



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ESTIMACION DEL INTERCAMBIO DE CO₂ ENTRE LA ATMOSFERA Y TRES
ESPECIES NATIVAS DE LA RESERVA ECOLOGICA DEL PEDREGAL DE SAN
ANGEL (REPSA), CIUDAD DE MEXICO**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:
M. en C. ERIKA SÁNCHEZ LEÓN

TUTOR:
DRA. TELMA GLORIA CASTRO ROMERO
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. IRMA AURORA ROSAS PEREZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
DRA. ROSA MARIA CERON BRETON
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN
DR. RENE GARRUÑA HERNANDEZ
INSTITUTO TECNOLOGICO DE CONKAL
DR. ROGER ORELLANA LANZA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN

CIUDAD DE MEXICO, DICIEMBRE 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dra. Irma Aurora Rosas Pérez

VOCAL: Dra. Rosa María Cerón Bretón

SECRETARIO: Dra. Telma Gloria Castro Romero

SUPLENTE: Dr. René Garruña Hernández

SUPLENTE: Dr. Roger Orellana Lanza

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México y Departamento de Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de realizar esta investigación, por contribuir en mi formación académica y profesional.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y el Centro de Ciencias de la Atmósfera por todas las facilidades otorgadas para realizar este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca asignada con el registro 189092.

A la Secretaría Técnica de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel por todo el apoyo concedido para llevar a cabo esta investigación en diferentes sitios de la reserva.

Al Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología de la UNAM, por el apoyo técnico proporcionado para utilizar el equipo portable de medición de área foliar.

Al Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM, por la accesibilidad brindada para el desarrollo de esta investigación.

Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias Atmósfera de la UNAM.

Académicos

A la Dra. Telma Gloria Castro por su apoyo y facilidades otorgadas en este trabajo.

A mí Comité Tutorial:

Dra. Irma Rosas Pérez por su valioso apoyo y recomendaciones en este documento y por su calidez personal.

Dra. Rosa María Cerón Bretón por su interés en el tema, su gran disponibilidad y confianza.

Dr. René Garruña Hernández, por sus valiosos comentarios y observaciones realizadas en este documento. Por su amistad y confianza.

Dr. Roger Orellana por la guía incondicional que mostró en este tema y a quién admiro por su dedicación y desempeño en el ámbito científico y académico, pero sobre todo por su calidad humana y amistad otorgada.

Por su contribución a:

Al Dr. Iván Ramírez Ramírez del Colegio de Postgraduados por su colaboración y acertadas sugerencias en los resultados de esta investigación.

A la Dra. Silva Castillo Argüero de la Facultad de Ciencias (UNAM) por su asesoría en el tema de la REPSA y por su calidez personal.

Al Dr. Zenón Cano Santana de la Facultad de Ciencias (UNAM) por su amable disponibilidad en las recomendaciones e información brindada.

A la M. en C. Ma. Esther Sánchez Coronado del Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología (UNAM) por su apoyo técnico.

A los que colaboraron y fueron cómplices para ir a la reserva, infinitas gracias: Alejandra Ysunza, Ezel Galindo, Carmen Santana, Josele Rosas, Erick Sánchez, Harry Álvarez, Roberto, Tania Castillo, Carlos Ochoa, Isabel León, Margarita Granados, José García, Erick Avilés y al Dr. Hugo Padilla.

A mis amigos Carlos Abraham Ochoa y Harry Álvarez por su amistad, confianza y apoyo. Y a todos mis amigos y compañeros del posgrado por compartir momentos inolvidables, por su apoyo incondicional y estar presente en los buenos y malos tiempos.

A la Dra. Elvia Esquinca Ballinas: Tía gracias por tu comprensión, apoyo y solidaridad para conmigo. Por tu interés y consejos en mi área profesional y personal, por tu cobijo y hospitalidad, sobre todo por el cariño brindado.

A mí hermana Vero y su hermosa familia por su apoyo incondicional en todo el trayecto de este trabajo y en la comedia de aventuras fantásticas llamada vida. A mis sobrinos Mario y Diego por todo su cariño.

A todos aquellos que se unieron en esta aventura épica, a los que creyeron y aún más a los que no lo hicieron porque este trabajo representa un conjunto de esfuerzo, dedicación, y perseverancia hecha realidad.

Dedicatoria

A la fuente de luz universal que mantiene la vida
en perfecto equilibrio, orden, armonía, dinámica,
creación ,transformación y amor.

A mis padres por su apoyo absoluto, su confianza plena y su amor.

Gracias infinitas por todos los sacrificios realizados
para ser de mí una mujer de bien.

Por su ejemplo y dedicación para superarme día a día.

Los amo y sí regresará a esta vida los volvería a
elegir para viajar juntos en el inmenso cosmos.

Con cariño a mí sobrino Mario Abraham por ser
una fuente de alegría y amor incondicional.

Te quiero chiquitín.

*A todos los soñadores incansables,
a quienes ven algo diferente
y siguen su intuición*

ERISAN 2007





*La ciencia no es sólo compatible con la espiritualidad,
es una profunda fuente de espiritualidad*

CARL SAGAN



Contenido

Abstract	11
Resumen	12
1. INTRODUCCION	13
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivos Particulares	15
1.3 Hipótesis	15
1.4 Justificación.....	16
2.MARCO TEORICO	17
2.1 Balance de energía solar en la Tierra.....	17
2.2 Espectro electromagnético	18
2.3 Fotosíntesis	20
2.3.1 Etapas de la Fotosíntesis	22
2.4 Factores limitantes de la fotosíntesis	24
2.4.1 Efecto de la intensidad de la luz.....	25
2.4.2 Efectos de la temperatura	25
2.4.3 Efectos de la concentración de CO ₂ ; punto de compensación del CO ₂	26
2.5 Ciclo del Carbono	26
2.6 Bióxido de Carbono	28
3.MATERIALES Y METODOS	29
3.1 Zona de estudio	29
3.1.1 Clima, Suelo y Vegetación.....	29
3.2 Campaña experimental	30
3.3 Características de las plantas	32
3.3.1 Metabolismo.....	33
3.3.2 Población y densidad	34
3.3.3 Distribución y dispersión de especies	35
3.4 CO ₂ atmosférico y CO ₂ del suelo	36
3.5 Estimación de CO ₂ (emisión y captura)	37
3.6 Análisis estadístico	37

3.7 Descripción del equipo LI-6400	38
3.7.1 Técnica de Operación de LI-6400	39
3.8 Descripción del Equipo CIRAS-2	40
3.8.1 Descripción de la cámara de respiración de suelo	42
4.RESULTADOS Y DISCUSION.....	43
4.1 Variables meteorológicas.....	43
4.2 Promedios de Tasa fotosintética (TF), Densidad del Flujo de Fotones fotosintético (DFFF), Temperatura (T) y Humedad Relativa (HR).	45
4.3 Población y densidad	48
4.4 Tasa Fotosintética (TF) mensual en los tres horarios (T1, T2 y T3)	49
4.5 Distribución y dispersión de especies	58
4.6 Índices de vegetación y Producción Primaria Bruta.....	59
4.7 Estimación de CO ₂	61
4.8 CO ₂ en aire y suelo	65
5.CONCLUSIONES	67
6. REFERENCIAS.....	70
7. ANEXOS.....	78
Anexo A. Resultados del error estándar de las medias de TF, T, HR y DFFF de (<i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>), en las temporadas secas y lluviosas.	78
Anexo B : Resultados de tasa fotosintética promedio de las especies (<i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>) en las temporadas secas y lluviosas.	79
Anexo C: Resultados de los máximos y mínimos de tasa fotosintética promedio mensual en los tres horarios (T1,T2 y T3) en (<i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>) en las temporadas secas y lluviosas.	80
Anexo D: Resultados del balance de CO ₂ obtenido por las especies (<i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>) en las temporadas de secas y luviosas.....	81

Lista de Figuras

Figura 2.1 Balance energético en la Tierra	18
Figura 2.2 Espectro electromagnético de la luz	19
Figura 2.3 Cloroplasto y sus componentes	21
Figura 2.4 Espectro de absorción de la clorofila (a y b) y otro pigmentos	22
Figura 2.5 Esquema de la Fotosíntesis	23
Figura 2.6 Diagrama del ciclo del Carbono	27
Figura 2.7 Contribución relativa de GEI	28
Figura 3.1 Localización de la zona de estudio	30
Figura 3.2 Equipo LI-6400 (LI-COR Inc., NE, USA)	31
Figura 3.3 Equipo CIRAS-2 (PP System Inc., Haverhill, USA)	32
Figura 3.4 Especies seleccionadas en la REPSA a) <i>Buddleia cordata</i> , b) <i>Echeveria gibbiflora</i> , c) <i>Senecio praecox</i>	34
Figura 3.5 Patrones de distribución espacial de individuos.....	35
Figura 3.6 Componentes del equipo LI-6400	38
Figura 3.7 Componentes de la cámara IRGA	39
Figura 3.8 Diagrama de flujo de CO ₂ en LI- 6400.....	40
Figura 3.9 Equipo CIRAS-2 y sus componentes.....	41
Figura 4.1 Variación anual de la temperatura y la precipitación 2010.....	43
Figura 4.2 Variación anual de temperatura y humedad relativa en el año 2010	44
Figura 4.3 Radiación global para el año 2010.....	44
Figura 4.4 Promedios de tasa fotosintética vs densidad del flujo fotosintético de fotones (a, d y g); tasa fotosintetica vs temperatura (b,e y h) y tasa fotosintetica vs humedad relativa (c,f y i) para <i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i> respectivamente.	47

Figura 4.5a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de seca (<i>Buddleia cordata</i>).....	52
Figura 4.5b Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de lluvia (<i>Buddleia cordata</i>).....	53
Figura 4.6a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de seca (<i>Senecio praecox</i>).....	54
Figura 4.6b Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de lluvia (<i>Senecio praecox</i>).....	55
Figura 4.7a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de seca (<i>Echeveria gibbiflora</i>).....	56
Figura 4.7b Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de lluvia (<i>Echeveria gibbiflora</i>).....	57

Lista de Tablas

Tabla 4.1 Correlación de variables para <i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>	48
Tabla 4.2 Área foliar y densidad foliar en la REPSA	49
Tabla 4.3 Coeficiente de dispersión de <i>Buddleia cordata</i> , <i>Senecio praecox</i> y <i>Echeveria gibbiflora</i>	58
Tabla 4.4 Estimación de flujos de CO ₂ , promedios mensuales en las tres especies en las temporadas seca y lluviosa.....	62
Tabla 4.5 Concentración promedio de CO ₂ del aire	66
Tabla 4.6 Concentración promedio de CO ₂ en suelo	66

Abstract

This work aims to evaluate the contribution of an urban ecosystem to the carbon cycle.

The main objective of this study was to estimate carbon dioxide capture and emission through the photosynthetic rate in three different endemic plants (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* and *Echeveria gibbiflora*) in a natural reserve inside UNAM central campus called “Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)” of Mexico City, and the relationship of environmental variables (temperature, photosynthetic photon flux density, and relative humidity) and their influence on carbon capture or emission results were analyzed. The study was carried out during february, march, april and november (dry season) and from july to october (rainy season) during 2010. Photosynthesis rate averages for species *Buddleia cordata* and *Senecio praecox* were very similar during dry and rainy season. However *Echeveria gibbiflora* due to its particular metabolism showed a different behavior in both seasons. The estimated carbon capture, during rainy season for all three species was 12 kg of carbon dioxide. In the dry season was 19 kg of carbon dioxide for the species *Buddleia cordata* and *Senecio praecox* and -45 kg for *Echeveria gibbiflora*. Estimates of normalized difference vegetation index (NDVI) and Gross Primary Production (PPB) were calculated using satellite data from MODIS-NASA. The results indicated that the intensity of greenery and PPB increased during the rainy season, proving that this season favors the vegetation dynamics. September was the month with the highest value of PPB = 0.051 kg of carbon per square meter. This investigation provides information about carbon cycle dynamics in urban ecosystems, these results can be useful in future studies for climate change mitigation.

