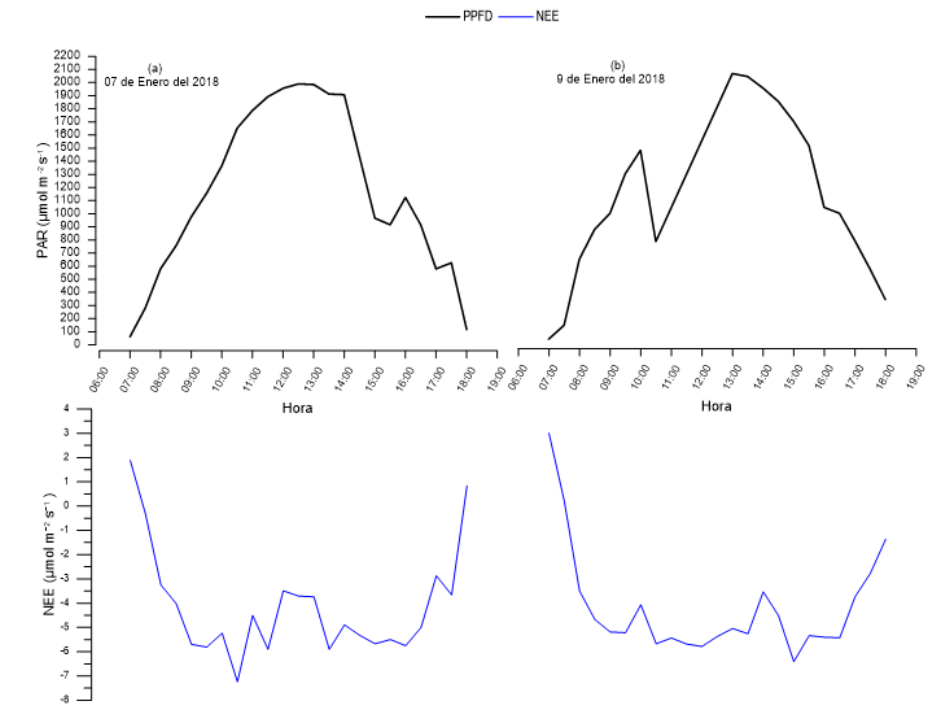


Figura 19. Comportamiento del NEE diurno. a) Día Nublado (24 de Septiembre del 2017); b) Día Nublado (18 de Septiembre del 2017); c) Día Soleado (04 de Julio del 2017); d) Día Soleado (10 de Julio del 2018)

En cambio, en el análisis intradiario de $-NEE$ en los días soleados se pudo identificar que el cambio de fuente a sumidero de carbono varía entre 07h30 – 08h30 para luego ascender y llegar a un comportamiento oscilante de NEE negativo y reducir sus valores hasta cambiar, de sumidero a fuente de carbono, en el rango de hora de 17h00 – 18h00. En el 9 de Enero del 2018 (Figura 21b) y el 25 de Febrero del 2018 (Figura 21c) el comportamiento de sumidero de carbono no concluyó en el horario mencionado sino se hizo presente después de dicho rango de hora.