Resumen

El presente trabajo se realizó para conocer la contribución al ciclo del carbono de un ecosistema que se encuentra dentro de una zona urbana.

El objetivo principal de este estudio fue estimar mediante la tasa fotosintética la captura y emisión del dióxido de carbono de tres plantas endémicas (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), ubicada dentro de la UNAM, Ciudad de México, y se analizaron la relación de variables ambientales (temperatura, densidad del flujo fotosintético de fotones y humedad relativa) y su influencia en los resultados de captura o emisión de dióxido de carbono. El muestreo se llevó a cabo durante febrero, marzo, abril y noviembre (temporada de seca) y de julio a octubre (temporada de lluvia) en el año 2010.

Los resultados de la tasa de fotosíntesis promedio en las especies *Buddleia cordata* y *Senecio praecox* fueron muy similares durante la temporada seca y lluviosa, sin embargo *Echeveria gibbiflora* debido a su particular metabolismo mostró un comportamiento diferente en ambas estaciones. La estimación realizada de captura de carbono, en la temporada de lluvia para las tres especies fue de 12 kg de dióxido de carbono. En la temporada de seca fue de 19 kg de dióxido de carbono para las especies *Buddleia cordata* y *Senecio praecox*, en tanto que la especie *Echeveria gibbiflora* emitió -45 kg de dióxido de carbono.

Se realizaron estimaciones del índice de vegetación de diferencia normalizada conocida por sus siglas en inglés como (NVDI) y la Producción Primaria Bruta (PPB) con datos de MODIS-NASA. Los resultados indicaron que la intensidad de verdor y la PPB aumentaron en la temporada de lluvia, comprobándose que en esta temporada se favorece la dinámica de la vegetación de la reserva. Se observó que del ciclo anual, septiembre fue el mes con el valor más alto de PPB = 0.051 Kg de carbono por metro cuadrado. Esta investigación proporciona información sobre la dinámica del ciclo del carbono en ecosistemas urbanos lo cual puede ser útil en estudios futuros para la mitigación del cambio climático.

1. INTRODUCCION

El fenómeno de calentamiento global es un problema actual para el desarrollo de la vida en la Tierra, este calentamiento es causado por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que favorecen el aumento de la temperatura de la superficie terrestre. El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases que más contribuyen en los procesos de calentamiento, y su concentración se ha incrementado en los últimos años debido principalmente a las actividades antropogénicas pasando de 280 ppm en la época pre-industrial a 398.72 ppm en el 2014, y recientemente para el año 2016 durante el mes de julio el promedio mensual fue de 404.39 ppm (IPCC, 2007; NOAA, 2014 y 2016). De acuerdo con el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero de México, las emisiones totales de CO_2 fueron 493.45 Mt en el año 2010, contribuyendo con el 65.9% del inventario total del país (INE, 2010).

En el mundo existen diferentes sumideros de carbono que se han asociado a una contribución de los bosques, que son responsables del 60% de la fijación neta de dióxido de carbono (Nobel, 2009). Se estima que los bosques del mundo capturan más de 650 millones de toneladas de carbono, que ayudan a mitigar el cambio climático y la conservación de la biodiversidad (FAO, 2010). Sin embargo, no sólo los bosques secuestran CO_2 , se ha demostrado en varios estudios que la presencia de árboles y áreas verdes en zonas urbanas también favorecen la reducción de algunos contaminantes del aire (Yang et al., 2004; Kordowski y Kuttler, 2010; Velasco et al., 2013).

Existen diversas técnicas para monitorear el carbono de los ecosistemas, una de ellas es a través del uso de tecnologías con imágenes satelitales, como el espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada, conocido como MODIS por sus siglas en inglés, su objetivo es modelar los ciclos del agua y del carbono a nivel mundial; Por otra parte, el MODIS permite medir la productividad primaria del ecosistema (PPB), los índices de vegetación y otras variables ambientales (Zhao et al., 2005). Otro método utilizado es el de covarianza de torbellinos, que mide de forma continua a nivel del dosel los flujos de CO_2 , vapor de agua y el intercambio de energía de los ecosistemas (Baldocchi et al., 2001). Sin embargo desde el punto de vista local, algunos ecologistas también consideran

importantes las mediciones de densidad de vegetación, biomasa de las plantas, clases de especies y otras variables ecológicas que permiten cuantificar el intercambio de CO₂ por la biomasa de las plantas. La validación global de datos PPB y el Intercambio Neto del Ecosistema, pueden realizarse de tres formas: mediciones directas de biomasa, mediciones con torres de flujos y mediciones de concentración de CO₂ atmosférico, considerando que cada uno de estos tiene una precisión y alcance específico (Running et al., 2004).

El carbono capturado también se estima utilizando diferentes modelos, que evalúan parámetros fotosintéticos y ambientales (Kim y Lieth, 2003; Schultz 2003; Xu y Baldocchi, 2003; Sharkey et al., 2007), mientras que otros evalúan el balance de carbono entre las plantas y la atmósfera (Harnos et al., 2006). Algunos estudios experimentales en fotosíntesis se realizan *in situ* con analizadores de CO₂ (Myers et al., 1999; Long y Bernacchi., 2003; Kitao et al, 2007).

Pocos estudios han evaluado la contribución por especie sobre la captura o la emisión de CO₂ en el medio ambiente en un sitio urbano. Esta información específica proporciona ventajas sobre el papel de la vegetación urbana y la reducción del CO₂ emitido por actividades antropogénicas. En este sentido, los bosques urbanos pueden contribuir significativamente a la reducción de la contaminación del aire y la intensidad de las islas de calor (Yang et al., 2005). La vegetación en un área urbana contribuye a la captura de CO₂ durante el día y promueve el enfriamiento del aire local, debido a la transpiración, sirviendo como una alternativa para la mitigación del cambio climático (Akbari , 2002).

El sitio de estudio se localiza en una de las pocas reservas naturales protegidas, ubicada dentro de una mega ciudad. Además, del valor que representa para la conservación de la biodiversidad y los servicios ambientales en el sur de la zona metropolitana de la Ciudad de México. También porque alberga un ecosistema especial conocido como matorral xerófilo de palo loco (*Senecio praecox*), asentado en un sustrato basáltico de poca profundidad (Rzedowski, 1954). El ciclo del carbono en la vegetación comienza con la fijación de carbono, principalmente a través de los procesos fotosintéticos por los cuales

las plantas absorben CO_2 de la atmósfera para producir oxígeno y carbohidratos a través de la radiación solar (Nobel, 1999).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estimar mediante la tasa fotosintética la captura y emisión de CO_2 en tres especies de plantas, durante las estaciones seca y lluviosa de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA).

1.2.2 Objetivos Particulares

- Estimar la relación entre el CO_2 , la temperatura (T), la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) y la humedad relativa (HR).
- Analizar la variabilidad estacional del CO_2 en las épocas de seca y lluvia.
- Estimar la cobertura vegetal y su relación con los índices de vegetación.
- Estimar mediante la producción primaria bruta (PPB) la contribución anual de CO_2 en la reserva.
- Cuantificar las concentraciones de CO_2 atmosférico y CO_2 del suelo.

1.3 Hipótesis

Los ecosistemas vegetales capturan y emiten CO_2 a través de los procesos bioquímicos de fotosíntesis y respiración, los factores ambientales y los cambios estacionales aumentan o disminuyen esos procesos. De esta manera se espera que las condiciones de estacionalidad influyan sobre el balance de carbono de un ecosistema urbano.

1.4 Justificación

Para comprender la función de las áreas naturales protegidas y su contribución en el ciclo del carbono a través del proceso de fotosíntesis, es importante estudiar estos flujos *in situ* que permitan cuantificar si estos ecosistemas son fuentes o sumideros de carbono.

Actualmente se buscan alternativas y estrategias de mitigación al cambio climático, principalmente en ciudades altamente pobladas y con problemas de contaminación como la zona metropolitana de la Ciudad de México. Debido a esta necesidad, resulta de vital importancia preservar los espacios verdes en las áreas urbanas, que aportan beneficios ambientales además de información valiosa que permite comprender el papel de la vegetación.

Es importante destacar que la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) representa un patrimonio natural de la Universidad Nacional Autónoma de México y abarca la tercera parte del campus universitario. Ha sido estudiada por varios investigadores y es fuente continua de información, principalmente biológica. Realizar este estudio dentro de la REPSA fortalece los lazos de interacción entre la ciencia y la naturaleza, por lo que este sitio permite conocer y comprender de una mejor manera la relación entre el hombre y el ambiente.

2.MARCO TEORICO

En este capítulo se hace una breve explicación de cómo influye la radiación solar en el proceso bioquímico de la fotosíntesis. Se describen las etapas de la fotosíntesis y algunos de los factores externos e internos que la limitan. Además de explicar los ciclos biogeoquímicos de carbono (C) y dióxido de carbono (CO₂), con la finalidad de tener una comprensión funcional de las rutas de captura de carbono desde el punto de vista de fisiología vegetal y en el ambiente.

2.1 Balance de energía solar en la Tierra

El clima de la Tierra está controlado principalmente por la cantidad de radiación solar que recibe el planeta. La energía solar en todas las longitudes de onda que llega a la superficie de la Tierra, es cercana a 1370 Wm^{-2} (Seinfeld y Pandis,1998) y es llamada constante solar. La fracción de la constante solar recibida por unidad de área en la Tierra es aproximadamente de 343 Wm^{-2} . De esta radiación solar, una fracción es reflejada y devuelta al espacio, otra parte con valor cercano a 240 Wm^{-2} es absorbida por diferentes componentes de la atmósfera (nubes, aerosoles, gases, etc.). Este valor corresponde a una base de promedio anual y global del planeta para la radiación infrarroja emitida por el sistema *atmósfera-tierra* hacia el espacio. La entrada de radiación infrarroja a la superficie de la Tierra de acuerdo con Seinfeld y Pandis (1998), es de 343 Wm^{-2} y es mayor a la radiación infrarroja de salida que es de 240 Wm^{-2} , debido a que las nubes, el vapor de agua y los gases de efecto de invernadero también absorben esta radiación (Figura 2.1)

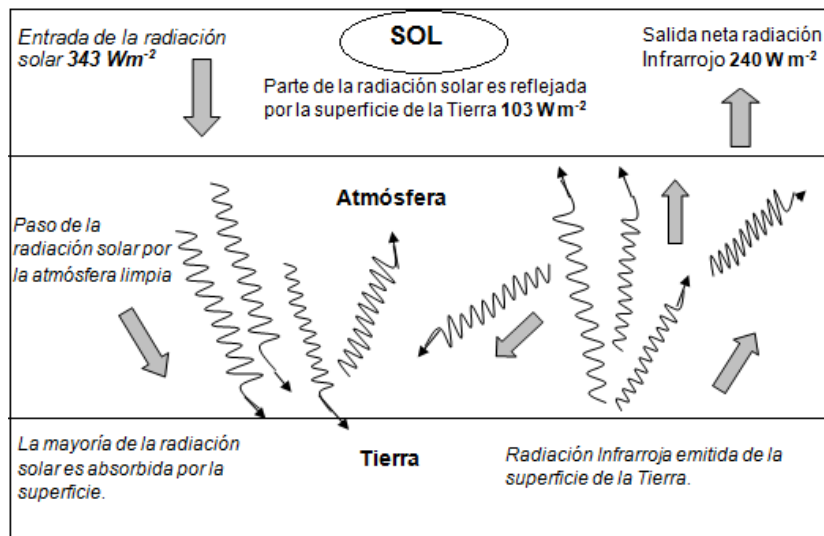


Figura 2.1 Balance energético en la Tierra. Modificada de Seinfeld y Pandis, (1998).