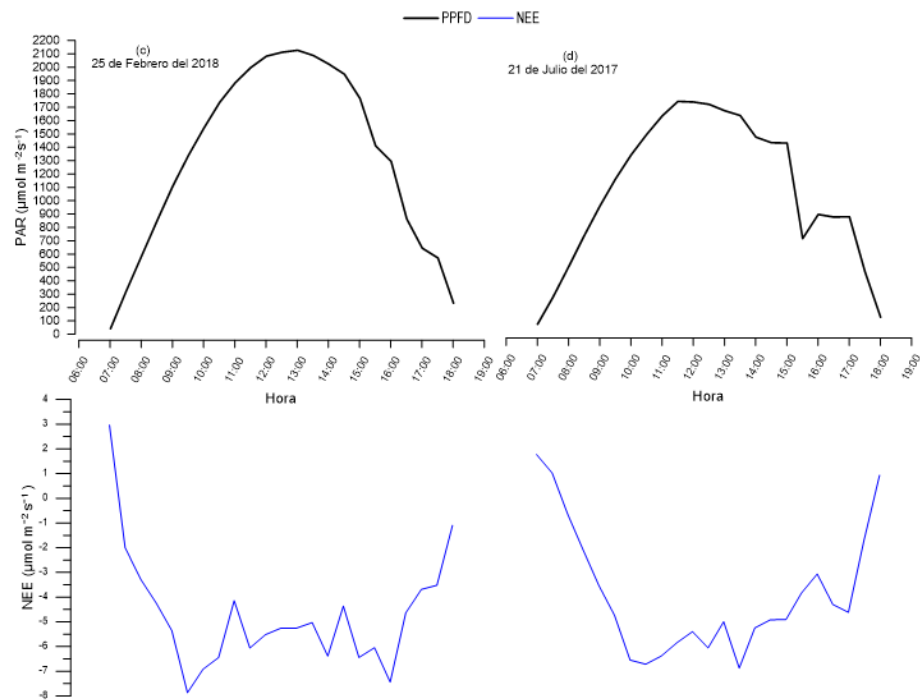


Figura 20. Comportamiento del NEE diurno. a) Día Soleado (07 de Enero del 2018); b) Día Soleado (09 de Enero del 2018); c) Día Soleado (25 de Febrero del 2018); d) Día Soleado (21 de Julio del 2017)

En días con mayor influencia de radiación directa, el -NEE de $-3.51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (máx= $-8.50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), presentando correlación con la radiación difusa, radiación directa y PPFD (Figura 21 a-d), teniendo una mayor correlación con la radiación directa en la mayoría de días soleados, como lo demuestra la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de PPFD, NEE y coeficiente de correlación de las radiaciones respecto a NEE en días soleados

N	Día	PPFD		NEE		PPFD (R ²)	Radiación Difusa (R ²)	Radiación Directa (R ²)
		$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$				
		máx	media	máx	media			
1	14/07/2017	1790,6	1113,75	-7,88	-3,39	0,54	0,17	0,54
2	15/07/2017	1792,6	1125,18	-7,18	-2,15	0,34	0,37	0,31
3	21/07/2017	1740,5	1084,9	-6,87	-3,85	0,91	0,01	0,70
4	14/08/2017	1874	1138,46	-7,65	-3,66	0,91	0,76	0,90
5	23/08/2017	1817,7	833,73	-7,24	-3,45	0,80	0,21	0,61
6	05/11/2017	1969,1	1192,89	-4,64	-2,12	0,85	0,42	0,85
7	07/01/2018	1989,3	1170,53	-7,26	-4,14	0,37	0,34	0,17
8	09/01/2018	2069,8	1118,65	-6,42	-4,19	0,50	0,34	0,50
9	25/02/2018	2128,3	1331,03	-7,84	-4,67	0,46	0,40	0,41
10	12/04/2018	900,4	517,43	-6,26	-3,78	-	0,53	0,91

11	24/08/2018	1902,4	1122,14	-8,50	-3,99	0,51	0,44	0,44
12	06/09/2018	2052,1	1311,57	-5,29	-2,78	0,86	0,81	0,85

Fuente: (Matute, 2020).

Si tomamos como ejemplo los días representados en la siguiente figura, (*Figura 21*), observamos que el -NEE aumentó a la medida del aumento de la radiación incidente.