2.2 Espectro electromagnético

La radiación electromagnética emitida por el sol y que llega a la tropósfera, se divide en tres categorías de acuerdo con su nivel de energía: radiación ultravioleta (280 a 400 nm), radiación visible (400 a 750 nm) y radiación infrarroja (700 a 900). Las longitudes de onda más cortas que el rango de la luz visible (< 400) conforman la radiación ultravioleta (UV). Existen diferentes tipos de luz UV con rangos característicos de longitudes de onda; de acuerdo con Baird (2001), la luz UV-A con longitudes de onda entre 320 y 400 nm; UV-B 280 -320 nm y UV- C en un rango aproximado de 200 y 280 nm.

La longitud de onda de luz visible va de los 400 a los 700 nm y es conocida como radiación fotosintéticamente activa (RFA), porque incluye longitudes de onda que utilizan las plantas como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis (Smith y Smith, 2007). La radiación con longitud de onda mayor que el rango de luz visible, (>750) es conocida como infrarroja.

De la energía del sol recibida en la Tierra, más de la mitad es radiación infrarroja (IR) y el resto es luz visible (Figura 2.2). Del total de la luz que llega a la Tierra, cerca de un 50% alcanza la superficie terrestre y es absorbida por ella, un 20% de la luz es absorbida por

gases; la radiación UV por el (ozono estratosférico y el oxígeno diatómico) y la radiación IR es absorbida también por el CO₂, el H₂O y también por la presencia de las gotas de agua la atmósfera. La luz restante un 30%, se refleja en las nubes, hielo, nieve, arena y otros cuerpos reflejantes. (Henry y Heinke,1999; Baird, 2001).

La molécula de oxígeno diatómico no absorbe luz visible de forma significativa, pero si absorbe algunos tipos de luz ultravioleta (UV) que es una radiación electromagnética de longitudes de onda comprendidas entre 50 y 400 nm. El oxígeno filtra la mayor parte de la fracción de luz UV entre 120 y 220 nm. La luz UV en el rango de 220-320 nm es filtrada principalmente por moléculas de ozono (O₃) en la estratosfera media y baja (Baird, 2001).

La capacidad para absorber luz en una longitud de onda determinada por un compuesto o sustancia depende de los niveles energéticos de sus electrones y puede verse representado gráficamente en espectros de absorción (Skoog et al., 2015).

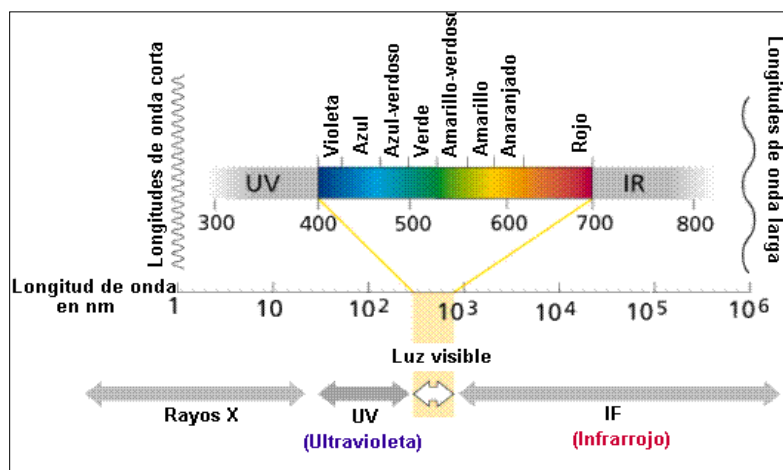


Figura 2.2 Espectro electromagnético de la luz. Fuente: Sadava et al., (2014).

Algunos gases en la atmósfera como el CO₂, absorben fuertemente la radiación en IR de forma temporal en longitudes de onda desde los 4.26 μm, hasta otros rangos de 12 a 14μm, y también de 16 a 18 μm. De tal manera que no toda la luz IR emitida por la superficie de la Tierra y la atmósfera escapa directamente al espacio. Una vez que esta luz es absorbida es redirigida a la superficie de la Tierra y es reabsorbida calentando la

superficie y el aire, a este fenómeno se le llama efecto invernadero, el cual es el responsable que la temperatura media en la superficie de la Tierra sea de 15° C (Baird, 2001; Smith y Smith, 2007).

2.3 Fotosíntesis

Los cloroplastos son grandes orgánulos verdes que se encuentran en las células vegetales, y es donde se realiza la fotosíntesis. Conformados por dos membranas concéntricas (interna y externa), el espacio entre estas membranas se llama espacio intermembranoso, la región acuosa encerrada por la membrana interna se denomina *estroma* y en su interior se encuentra la membrana tilacoidal. Además de contener vesículas aplanadas llamadas tilacoides, pueden encontrarse en forma apilada formando los *grana*. En los tilacoides, se encuentran organizados los pigmentos y demás moléculas como la clorofila que convierten la energía lumínica en energía química (Alberts et al., 2010).

Existen dos fases, que se desarrollan en compartimentos distintos: Fase luminosa o dependiente de la luz: Se realiza en la membrana de los tilacoides, donde se lleva a cabo la cadena de transporte de electrones, responsables de la conversión de la energía lumínica en energía química (ATP) y de la generación del poder reductor (NADPH+).

Ciclo de Calvin: Se realiza en el estroma, participa directamente la enzima RuBisCO, y se divide en carboxilación, reducción y regeneración, como productos se obtienen las moléculas de azúcar y se regenera RuBP como sustrato para volver a comenzar el ciclo. (Taiz y Zeigel, 2006.)

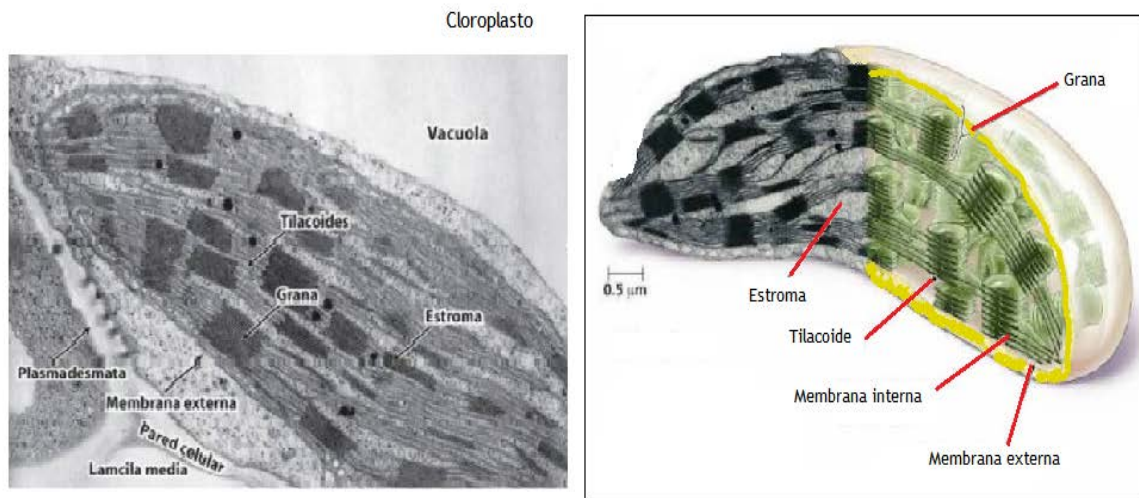
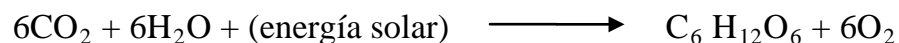


Figura 2.3 Cloroplasto y sus componentes. Fuente: Taiz y Zeigel (2006).

La fotosíntesis es el proceso por el cual las plantas fijan el carbono atmosférico en presencia de la luz solar. El paso más importante, químicamente en la fotosíntesis es la conversión del dióxido de carbono y del agua en hidratos de carbono y oxígeno. De acuerdo con Taiz y Zeigel (2006) la energía química que se almacena se hace disponible posteriormente para su utilización por los organismos a través de la respiración. Químicamente el proceso de la fotosíntesis se puede representar a través de la siguiente ecuación:



La energía necesaria para formar una molécula de glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) y seis de oxígeno es de 2870 KJ mol^{-1} (Azcon- Bieto y Talón, 2000).

La clorofila actúa como una antena que absorbe la energía luminosa, que es almacenada en los enlaces químicos de los carbohidratos que se producen en esta reacción. (Hopkins y Hüner, 2004).

La captación de la energía solar se lleva a cabo en los cloroplastos, los cuales contienen pigmentos, que son moléculas capaces de capturar ciertas cantidades de luz. Dentro de los pigmentos más comunes se encuentra la clorofila a y la clorofila b, típica de plantas terrestres, los carotenos como por ejemplo; las xantófilas, fucoeritrinas y fucocianinas,

cada uno de estos últimos característico de ciertas especies, como se muestra en la figura 2.6. Cada uno de estos pigmentos se especializa en captar cierto tipo de luz de acuerdo con Hopkins y Hüner, (2004).

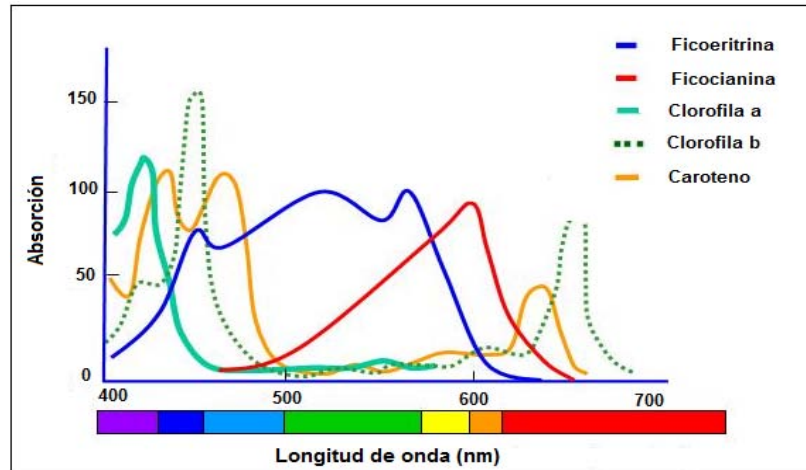


Figura 2.4. Espectro de absorción de la clorofila (a y b) y otros pigmentos.
Fuente: Lambers H. et al., (2008).

De acuerdo con algunos autores (Pimienta-Barrios, 2003; Hopkins y Hüner, 2004) generalmente los pasos de la fotosíntesis se dividen para su estudio en dos etapas y se describen a continuación.

2.3.1 Etapas de la Fotosíntesis

De acuerdo con Pimienta-Barrios (2003). La etapa dependiente de la luz en el proceso de fotosíntesis se divide para su estudio en tres pasos que se describen a continuación:

1. La fotólisis o rompimiento de la molécula de agua, es el mecanismo de reacción en el que se liberan electrones y oxígeno, estos electrones son transferidos a lo largo de una cadena en la membrana del tilacoide. El propósito de esta transferencia es convertir la luz en energía química, la cual se almacena en la coenzima Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (NADPH) y el nucleótido adenosina trifosfato conocido como (ATP). Para remover los electrones del agua y efectuar la reducción del NADP^+ a

NADPH se requiere la operación en secuencia de dos fotosistemas (FS-II y FS-I). La activación de estos dos fotosistemas depende de la energía luminosa.

2. La clorofila captura la energía a partir de una banda pequeña de radiación solar, entre 400 y 700 nm, esta energía es empleada para asimilar el CO_2 ambiental por vía de la enzima RuBisCO. La captura o absorción de fotones se lleva a cabo por pigmentos, principalmente clorofila y carotenoides; estos pigmentos se encuentran en membranas internas de los cloroplastos y transfieren esta energía a los centros reactivos del fotosistema en donde comienza el segundo proceso.

3. El ATP y el NADPH, se usan en el ciclo fotosintético de reducción de carbono (ciclo de Calvin), en el cual el carbono es asimilado, realizándose la síntesis de compuestos de tres carbonos (3PGA) en las plantas con metabolismo C3.

Los dos primeros pasos son relativamente rápidos y no son afectados por la temperatura, sin embargo el tercer paso es lento y si se ve afectado por la temperatura (Pimienta-Barrios, 2003).

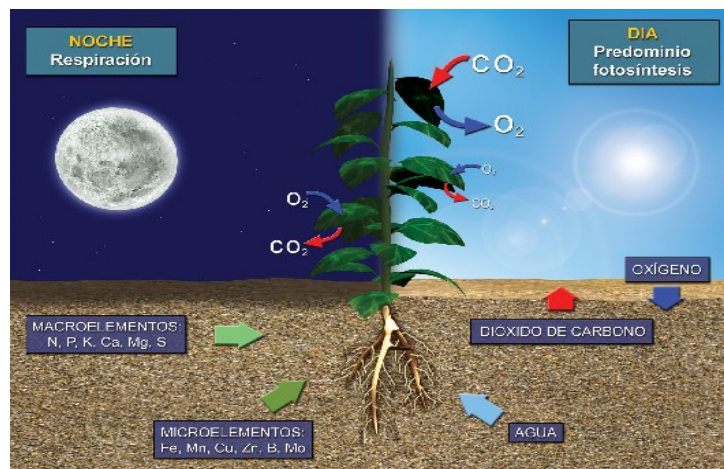


Figura 2.5. Esquema de la Fotosíntesis. Fuente: <https://www.google.com>

De acuerdo con Taiz y Zeigel (2006), el ciclo de *Calvin-Benson* está dividido por tres fases:

1. La *incorporación o carboxilación* del CO₂ que tiene lugar por carboxilación de la enzima ribulosa-1,5 bifosfato carboxilasa/oxigenasa conocida como Rubisco. En este paso se forman dos moléculas del ácido-3-fosfoglicérico (3PGA).
2. La *reducción* del carbono fijado a hidratos de carbono, que requiere poder reductor y aporte de energía en forma de ATP, generados mediante la cadena de transporte de electrones y la fotofosforilación. Este paso también es conocido como la reducción del ácido-3-fosfoglicérico, para producir gliceraldehído 3- fosfato (GAP) de un hidrato de carbono.
3. La *regeneración* de la RuBP que requiere aporte energético ATP.

Desde el punto de vista estequiométrico es necesaria la fijación de tres moléculas de CO₂ para que el carbono pueda avanzar a la síntesis de hidratos de carbono y con la regeneración completa de RuBP, ya que el primer carbohidrato de la síntesis es un compuesto fosforilado de tres átomos de carbono, la triosa fosfato (Azcon-Bieto y Talón, 2000).

2.4. Factores limitantes de la fotosíntesis

Existen factores internos y externos que afectan el proceso de la fotosíntesis. Los factores internos principalmente son: la estructura de la hoja y su contenido de clorofilas, la acumulación de los productos de la fotosíntesis en los cloroplastos, la influencia de los enzimas del cloroplasto (RuBisCO y PEPcarboxilasa) y la presencia de muy pequeñas cantidades de componentes minerales como iones de calcio. Los factores externos son cantidad de luz incidente en las hojas, la temperatura ambiente y la concentración de dióxido de carbono y de oxígeno en la atmósfera envolvente (Hall y Rao, 1983), en el presente trabajo estos factores son los que se analizan.

2.4.1 Efecto de la intensidad de la luz

El aumento de la intensidad de la luz, produce efectos en la velocidad de la fotosíntesis y es la región de saturación de luz. Este punto de saturación de luz es menor en plantas de sombra (umbrófilas) que en plantas de sol (heliófilas). Las plantas de sol muestran tasas mayores de asimilación de CO₂ con saturación de luz, considerándose esta tasa como una medida de su capacidad fotosintética (A_{MAX}) (Hall y Rao, 1983).

La cantidad de luz solar que llega en un día claro de verano en algunos puntos de la Tierra varía de 2000 a 2200 μmol m⁻² s⁻¹ y en potencia aproximadamente 1000 Wm⁻² por lo tanto, a excepción de las plantas que crecen en bosques con un dosel cerrado espesos en la sombra, a menudo hay luz suficiente, que incide sobre las plantas, para saturar su capacidad fotosintética (Azcon- Bieto y Talón, 2000).

Las curvas de respuesta de la tasa de fotosíntesis neta a la luz o (curvas de saturación de luz), proporcionan valiosa información sobre el funcionamiento fotosintético de las hojas. En la parte inicial en la curva de saturación de luz, se encuentra el punto de compensación de luz, que corresponde a la densidad de flujo fotónico en el que el intercambio neto de CO₂ de la hoja es cero.

La pendiente inicial de la curva de saturación de luz está determinada por reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis, mientras que la fase propiamente de saturación de la curva depende de características enzimáticas (Nobel,1999; Azcon-Bieto y Talón, 2000).

2.4.2 Efectos de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la fotosíntesis depende de la especie y condiciones ambientales en que ha crecido la planta. Las plantas viven y realizan la fotosíntesis en una gran variedad de hábitats que presentan diferencias en régimen térmicos. Las curvas de respuesta a la temperatura en la fotosíntesis en niveles de CO₂ ambiental tiene tres puntos característicos: temperatura óptima, temperatura mínima y máxima. La temperatura óptima es el punto en la curva en el cual la asimilación neta de CO₂ es mayor. Estas respuestas de temperatura resumen tres procesos: fotosíntesis, fotorrespiración y

respiración. La respuesta típica para las plantas C3 muestra una menor dependencia frente a la temperatura, en cambio para las plantas C4 se observa una marcada respuesta a la temperatura. Las plantas C4 presentan por lo general temperaturas óptimas superiores a las de las plantas C3.

El rango óptimo abarca entre (15 - 30) °C, para la mayoría de las especies C3, otras especies como las de sombra tienen un rango óptimo entre (10 - 20) °C; las plantas de sol entre 25 - 35° C. La mayoría de las plantas C4 pueden foto- sintetizar bien con temperaturas superiores a 40°C (Azcon- Bieto y Talon, 2000; Pimienta-Barrios, 2003;)

2.4.3 Efectos de la concentración de CO₂; punto de compensación del CO₂

Las tasas fotosintéticas se ven incrementadas no solo por los aumentos en los niveles de radiación, sino también por el aumento en la concentración de CO₂.

La asimilación neta de CO₂ ocurrirá hasta que la fotorrespiración es compensada completamente por la fijación de CO₂ en la fotosíntesis y se conoce como punto de compensación de CO₂. En otros términos se define cuando la fotosíntesis está en equilibrio con la fotorrespiración por lo que el intercambio neto de CO₂ es cero. Este equilibrio varía con la especie, la temperatura y la concentración de CO₂. Las mayores tasas de fotosíntesis se obtienen con alta radiación, bajo condiciones óptimas de nutrición, suministro de agua y temperatura. Sin embargo, bajo estas condiciones, la fotosíntesis es limitada por las concentraciones ambientales de CO₂ y por difusión de O₂ en plantas (Pimienta-Barrios, 2003).

2.5 Ciclo del Carbono

El ciclo del carbono (C) es un proceso biogeoquímico de gran importancia para el mantenimiento de la vida y para la regulación del clima de la Tierra. El C es un componente estructural y esencial para los seres vivos además de estar presente en los procesos de respiración y fotosíntesis (Figura 2.4) (Odum y Barret, 2006).

Durante la fotosíntesis, plantas, algas y cianobacterias extraen dióxido de carbono del aire y lo fijan (incorporan) en compuestos químicos como la glucosa. Y es devuelto a la

atmósfera por el proceso de respiración celular. El CO_2 atmosférico se disuelve en agua formando ácido carbónico (H_2CO_3) que degrada a los silicatos conformados en las rocas, dando como resultado la formación del ion (H^+) y un ion bicarbonato (HCO_3^-). Estos iones disueltos en agua llegan al mar y son asimilados por los seres vivos y después de su muerte se depositan en sedimentos. En el medio acuático las algas y bacterias autótrofas, así como las plantas acuáticas incorporan o fijan el carbono del CO_2 atmosférico para producir carbohidratos y otras sustancias orgánicas complejas. Estas se distribuyen a través de la cadena alimenticia; así cuando las plantas y animales mueren, toda la materia entra en descomposición por vía de los descomponedores como bacterias y hongos e invertebrados se deposita y queda enterrada en el sedimento y a través de miles de años se transforma en hidrocarburos fósiles. La materia orgánica retorna a la atmósfera también por los incendios forestales, la quema de combustibles fósiles y por erupciones volcánicas. Sin embargo, este ciclo es de larga duración al verse implicados mecanismos geológicos, (Henry y Heinke,1999; Smith y Smith, 2007).

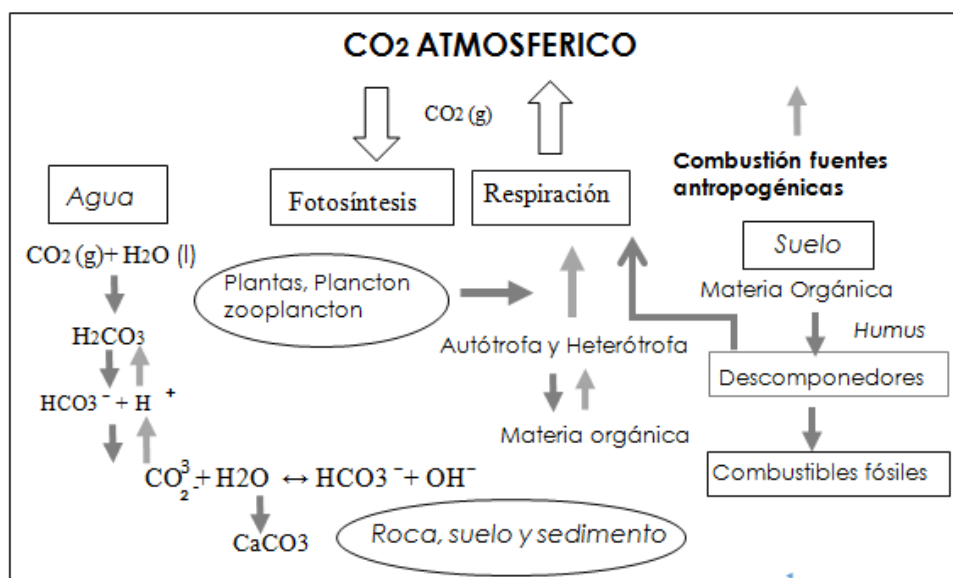


Figura 2.6. Diagrama del ciclo del Carbono.

2.6 Bióxido de Carbono

El bióxido de carbono es un compuesto orgánico formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, su fórmula química es CO_2 y la representación de la estructura de Lewis es: $\text{O}=\text{C}=\text{O}$. Este gas se encuentra en la atmósfera y forma parte de los gases de efecto de Invernadero (GEI) que son el resultado de las emisiones producidas por actividades humanas. De acuerdo con el IPCC (2001), el tiempo de vida del CO_2 en la atmósfera es de 5 a 200 años.

Los gases de efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2), ozono (O_3), halo-carbonos incluyendo los clorofluorocarbonados (CFC-11 y CFC-12), y vapor de agua. Estos gases se acumulan en la atmósfera incrementando su concentración con el tiempo. La figura 2.3 muestra la contribución porcentual de estos gases (IPCC, 2001).