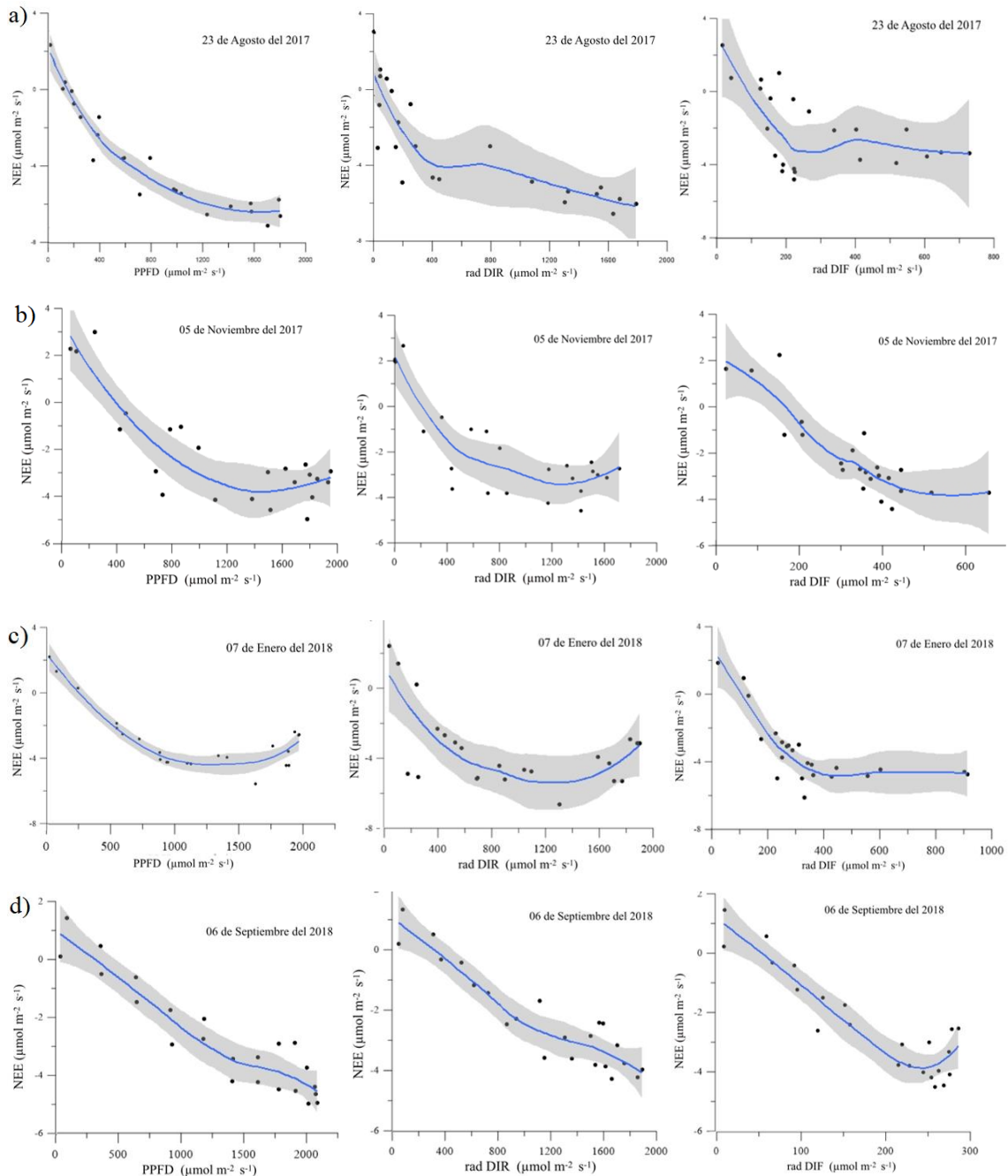


Figura 21. Dispersión del PPFD, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE. a) Día Soleado (23 de Agosto del 2017); b) Día Soleado (05 de Noviembre del 2017); c) Día Soleado (07 de Noviembre del 2018); d) Día Soleado (06 de Septiembre del 2018)

En los días soleados, el -NEE y el PPFD muestran un rango correlación $R^2= 0.34-0.86$ (modelo no lineal con un 95% de confianza), mientras que el -NEE y la radiación difusa muestra un rango correlación $R^2= 0.01-0.81$; por otro lado, en este tipo de días, toma más importancia la correlación, entre el -NEE y la radiación directa, que muestra un rango correlación $R^2= 0.17-0.91$.

Los días 15 de Julio del 2017 y 7 de Enero del 2017 (*Tabla 2*) presentaron valores anómalos de correlación ya que, son evidentes valores altos con la radiación difusa en lugar de la radiación directa; en la primera fecha es notoria la correlación con radiación difusa de $R^2= 0.37$ y con radiación directa $R^2= 0.31$, la segunda fecha da cuenta de una correlación con la radiación difusa de $R^2= 0.34$ y con la radiación directa $R^2= 0.17$.

Por otro lado, en el análisis intradiario de la fijación de carbono en días con mayor influencia de radiación difusa, se obtuvo un promedio de -NEE de $-1.92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (máx= $-11,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Además, el -NEE presentó correlación con la radiación difusa, radiación directa y PPFD, teniendo una mayor correlación con la radiación difusa, como lo demuestra la *Tabla 3*.

Tabla 3. Datos de PPFD, NEE y coeficiente de correlación de las radiaciones respecto a NEE en días nublados

N	Día	PPFD		NEE		PPFD (R^2)	Radiación Difusa (R^2)	Radiación Directa (R^2)
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				
		máx	media	máx	media			
1	04/07/2017	877,3	410,13	-11,3	-4,77	0,56	0,80	0,041
2	24/07/2017	322,8	144,22	-2,86	-0,25	0,91	0,91	0,75
3	18/09/2017	457,9	186,79	-3,82	-0,67	0,80	0,81	0,38
4	24/09/2017	470,3	210,16	-5,05	-0,75	0,95	0,93	0,62
5	10/07/2018	1330,7	528,47	-8,51	-3,14	0,74	0,84	0,48

Fuente: (Matute, 2020)

Si tomamos como ejemplo el día 24 de Julio del 2017 (*Figura 22*) y el 24 de Septiembre del 2017 (*Figura 23*), se demuestra que el -NEE aumentó de manera proporcional a la medida de influencia de la radiación incidente.

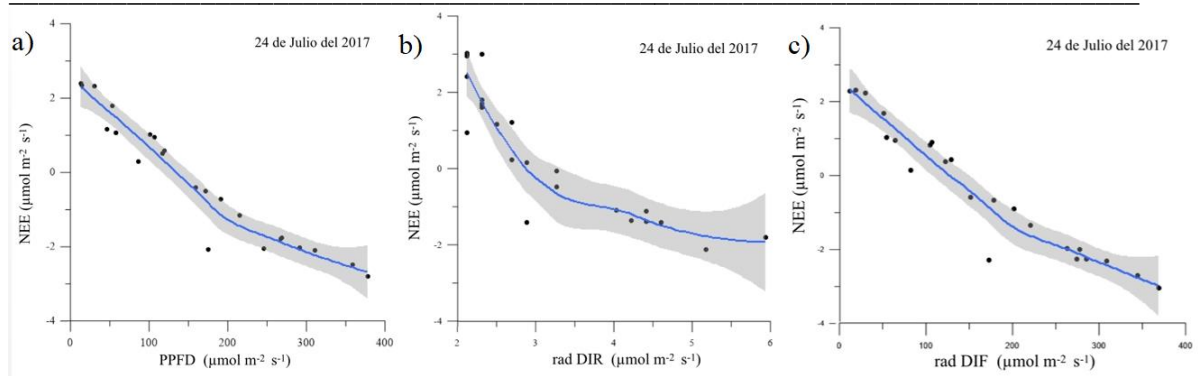


Figura 22. Dispersión del PPFD, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE del 24 de Julio del 2017

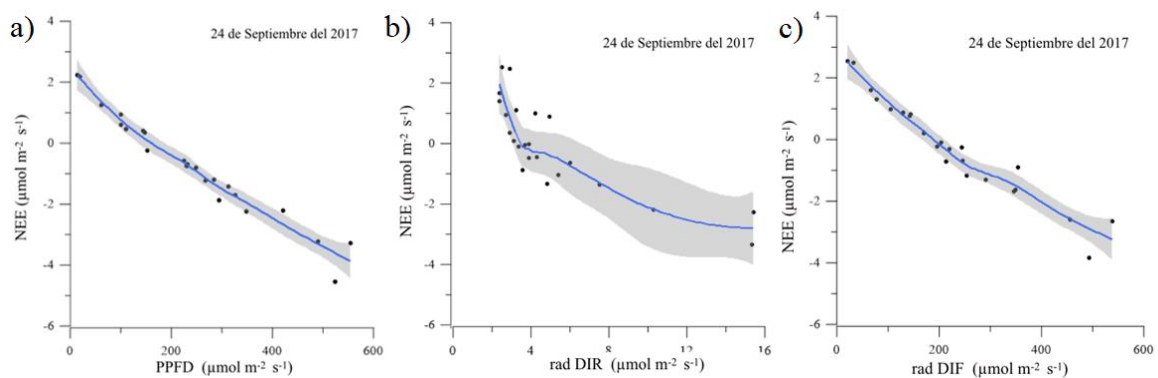


Figura 23. Dispersión del PPFD, Radiación Difusa, Radiación Directa y NEE del 24 de Septiembre del 2017

De acuerdo a la *Tabla 3*, el $-NEE$ y el PPFD en días nublados muestran un rango de correlación de $R^2 = 0.56-0.95$, mientras que el $-NEE$ y la radiación directa muestran un rango de correlación de $R^2 = 0.041-0.75$; por otro lado, y más considerable en este tipo de días, se encuentra la correlación entre el $-NEE$ y la radiación difusa que muestran un rango de correlación de $R^2 = 0.80-0.93$.

En síntesis, el $-NEE$ resultó ser mayor a nivel promedio en los días soleados, mientras que a nivel de valores máximos el $-NEE$ es mayor en los días difusos. Así también, se obtuvo en algunos casos valores representativos de captura de carbono con valores bajos de radiación, esto porque en los días soleados la radiación directa debe alcanzar valores superiores a los de los días nublados para mostrar resultados elevados de captura de carbono.