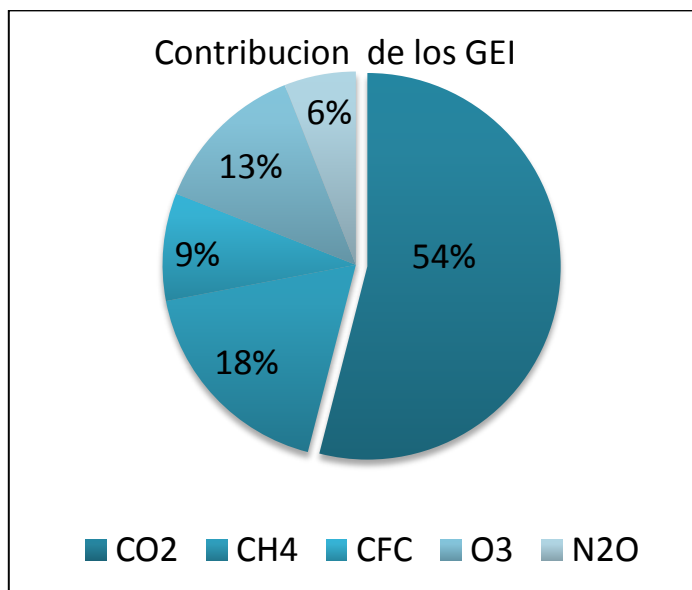


Figura 2. 7. Contribución relativa de GEI (IPCC, 2001)

3.MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se explica la metodología diseñada para la campaña experimental y se describen la zona de estudio, características de las especies y técnica de operación de los equipos utilizados en el trabajo. También en este apartado se presenta el cálculo para obtener la estimación de CO₂ (captura y emisión) en la reserva.

3.1 Zona de estudio

Este estudio se realizó en la REPSA localizada al suroeste de la Ciudad de México entre las coordenadas (19°17' N y 99°11'O), tiene aproximadamente 237 hectáreas y una altura promedio de 2,329 m.s.n.m. La reserva se encuentra dividida en tres zonas principales: núcleo oriente, núcleo poniente y núcleo sur-oriente, además de otras zonas que son de amortiguamiento. El sitio seleccionado para este trabajo fue dentro del núcleo poniente, alejado del paso vehicular y peatonal. En la figura 3.1 se muestra la localización de zona de estudio.

3.1.1 Clima, Suelo y Vegetación

El clima es templado subhúmedo, y de acuerdo con Jáuregui (2000) se divide en temporada seca (noviembre-mayo) y lluviosa (junio-octubre). La temperatura media anual es de 15.6 °C y la precipitación media anual es de 803 mm. De acuerdo con Cano-Santana (2006) el suelo es escaso y a veces inexistente, la profundidad varía de 0 a 30 cm, con un promedio de 4.5 cm. La textura es arenosa-limosa con bajo contenido de fósforo y nitrógeno disponibles, así como de potasio y calcio (Santibáñez, 2005). La topografía de la reserva es accidentada en general y se encuentra dividida en diferentes microambientes como: grietas, hondonadas, oquedades, planos, paredes y promontorios que dan un paisaje de gran heterogeneidad topográfica.

La vegetación característica es matorral xerófilo y la forma de vida dominante son hierbas y arbustos (Castillo-Argüero et al., 2007; Chávez y Ceballos, 2009). El término xerófilo o xerofito proviene del griego (*xero: seco, fitos: planta*).

El inventario de la vegetación ha dado en total 377 especies de plantas pertenecientes a 73 familias y 211 géneros. La familia con mayor riqueza florística es Asterácea (Castillo-Argüero et al. 2004)



Figura 3.1 Localización de la zona de estudio. Fuente: <http://sistemas.fciencias.unam.mx>.

3.2 Campaña experimental

Se establecieron tres periodos de medición para el intercambio de CO₂ en plantas, aire y suelo. Los horarios fueron de: 7:30 a 9:30 h (T1); 11:30 a 13:30 h (T2) y 15:30 a 17:30 h (T3). Los horas de muestreo fueron elegidos de esa manera para obtener una muestra representativa de la fotosíntesis a través del curso diurno. La campaña experimental se llevó a cabo durante el año 2010, específicamente en las fechas: 8–12 febrero, 8–12 marzo, 12–16 abril, 5–9 julio, 16–20 agosto, 6–10 septiembre, 11–15 de octubre y del 8–12 noviembre.

La tasa fotosintética (TF), temperatura (T) y humedad relativa (HR) fueron medidas con un analizador de gases en infrarrojo LI-6400 (LI-COR Inc., NE, USA) en hojas expuestas al sol de cada una de las especies (figura 3.2). Adicionalmente, la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) fue medido con un sensor externo LI-190SA (LI-COR Inc., NE, USA).

Las mediciones experimentales consistieron en tres repeticiones para cada especie durante los tres períodos de muestreo. Los resultados presentados son promedios de estas lecturas de cada horario, en estas mediciones puntuales no se utilizó fuente de luz fluorescente, únicamente la luz del sol. Se emplearon cartuchos de CO₂ (de 12 gramos) durante la fotosíntesis, en tanto que para el aire se usó el CO₂ ambiente. En este estudio no se realizaron curvas de respuesta de luz.

Para las mediciones de CO₂ atmosférico también se utilizó el LI-6400 (LI-COR Inc., NE, USA), instalándose en la parte más alta dentro del sitio de muestreo a una altura aproximada de dos metros, el tiempo de muestreo tuvo una duración de 25 minutos con la cámara que mide el gas en el infrarrojo. Las mediciones del suelo se realizaron con la cámara de respiración del equipo CIRAS-2 (PP System Inc., Haverhill, USA), durante 25 minutos, (figura 3.3).



Figura 3.2. Equipo LI-6400 (LI-COR Inc., NE, USA)



Figura 3.3. Equipo CIRAS-2 (PP System Inc., Haverhill, USA),

3.3 Características de las plantas

Las mediciones se llevaron a cabo *in situ*, en tres individuos de cada una de las especies que se caracterizan por ser nativas y abundantes de la REPSA (figura 3.4). Para este trabajo las especies elegidas fueron: *Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*. Algunos autores identifican a *Buddleia* como Buddleja (Ocampo-Acosta, 2004) y a la especie *Senecio Praecox* como Pittocaulom (Rosell y Olson, 2007). Sin embargo para este trabajo se nombraran como *Buddleia cordata* y *Senecio praecox*. Las características de las tres especies se describen a continuación.

Género: *Buddleia*. Especie: *buddleia cordata kunth*

Nombre común: Tepozán

Árbol pequeño que puede llegar a medir hasta 4 m, de hoja perenne, perteneciente a la familia *Longaniceae* (figura 3.4a); florece de julio a octubre con hojas oblongas que miden (5 - 24 cm de largo y 1.5 - 10.5 cm de ancho). Se localiza frecuentemente en matorrales, pastizales y bosques. También puede encontrarse en zonas urbanas.

Género: Senecio. Especie: *senecio praecox* (Cav.) DC.

Nombre común: palo loco

Pertenece a la familia *Asteraceae*, puede presentarse como hierba o arbustos y tiene una forma de vida similar a la especie *Buddleia cordata*, sus hojas son oblongas (2 -18 cm de largo y 2 - 10 cm de ancho), pierde las hojas durante la temporada seca y permanece así durante la floración que es de febrero a mayo (Barradas et al., 2003), reduciendo su área foliar durante la estación seca (figura 3.4c). Habita en matorrales xerófilos y en sitios rocosos y basálticos.

Género: Echeveria. Especie: *echeveria gibbiflora* D.C.

Nombre común: Oreja de burro

Es una hierba perenne con hojas y tallos suculentos, perteneciente a la familia *Crassulaceae* (Carrillo-Reyes et al., 2009); florece de noviembre a febrero, y sus hojas tienen 24 - 30 cm de largo diámetro formando una roseta (Pérez-Calix, 2008), como puede observarse en la figura 3.4b, habita en sustratos rocosos carentes de suelo y vive silvestre desde México hasta América del Sur.

3.3. 1 Metabolismo

Senecio praecox y *Buddleia cordata* tienen un metabolismo similar a través del ciclo de Calvin-Benson, lo que permite la fijación y asimilación de CO₂ durante el día para formar compuestos orgánicos (Nobel, 2009). La especie *Echeveria gibbiflora* tiene un metabolismo ácido de las crasuláceas conocido como CAM que permite la fijación de CO₂ en la noche, mientras que en el período de luz puede asimilar el CO₂ en los cloroplastos por ciclo de C₃ (Taiz y Zeigel, 2006).

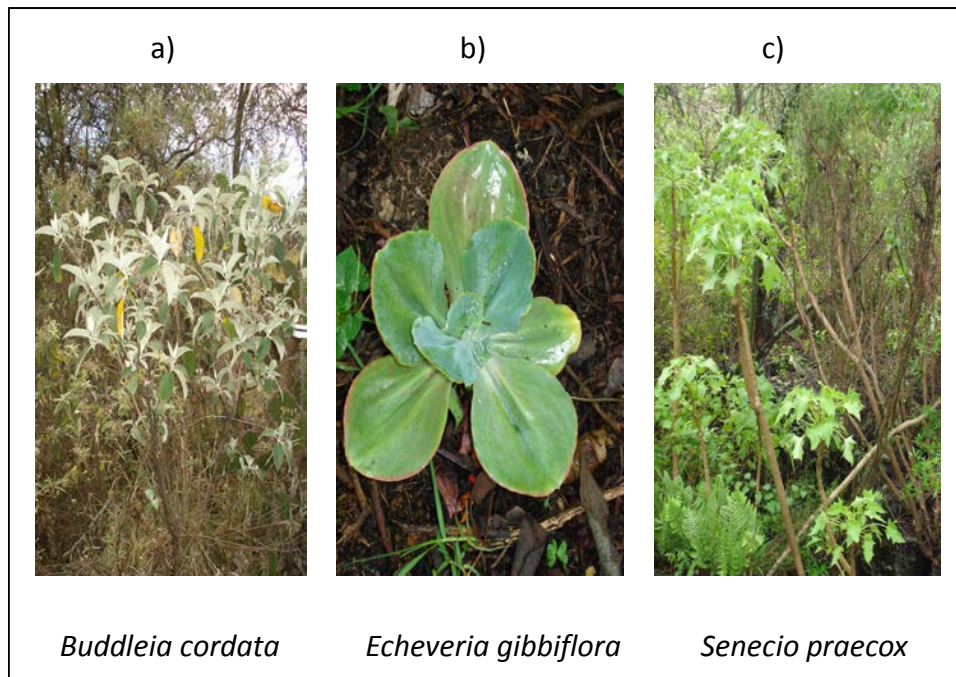


Figura 3.4 Especies seleccionadas en la REPSA. a) *Buddleia cordata*, b) *Echeveria gibbiflora*, c) *Senecio praecox*.

3.3.2 Población y densidad

Para estimar el número de individuos de cada especie en la reserva, se seleccionaron ocho cuadrantes de 10 por 10 m, además del sitio en el que se realizó el muestreo. El método de muestreo fue selectivo: se contó el número de individuos, ramas y hojas de las tres especies en cada cuadrante en ambas temporadas climáticas. Para calcular el total de CO₂ capturado y emitido por la reserva, se promedió el número de individuos de cada especie en 9 cuadrantes y después se extrapolaron a la REPSA. Aplicando el método destructivo, se tomaron muestras de ramas al azar de cada especie en todos los cuadrantes, y se midió el área de la hoja utilizando un LI-3000 (LI-COR Inc., NE, USA). Esta información se utilizó para estimar la contribución total de CO₂ en la REPSA.

3.3.3 Distribución y dispersión de especies

La densidad es un parámetro que permite conocer la abundancia de una especie de planta. La densidad (D) está representada por el número de individuos (N) en un área determinada (A), en donde: $D = N / A$.

Un parámetro relacionado con la densidad es la *dispersión de individuos* que permite conocer su extensión y distribución en un área determinada, mediante el uso de patrones específicos que se dividen en: aleatorio, uniforme y agregado como puede observarse en la figura 3.5, (Odum y Barret, 2006).