Particularmente, la tendencia de correlación entre los días soleados y nublados resultó diferente. En los días nublados, la correlación entre $-NEE$ y la radiación directa (DIR)



evidenció que la tendencia a correlación se encuentra en los valores bajos de captura y de radiación, mientras que en la correlación entre -NEE y radiación difusa (DIF) se identificó una constante relación a lo largo del rango de radiación presente en el día, como se presenta en la *Figura 23*. En días soleados, la correlación entre -NEE y la radiación directa (DIR) se observa en los valores altos de radiación mientras que, la correlación entre el -NEE y la radiación difusa (DIF) se hace presente en los valores bajos de radiación. En contraste a estos resultados, se sabe que para un Bosque Templado y en Bosques de Nueva Zelanda el -NEE aumenta en presencia de radiación difusa (Alton, 2007; Choudhury, 2001; Hollinger et al., 1994). Alton (2008) con su estudio realizado en bosque de hoja ancha y hoja de aguja, bosque mixto, pastizales y arbustos presenta que el secuestro de C se reduce un 61% en días nublado. Por otro lado, un estudio realizado en Tundra demostró que los diferentes comportamientos de la radiación no es relevante para el comportamiento del secuestro de C (Letts et al., 2005).

En el análisis realizado en el mes de Julio (2017-2018), se observó que en días soleados se presentaron valores más altos de radiación (PPFD promedio) en comparación con los presentes en los días nublados (PPFD promedio), como se muestra en la *Tabla 4*.

Tabla 4. PPFD (promedio) y NEE (promedio) de Julio del 2017-2018

Día	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	NEE ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
14/07/2017*	1113,75	-3,39
15/07/2017*	1125,18	-2,15
21/07/2017*	1084,9	-3,85
04/07/2017**	410,13	-4,77
24/07/2017**	144,22	-0,25
10/07/2018**	528,47	-3,14

* Día Soleado

** Día Nublado

Fuente: (Matute, 2020)

De este análisis se desprende que en días nublados (mayor influencia de radiación difusa) se alcanzaron valores de captura de carbono (NEE promedio) cercanos a los que se obtienen en los días soleados (mayor influencia de radiación directa) con valores de radiación mucho menores, la *Figura 24* lo expone gráficamente. El 24 de Julio del 2017 tuvo un 97,55% de radiación difusa y reflejó un valor de NEE del $-0.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no

obteniendo un valor cercano a los otros puntos analizados, esto pudo deberse a otras variables influyentes.

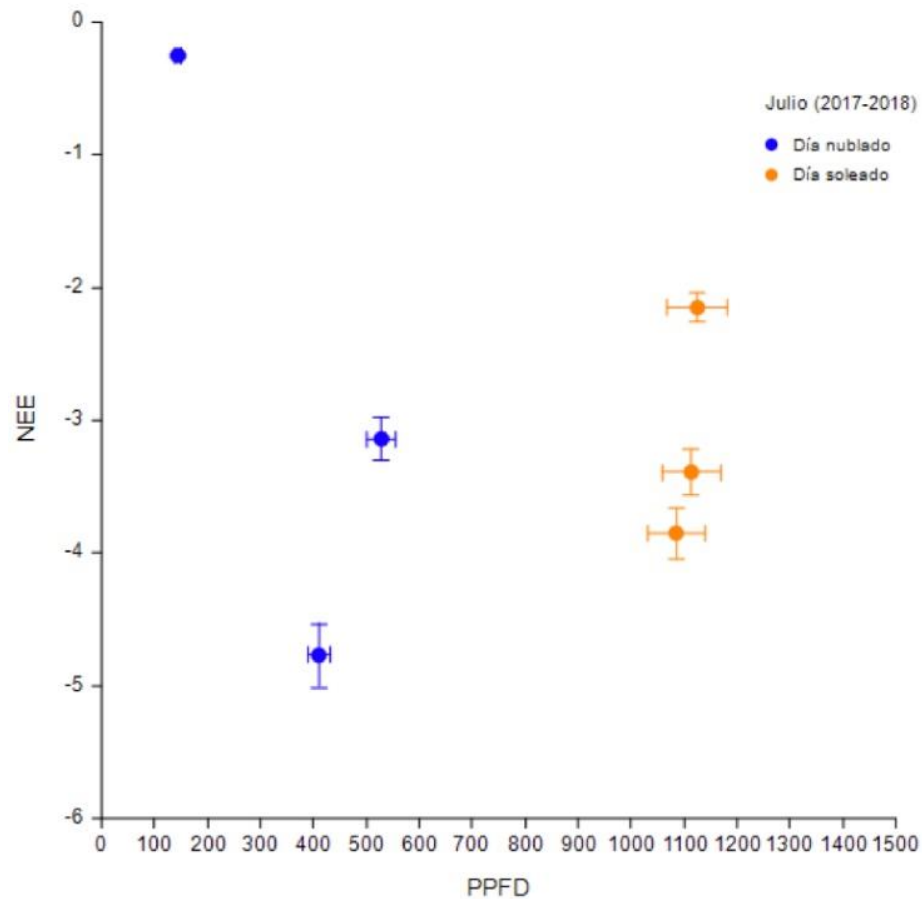


Figura 24. Gráfica de error de valores promedio de PPFD y NEE en el mes de Julio del 2017-2018

5. Conclusiones y recomendaciones

Los hallazgos más significativos de la presente investigación son:

1. Entre todos los días analizados, las diferencias de respuesta entre el sensor LI-190R y el sensor solar BF3 son frecuentemente del 8%, tanto en días nublados como soleados.
2. En días soleados, el PPFD presentó un comportamiento normalizado (forma gaussiana); mientras que en días nublados se observan picos notables y fluctuaciones en esta variable, ocasionados por la presencia de alta nubosidad.
3. La duración de captura de CO_2 en días nublados es cuantitativamente menor en comparación de los días soleados. El $-\text{NEE}$ a nivel promedio, resultó ser



cuantitativamente mayor en días soleados. Interesantemente, en los valores máximos de -NEE de los días prevalentemente difusos, se encuentra una captura de carbono cuantitativamente mayor.

4. En el análisis intradiario, realizado en el mes de Julio, se observó que con valores menores de radiación se puede alcanzar valores cercanos de captura de carbono a los que se pueden obtener con mayores valores de radiación en meses menos soleados.

5. El salto de respiración a captura, por la activación energética radiactiva sobre el dosel de pajonal en días soleados, varía entre 07h30 – 08h30 para posteriormente ascender y llegar a un comportamiento oscilante de -NEE y luego reducir sus valores, cambiando el comportamiento de sumidero a fuente de carbono en el rango de hora de 17h00 – 18h00. Mientras que en días nublados, el paso de fuente de carbono a sumidero de carbono, varía entre 08h30 – 09h30, para luego ascender y fluctuar constantemente el nivel de NEE y cambiar del comportamiento de sumidero a fuente de carbono, en el rango de 17h00 – 18h00.

Los hallazgos 3 y 4 responden la pregunta de investigación del presente trabajo: *¿La radiación solar difusa induce a que la captura de CO₂ sea cuantitativamente menor en magnitud y en duración que en condiciones de radiación solar directa para el ecosistema de páramo de Zhurucay?*, así como cumplen con el objetivo específico 1. El hallazgo 5 cumple con el objetivo específico 2.

Como hallazgos adicionales, se puede señalar que a pesar de haber contado con instrumentación avanzada para el presente análisis, es necesario tener presente que este estudio fue realizado en un ecosistema abierto (páramo) por lo que las heterogeneidades de terrenos y vegetación generan incertidumbre. Es importante mencionar que el aumento de la radiación difusa podría no ser el único factor responsable de la asimilación de carbono del ecosistema en condiciones de cielo nublado, diversas investigaciones han demostrado ser influyentes en el comportamiento del carbono. Por otra parte del análisis diario se rescata que el comportamiento de la captura de CO₂ por la vegetación del páramo, en función del tipo de radiación PPFD difusa, no es necesariamente predecible ya que éste no se comporta de acuerdo a las horas del día. Esta realidad puede encontrar su causa en la proporción de nubosidad de la zona, algo que no ha podido ser medido en este trabajo.



Una vez finalizado este estudio se puede resaltar que el páramo de Zhurucay mostró limitaciones de secuestro de carbono en los días con mayor influencia de radiación difusa, analizando sólo el comportamiento de PFD (difuso y directo), siendo análogo con el comportamiento de pastizales, bosques de hojas anchas y agujas, por lo que este estudio se puede contrastar con investigaciones que aseguran que la influencia de radiación directa promueve un mayor secuestro de C.