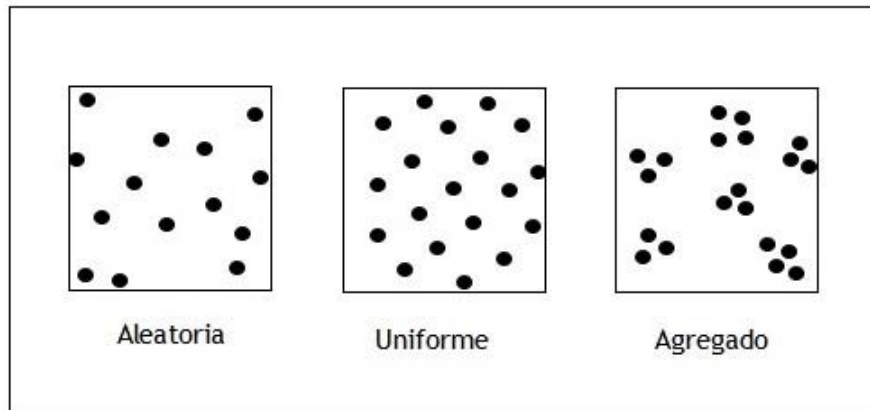


Figura 3.5 Patrones de distribución espacial de individuos.

Aleatorio se presenta cuando los individuos de una población se distribuyen de manera impredecible o al azar, no relacionada con la presencia de otros. El esparcimiento entre los individuos es irregular y la presencia de un individuo no afecta de manera directa la ubicación de otros.

Uniforme se refiere a los individuos de una especie que aparecen en la mayoría o en todos los muestreos, no es muy común en la naturaleza; sin embargo es frecuente en los bosques y cultivos como trigo. Puede ocurrir cuando hay competencia entre los individuos.

Agregado es producto de la dispersión de individuos que se asocian en grupos, representa el patrón de tipo más común en la naturaleza y se presenta cuando los individuos se concentran en partes específicas del hábitat. por ejemplo, cuando los recursos o las

condiciones óptimas para el desarrollo de las especies se encuentran concentrados en un lugar específico.

Para saber la distribución de estas especies, se seleccionaron 9 cuadrantes de 10 por 10 m dentro de la REPSA y se aplicó la fórmula de coeficiente de dispersión:

$$CD = S^2 / x$$

Donde CD = coeficiente de dispersión; S^2 = la varianza y x = promedio de la muestra.

Cuando el CD es mayor a 1, éste indica que la dispersión es agregada; cuando el valor es igual a 1, indica que la distribución es uniforme y cuando el coeficiente de distribución es menor a 1, indica que la distribución es aleatoria. De acuerdo a esta fórmula se obtuvieron los coeficientes de dispersión para los individuos de las tres especies en el núcleo poniente (NP), núcleo oriente (NO), núcleo surorientado (NSO) y zona de amortiguamiento (ZA) de la REPSA.

La distribución espacial de la vegetación es una causa y efecto de la variación de la habilidad que tienen los procesos en los ecosistemas semiáridos (Caylor y Shugart, 2006).

La importancia de la vegetación en los ecosistemas semiáridos radica en su capacidad de adaptación en la reproducción (Reyes-Agüero et al., 2006).

3.4 CO₂ atmosférico y CO₂ del suelo

Para entender el papel que juega el CO₂ en el ciclo del carbono y su relación en *suelo-planta-atmósfera* se realizaron mediciones en estos tres sistemas.

La dinámica de la atmósfera es sin duda un campo que ha sido estudiado desde el siglo pasado, como se ha mencionado anteriormente, el incremento en las concentraciones del dióxido de carbono y los registros del aumento en la temperatura durante los últimos 100 años (IPCC, 2007), indican que la Tierra está experimentando importantes cambios biofísicos.

Los procesos biológicos que ocurren en el suelo ejercen un gran control sobre el ciclo del carbono. La respiración del suelo está fuertemente ligada al metabolismo de las plantas y en la producción reciente de restos de plantas (Ryan y Law, 2005).

La respiración del suelo (R_S) es la segunda mayor vía de intercambio de CO_2 de la superficie terrestre a la atmósfera, solo después de la fotosíntesis. La difusión del CO_2 del suelo a la atmósfera está en función de otros factores, como la humedad y textura del suelo (Cueva- Rodríguez et al., 2012).

La R_S es el flujo total de CO_2 producido por procesos metabólicos de los organismos, principalmente de los microbios al descomponer la materia orgánica del suelo (respiración heterotrófica) y la respiración de las raíces y micorrizas (respiración autotrófica) (Hanson et al., 2000; Ryan y Law, 2005).

3.5 Estimación de CO_2 (emisión y captura)

El intercambio de CO_2 entre las especies y la atmósfera, se estimó usando valores promedios de fotosíntesis, población vegetal y área foliar de cada especie durante las temporadas de lluvia y seca. El cálculo de la estimación de CO_2 en la reserva se realizó con la siguiente ecuación:

$$CO_2 \text{ (estimado)} = (TF \times t \times AF) / AR$$

Donde TF representa la tasa fotosintética promedio ($Kg CO_2$), t es el tiempo de muestreo (s), AF es el área foliar de los individuos por cuadrante (m^2) y AR el área de la REPSA (m^2). Los valores positivos indican captura de CO_2 y los valores con signo negativo representan emisión.

3.6 Análisis estadístico

Se aplicó un coeficiente de correlación para analizar las relaciones de tasa fotosintética entre la temperatura, la densidad del flujo fotosintético de fotones y la humedad relativa

(Estadística R2015a, Matlab). Los datos se presentan como la media de tres pruebas y el error estándar.

3.7 Descripción del equipo LI- 6400

Este equipo se compone de una consola con un almacenador de datos que permite configurar y guardar información en tiempo real y una cámara que contiene un analizador de gases en infrarrojo conocida por sus siglas en inglés como (IRGA). La cámara consiste de tres partes básicas: la fuente de infrarrojo, una la celda de gas y un detector (Coombs, 1988). El equipo utiliza un desecante (drierite) y una mezcla de óxido de calcio e hidróxido de sodio (sodalime) que absorben la humedad del medio y el dióxido de carbono. Opcionalmente el dispositivo puede funcionar con un cartucho de dióxido de carbono de 12 gramos y funciona con dos baterías recargables de 1.5 A. En las figuras 3.6 y 3.7 se muestra las partes principales que componen el equipo LI-6400 y la cámara IRGA.

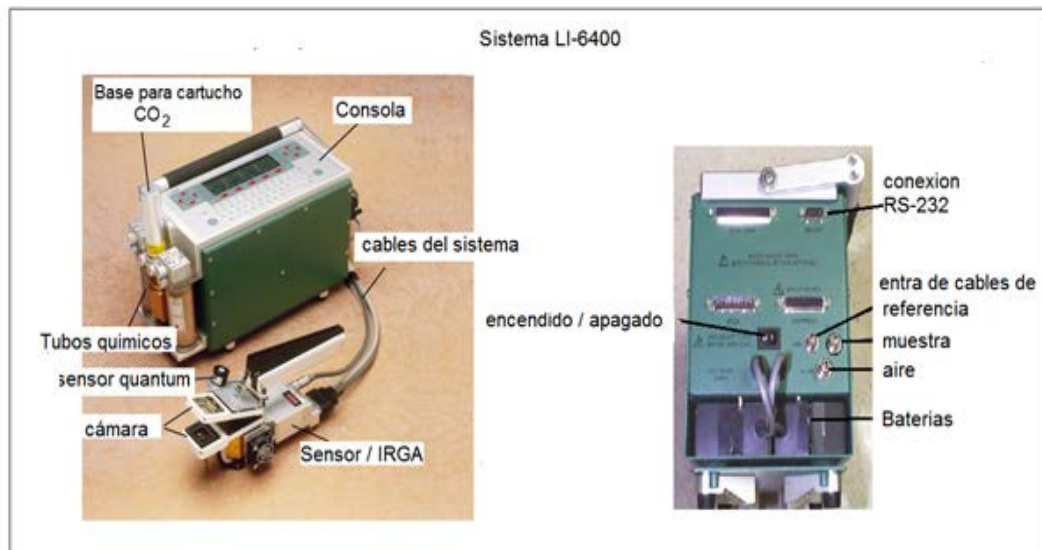


Figura 3.6. Componentes del equipo LI-6400.

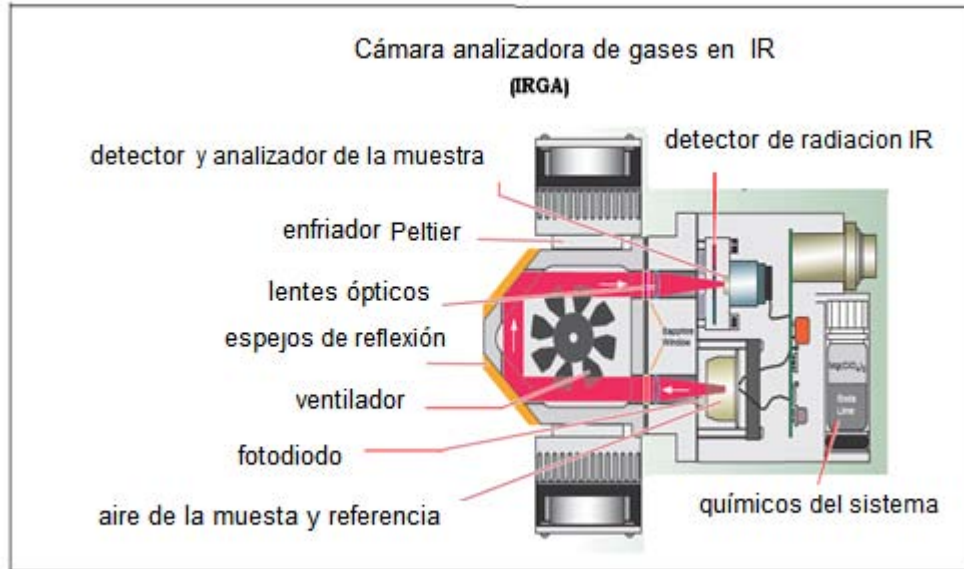


Figura 3.7 Componentes de la cámara IRGA.

3.7.1 Técnica de Operación de LI - 6400

El equipo LI-6400 es un sistema abierto, en el que se mide principalmente fotosíntesis y transpiración, las mediciones están basadas en las diferencias de CO_2 y H_2O provenientes del flujo de aire que entra al equipo y que es analizado por los sensores de la cámara IRGA. En la figura 3.8 se muestra el recorrido del flujo de aire que entra al sistema. Primero pasa por una columna de absorción que sirve para eliminar el CO_2 presente en el aire del ambiente y después se dirige a una segunda columna que contiene desecante para retirar residuos de agua provenientes de esta corriente y así continuar su trayectoria hacia el controlador de flujo de CO_2 del sistema, en el que entra el CO_2 proveniente del cartucho. Después se dirige a otro controlador de corriente de aire y a la salida de este, la corriente de aire se divide, una parte corresponde al flujo de la muestra (75%) y otra corresponde al flujo de la referencia (25%). Esta corriente se direcciona a la cámara IRGA en la cual los dos flujos de aire (muestra y referencia) pasan por una fuente de luz

(radiación infrarroja) y es dirigida a un fotodiodo (que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que lo incide) y a través de un ventilador se mezcla este flujo y se direcciona hacia un filtro (interruptor rotatorio) que deja pasar solo la longitud en infrarrojo y pasa a través de detectores de gas (analizador de muestras). El analizador mide las concentraciones del gas de referencia y se encuentra localizado debajo del analizador muestra. El detector que analiza la muestra y la referencia, junto con el filtro están sellados en una carcasa, la cual se purga continuamente con un desecante para quitar el CO_2 y vapor de agua.