Esta investigación es de utilidad para investigaciones similares que busquen estudiar el comportamiento del C en zonas de páramo o similares. Para estas investigaciones recomendamos considerar la conducta de las interacciones de C a nivel de suelo y planta, tomando en cuenta el uso de la luz del dosel o el impacto que puede generar la variedad de orientación en la hoja dentro del dosel.

6. Bibliografía

Almeraya, E., Sánchez, E. (2015). Adaptaciones fotosintéticas en las plantas para mejorar la captación del carbono. *Ciencia*, 74-79.

Alton, P. (2008). Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1641-1653.

Álvarez, , O., Montaña, , T., & Maldonado, J. (2014). La radiación solar global en la provincia de Loja, evaluación preliminar utilizando el método de Hottel. *Ingenius*, 11(25). Obtenido de <https://doi.org/10.17163/ings.n11.2014.03>

Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (2012). *Eddy covariance*. Switzerland: Springer, Dordrecht. doi:<https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>

Baldochi, D., Chu, H., & Reichstein, M. (2017). Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes, a review . *Agriculture and Forest Meteorology*, 1-41.

Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Papale, D. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834-838. Obtenido de <https://doi.org/10.1126/science.1184>



Burba, G. (2013). *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. Lincoln, Nebraska, USA: Li-Cor Biosciences. doi:ISBN 978-0-615-76827-4

Carrasco, L. (2009). Efecto de la adiación ultravioleta-B en plantas. *Idesia*, 59-76. Obtenido de <https://doi.org/10.4067/S0718-34292009000300009>

Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and forest meteorology*, 265, 30-47. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192318303526>

Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210-221. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1900-38032017000100210&script=sci_abstract&tlng=pt

Chapin, F. S., Goulden, M. L., Harden, J. W., Heimann, M., Howarth, R. W., Matson, P. A., & Mcguire, A. (2005). Reconciling Carbon-Cycle Concepts, Terminology, and Methodology. 1-26. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0105-7>

Coronel, A & Echeverría, M. (2016). Determinación de carbono orgánico en suelo y biomasa del páramo de la Comunidad Chocaví de la Parroquia San Isidro. *Facultad de Ciencias Bachelor*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/48>

Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Célleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-14-0024.1>

Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2016). Continuous versus event-based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes*, 30(22), 4059–4073. <https://doi.org/10.1002/hyp.10975>

Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>

Cuesta F., P. Muriel, S. Beck, R. I. Meneses, S. Halloy, S. Salgado, E. Ortiz & M.T. Becerra. (2012). Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales - Conformación de una red



de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación. Red Gloria-Andes, Lima-Quito. Pp 180

De Robertis, E, Hib, J., & Ponzio, R. (2000). *Biología celular y molecular de De Robertis*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/234166439/Fundamentos-de-Biologia-Celular-yMolecular-de-Robertis>

Eyherabide, M., Sainz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverria, H. (2014). Comparacion de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.

Gibbon, A., Silman, M. R., Malhi, Y., Fisher, J. B., Meir, P., Zimmermann, M., & Garcia, K. C. (2010). Ecosystem carbon storage across the grassland–forest transition in the high Andes of Manu National Park. *Ecosystems*, 13(7), 1097-1111. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-010-9376-8>

Gu, L., Baldocchi, D., Verma, S., Black, T., Vesala, T., Falge, E. M., & Dowty, P. (2002). Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 5-6.

Günther, M. (2012). Advanced CSP Teaching Materials Solar Radiation, File:Solar spectrum en.svg-Wikimedia Commons. *Science*. Obtenido de <http://www.energyscience.org/bibliotheque/cours/1361469594Chapter 02 radiation.pdf>

Hofstede, B., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., & Ulloa, A. (2014). *Los Páramos Andinos ¿ Qué Sabemos ?* Obtenido de www.uicn.org/sur

Hollinger, D. Y., Kelliher, F. M., Byers, J. N., Hunt, J. E., McSeveny, T. M., & Weir, P. L. (1994). Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 75(1), 134-150. Obtenido de <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/1939390>

Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>

Jin, Z., Dong, Y. S., Qi, Y. C., & An, Z. S. (2010). Soil respiration and net primary productivity in perennial grass and desert shrub ecosystems at the Ordos Plateau of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1248-1256.

Kostic, R., & Mikulovic, J. (2017). The empirical models for estimatuind solar insolation in Serbia by using meteorological data on cloudiness. *Renewable Energy*, 1281-1293.



- Lee, M., Hollinger, D., Keenan, T., Ouimette, A., Ollinger, S., & Richardson, A. (2018). Model-based analysis of the impact of diffuse radiation on CO₂ exchange in a temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 377-389. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.016>
- LI-COR Biosciences. (s.f.). *LI-190R Quantum Sensor*. Obtenido de https://www.fondriest.com/pdf/li-cor_li-190r_spec.pdf
- LI-COR Biosciences. (2018). *Comparison of Quantum Sensors with Different Spectral Sensitivities*. Technical Note #126, 1-8. Obtenido de http://www.ecosearch.info/sites/default/files/prodotti_documentazione/TechNote126_quanti.pdf
- Lissarrangue, J., Baeza, P., & Sánchez, P. (2005). Fotosíntesis.
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos PROYECTO PÁRAMO ANDINO*. Retrieved from www.flacsoandes.edu.ec
- Lovett, G., Cole, J., & Pace, M. (2006). Is net ecosystem production equal to ecosystem carbon accumulation? *Ecosystems*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0036-3>
- Marques Filho, E., Oliveira, A., Vita, W., Mesquita, F., Codato, G., Escobedo, J., F., & Franca, J. (2016). Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling. *Renewable Energy*, 64-74. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.040>
- Matloff, N., & Meetup, B. C. (2011). Introduction to ggplot2. *Introduction to Ggplot2*, 1(1), 1-7. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- McCree, K. J. (1972). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216.
- Meteorcomm. (2020). *Meteorcomm*. Obtenido de http://www.meteorcomm.com.ar/categoria.php?id_subcategoria=114
- Minaya, V., Corzo, G., VanDer, J., & Galárraga, R. (2015). Clasificación and multivariate analysis of differences in gross primary production at different elevations using BIOME-BGC in the páramos, ecuadorian andean region, 22(2), 369-394.
- Mosquera, G., Lazo, P., Célleri, R., Willcox, B., & Crespo, B. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of water lands. *Catena*, 120-128.



Narravo, S. (2003). *Químico agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida*. Madrid: Mundi - Prensa.

Noormets, A., Epron, D., Domec, J. C., McNulty, S. G., Fox, T., Sun, G., & King, J. (2014). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.019>.

Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1038/189531a0>.

Papadopoulos, A., & Pararajasingham, S. (1997). The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Scientia Horticultura*, 69, 1-29. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00983-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00983-1)

Raich, J. W., Rastetter, E. B., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., Steudler, P. A., Peterson, B. J., & Vorosmarty, C. (1991). Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model. *Ecological Applications*, 1(4), 399-429.

Scholes, R., Wallace, D. W., Archer, D., Ashmore, M., Aumont, O., Baker, D., Yool, A. (1996). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. 185-237.

Seslab. (s.f.). Absorción y reflexión. Recuperado de: http://seslab.org/fotovoltaico/31_absorcin_y_reflexin.html

Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171-177. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162016000200012

Taggart, R y Starr, C. (2014). *Biología. La unidad y diversidad de la vida*. Obtenido de <https://doi.org/9706863990>

Sevink, J., Tonneijck, F. H., Kalbitz, K., & Cammeraat, E. L. H. (2014). Dinámica del carbono en los ecosistemas de páramo de los Andes neotropicales: Revisión de literatura sobre modelos y parámetros relevantes. *Journal of Arid Environments*, 49(2), 549–579. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0789>

Verlinden, M. S., Broeckx, L. S., Zona, D., Berhongaray, G., De Groote, T., Camino Serrano, M., & Ceulemans, R. (2013). Ecosystem production and carbon balance of an SRC poplar plantation



during its first rotation. *Biomass and Bioenergy*, 56, 412-422. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.033>

Wang, X., Guo, W., Li, C., Lan, J., & Sui, W. (2010). Introducing time-dependant sources for solving time-domain Schrödinger equation using FDTD method. *INEC 2010 - 2010 3rd International Nanoelectronics Conference, Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1109/INEC.2010.5424536>

Wood, J., & Potter, E. (2002). *Manual del Piranómetro. BF3*. 1.0.

Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. *Uniciencia*, 55-69. Recuperado de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/3909>

Young, D., & Smith, W. (1983). Effect of Cloudcover on Photosynthesis and Transpiration in the Subalpine Understory Species *Arnica Latifoli*. *Ecology*, 681-687.