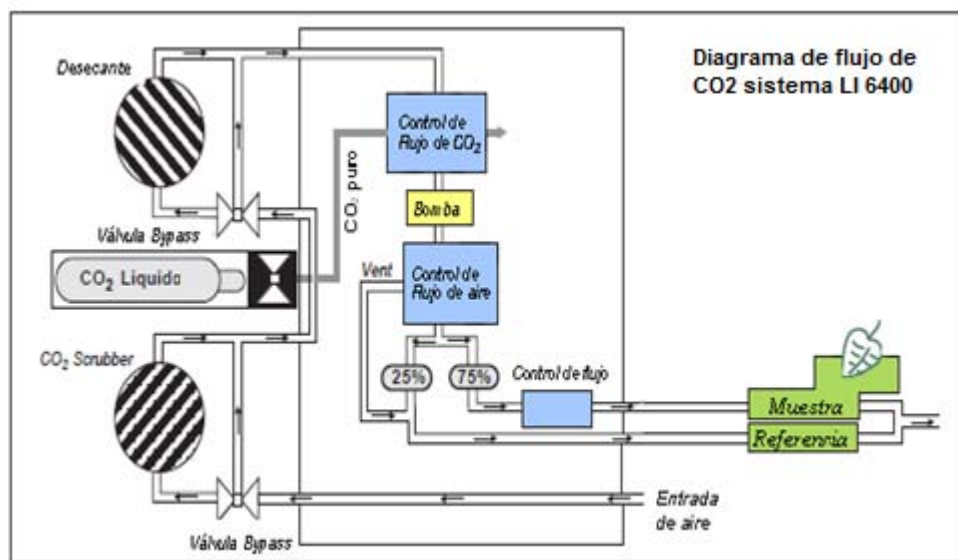


Figura 3.8 Diagrama de flujo de CO_2 en LI- 6400.

3.8. Descripción del Equipo CIRAS-2

Es un analizador en el infrarrojo para gases, conocido como Sistema Portátil de Fotosíntesis (PP System CIRAS-2), está diseñado para medir la fotosíntesis además de otras variables relacionadas con este proceso. El equipo consta de una consola integrada con una computadora portátil que permite visualizar en su pantalla los cambios que ocurren durante la medición y una cámara (PLC-U) que mide el intercambio de gas en las hojas, además también emplea un cartucho de 8 g de CO_2 .

Dispone de una cámara de respiración de suelo conocida como SRC-1, por sus siglas en inglés. Este analizador puede medir CO_2 sin necesidad de usar la cámara PLC-U y debido a esta característica puede utilizarse como un analizador de CO_2 atmosférico.

La consola tiene un panel de control, en donde se localizan las entradas y salidas de aire y las conexiones de la fuente de poder eléctrica (cable RS-232), accesorios como la cámara PLC-U y cámara de respiración de suelo. El CIRAS-2 tiene cinco absorbedores dispuestos en columnas, que contienen tres diferentes químicos que condicionan el aire suministrado al equipo y son: cal sodada, gel de sílice y molecular sieve. Los componentes de este equipo se muestran en la figura 3.9.

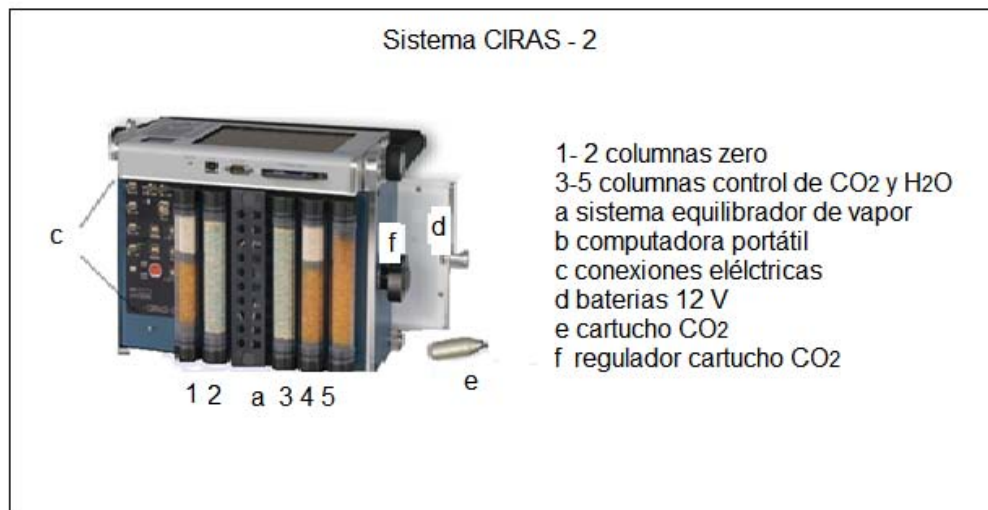


Figura 3.9 Equipo CIRAS-2 y sus componentes.

Los parámetros que mide este equipo son: CO_2 referencia, CO_2 diferencial, H_2O referencia, H_2O diferencial, presión atmosférica, humedad relativa, temperatura ambiente, temperatura de la hoja, PAR, fotosíntesis, transpiración y evaporación, conductancia estomática, concentración intercelular de CO_2 , déficit de presión de vapor (DPV). Es importante mencionar que para el presente estudio, el equipo se utilizó únicamente para realizar mediciones en suelo.

3.8.1 Descripción de la cámara de respiración de suelo

Este equipo opera como un sistema cerrado y se conecta a la consola del CIRAS-2 a través de 2 mangueras, cada una se conecta respectivamente en la entrada y salida de referencia del sistema. La cámara se usa en posición vertical y se coloca en la superficie de la tierra. Funciona con un ventilador de 12 V, y el material del que está hecho es de acero inoxidable y PVC. La cámara es ligera y portátil sus dimensiones son de (15 x 10) cm y su peso es de 900 g.

Una vez que el ventilador se enciende, se mezcla el aire de la superficie y después mediante una bomba se succiona el aire de la muestra para ser llevado al analizador de CO₂, emitido desde suelo.

Las especificaciones de este equipo son: volumen del sistema de 1170 cm³ y tiene un área de exposición con el suelo de 78 cm². El tiempo máximo para realizar las medición de CO₂ es de 2 minutos. El máximo cambio mostrado en la concentración de CO₂ desde el comienzo de la medición es de 60 ppm. Las lecturas registradas son cada 3 segundos, y son ajustadas por una ecuación cuadrática. El equipo requiere como mínimo 3 lecturas para realizar el primer ajuste.

4.RESULTADOS Y DISCUSION

En esta sección se analizan los resultados de lo general a lo particular, inicialmente se muestran promedios mensuales de las variables ambientales como son: temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar obtenidos de una estación meteorológica cercana al sitio de muestreo; y posteriormente se examinan los resultados de promedios diarios de tasa fotosintética, y concentración de CO₂ en aire y suelo, así como también cálculos de la estimación de CO₂ (capturado y emitido) en la reserva. Adicionalmente se presenta información de los índices de vegetación y Productividad Primaria Bruta.

4.1. Variables meteorológicas

La figura 4.1 muestra la variación anual de la temperatura y precipitación durante el año 2010 en la REPSA. Se observa que la temperatura promedio más alta fue durante el mes de mayo con 20 °C y la menor temperatura fue en diciembre con 12 °C. La mayor precipitación anual se registró en julio con 255 mm de lluvia acumulada. Los meses con mayor humedad relativa fueron de julio a septiembre en un rango de mayor a menor de (78-71%)(figura 4.2.) y durante estos meses la temperatura promedio fue de 18 ° C.

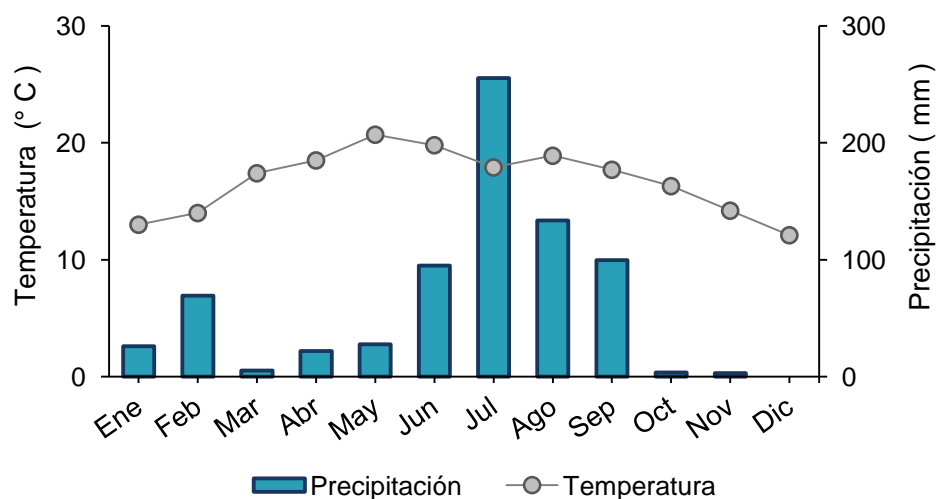


Figura 4.1. Variación anual de la temperatura y la precipitación 2010.

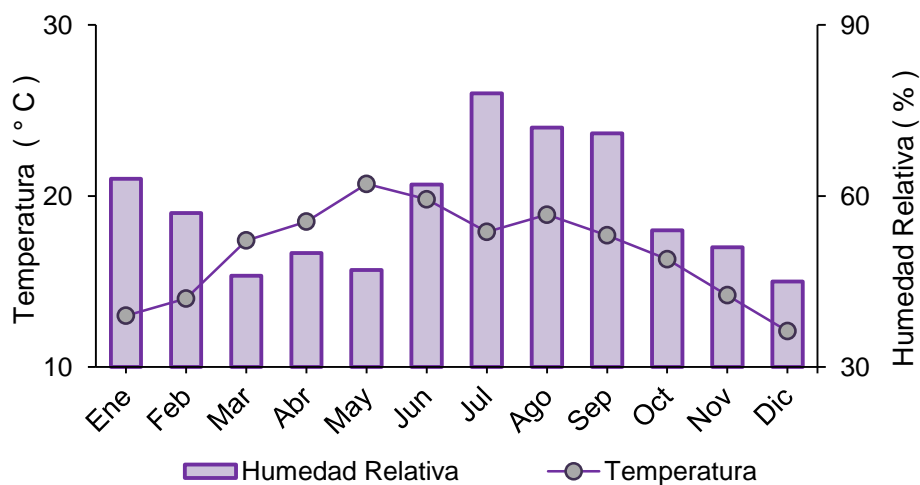


Figura 4.2. Variación anual de temperatura y humedad relativa en el año 2010.

La figura 4.3 muestra la radiación global, observándose que junio fue el mes con mayor radiación (446 W m^{-2}), en tanto que en noviembre y diciembre esta variable disminuye considerablemente en un intervalo de 190 a 194 W m^{-2} respectivamente. El promedio anual de la radiación global fue de 330 W m^{-2} .

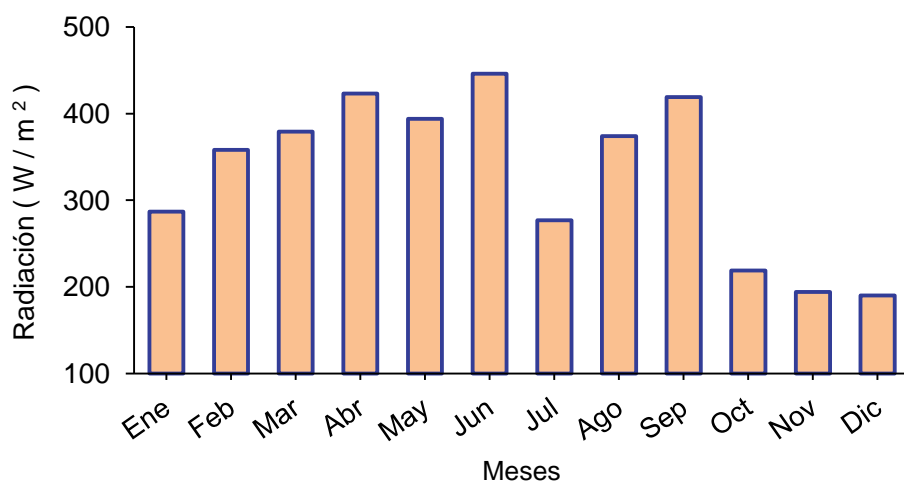


Figura 4.3 Radiación global para el año 2010.

4.2 Promedios de Tasa fotosintética (TF), Densidad del Flujo de Foton fotosintético (DFFF), Temperatura (T) y Humedad Relativa (HR).

La temperatura máxima fue de 27 °C en abril (temporada seca), mientras que la mínima fue de 22 °C durante septiembre y octubre (temporada de lluvia). La figura 4.4 muestra la variación mensual de TF, DFFF, T y HR. Estos valores representan los promedios mensuales de los tres horarios en ambas temporadas climáticas. También se analizó la correlación de coeficientes entre estas variables. En la (figura 4a, 4d, 4g) se muestran los cambios de la tasa fotosintética en las dos temporadas para todas las especies. Estas plantas xerófitas caracterizadas por soportar grandes periodos de sequias, están adaptadas a la escasez de agua. La absorción de humedad relativa en las plantas xerofitas se debe al efecto que tienen para absorber la mínima cantidad de agua que puedan tocar sus hojas (Lot y Cano-Santana, 2009).

El promedio de la tasa de fotosíntesis durante las temporadas de seca y de lluvias fue respectivamente de 22 y 6 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para *Buddleia cordata*; 27 y 5.25 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para *Senecio praecox* y de 29 y 31 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para *Echeveria gibbiflora*.

En el mes de abril la especie *Buddleia cordata* presentó una tasa fotosintética promedio de 29.25 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, este valor fue el mayor de la temporada de seca, mientras que en lluvias fue de 7.36 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en el mes de Julio. En cuanto a los promedios más bajos en secas y lluvias fueron de 6.87 y 5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en noviembre y octubre respectivamente (figura 4a).

Durante la temporada de seca el valor promedio de la DFFF fue de 750 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mientras que en la temporada de lluvia fue de 438 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; estas variables muestran una alta correlación (tabla 4.1), sin embargo para la temperatura y humedad relativa hay una baja correlación.

Senecio praecox pierde sus hojas en la temporada de seca, excepto en abril. En este mes la TF alcanzó 27 $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con una temperatura promedio de 28 °C y durante la temporada de lluvia el rango de la temperatura fue de 23–21°C. De julio a octubre el rango de TF fue de 6.72–4.28 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, estos resultados muestran cambios importantes de una temporada a otra (figura 4d).

Se observa que la temperatura y la DFFF tienen un comportamiento similar, disminuyen durante la temporada de lluvia, mientras que en temporada seca aumentan. En ambos casos hay un buen coeficiente de correlación.

La especie *Echeveria gibbiflora* presentó un comportamiento y correlación muy diferente respecto las especies anteriores, los valores negativos que se observan en la (figura 4g) indican fotorrespiración. Durante los meses de febrero a abril, se observó una tasa de fotorrespiración entre -57 a -21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sin embargo durante la temporada de lluvia se observó una tasa fotosintética positiva en un rango de 1 a 5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La DFFF mostró un notable cambio de 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la temporada de seca, a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la temporada de lluvia. La TF y DFFF tuvieron una correlación negativa ($r = -0.78$), indicando una probable relación inversa entre estas variables. Los meses con los valores máximos de DFFF en las tres especies fueron marzo y abril. El porcentaje de humedad más alto fue de 30 durante julio, (figura 4i).

En el **anexo a**, se presenta el error estándar de estas variables y en el **anexo b** los valores promedios de TF en cada temporada.

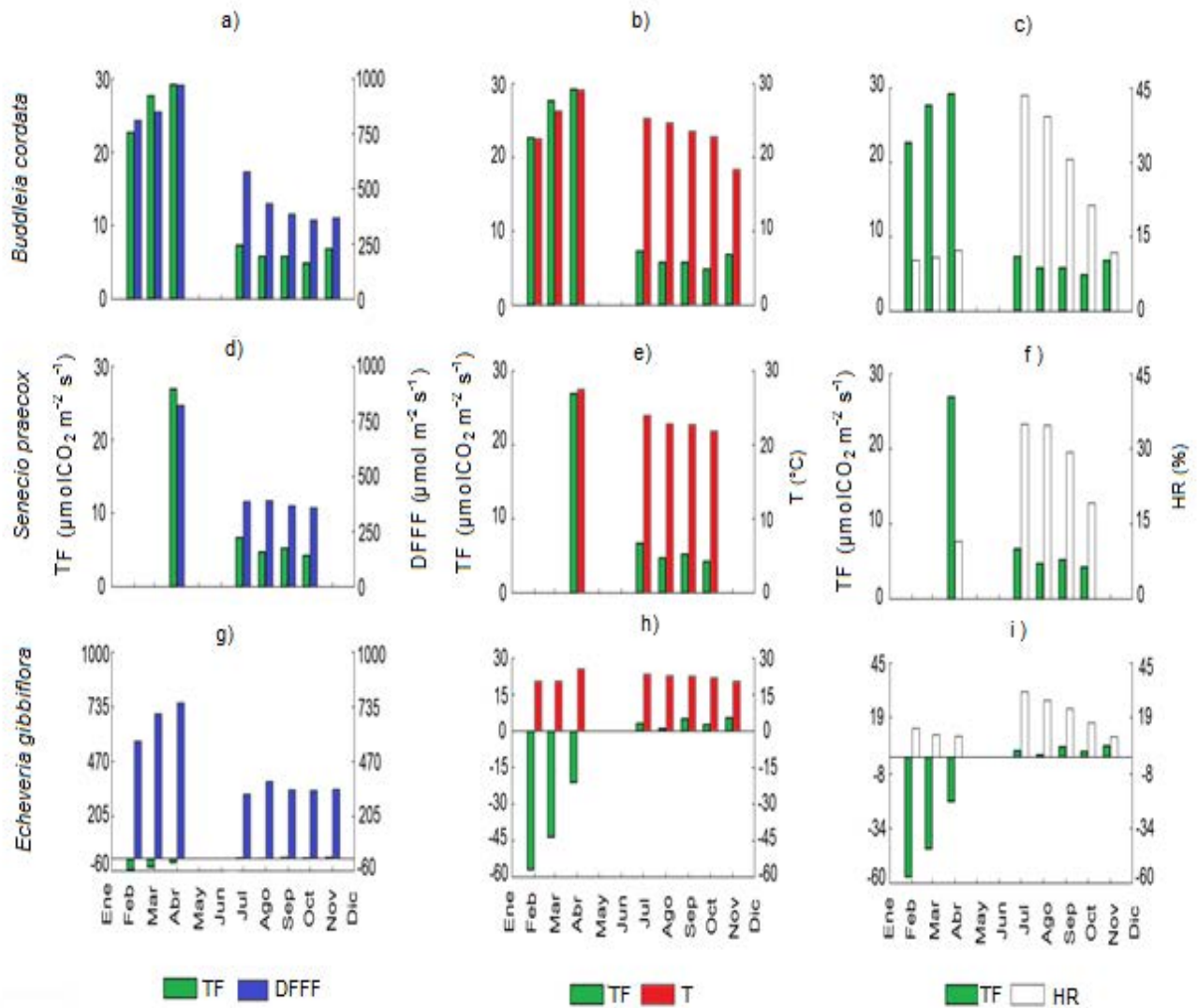


Figura 4.4. Promedios de tasa fotosintética vs densidad del flujo fotosintético de fotones (a, d y g); tasa fotosintética vs temperatura (b,e y h) y tasa fotosintética vs humedad relativa (c,f y i) para *Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora* respectivamente.

Tabla 4.1. Correlación de variables para *Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*.

	TF ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	HR (%)
TF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.00*	0.58	0.97*	-0.66
T ($^{\circ}\text{C}$)		1.00*	0.68*	0.12
DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			1.00*	-0.49
HR (%)				1.00
<i>Buddleia cordata</i>				
TF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.00*	0.97*	1.00*	-0.74
T ($^{\circ}\text{C}$)		1.00*	0.96*	-0.56
DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			1.00*	-0.74
HR (%)				1.00
<i>Senecio praecox</i>				
TF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.00*	0.32	-0.78	-0.50
T ($^{\circ}\text{C}$)		1.00*	0.16	0.29
DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			1.00*	-0.63
HR (%)				1.00
<i>Echeveria gibbiflora</i>				

Buddleia cordata (n=3); *Senecio praecox* (n=3); *Echeveria gibbiflora* (n=3). Los valores significativos se indican con * ($P < 0.05$)

4.3 Población y densidad

Durante la temporada de lluvia se observó un incremento del área foliar y densidad de individuos estimados para la reserva como se observa en tabla 4.2. Estos resultados demuestran que la cobertura vegetal es favorecida en esta temporada.

Tabla 4.2. Área foliar y densidad foliar en la REPSA.

Especies	Núm. de individuos en cuadrantes (individuo/100m ²)		Af promedio individuos en REPSA (m ²)		Densidad de individuos por especie (individuo/área) REPSA (m ²)	
	Seca	lluvia	Seca	lluvia	seca	lluvia
<i>Buddleia cordata</i>	6	6	1,435	4,846	109,200	136,500
<i>Senecio praecox</i>	7	7	552	3,042	136,500	163,800
<i>Echeveria gibbiflora</i>	79	79	1,430	8,168	1,092,200	1,911,000

4.4 Tasa Fotosintética (TF) mensual en los tres horarios (T1, T2 y T3)

Durante la temporada de seca los meses con valores más altos de TF en los tres horarios fueron marzo y abril, (figura 4.5a). Observándose los siguientes valores para marzo T2 (11:30-13:30 h), 29 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y para abril 31.8 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, este horario mostró valores mayores que en T1(7:30-9:30 h) y T3(15:30-17:30 h).

Los resultados de TF para la temporada de lluvia en la especie *Buddleia cordata*, disminuyen notablemente con relación a la temporada de seca, (figura 4.5b). En el mes de julio la TF fue mayor que los meses de agosto a octubre. Durante los horarios T2 (11:30-13:30 h) y T3 (15:30-17:30 h) estos valores fueron 10.27 y 6.06 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente para cada horario.

En la figura 4.6a, se muestra el mes representativo de la temporada de seca para la especie *Senecio praecox*. Los valores obtenidos en cada horario fueron T1 (7:30 -9:30 h) 25.57 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, T2 (11:30-13:30 h) 29.30 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y T3(15:30- 17:30 h) 26.03 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Durante la temporada de lluvia (figura 4.6b), el mes de julio mostró los valores más altos de toda la temporada en los horarios T2 (11:30-13:30 h) y T3 (15:30-

17:30 h) con valores de 9.74 y 5.45 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Sin embargo en septiembre se observaron valores altos durante el horario de (7:30-9:30 h) con 6.43 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Para la especie *Echeveria gibbiflora* se observaron valores negativos de TF en los meses de febrero, marzo y abril, sin embargo para el mes de noviembre como se muestra en la figura 4.7a, los valores fueron positivos en los tres horarios mostrando los siguientes valores: T1(7:30-9:30 h) 4.63 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$; T2 (11:30-13:30 h) 6.18 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y T3(15:30-17:30 h) 5.89 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Los resultados para la temporada de lluvia fueron todos positivos (figura 4.7b). De esta temporada el mes de agosto presentó los valores más pequeños de TF. Los resultados fueron (1.09,1.24 y 1.19 $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) para T1,T2 y T3 respectivamente. A partir de estos resultados se puede inferir que la especie *Echeveria gibbiflora* es CAM facultativa debido a que cambia los valores medidos de negativos a positivos en algunos meses, como se mencionó anteriormente. Estos resultados de máximos y mínimos en los tres horarios para las especies estudiadas, se observan en el **anexo c**.

El estudio de Osmond (1978) explica que una planta CAM, puede ser *obligada o constitutiva* y este metabolismo consiste en que abren sus estomas siempre durante la noche, en donde se genera la total absorción de CO_2 . Y cuando *son facultativa o inducible*, se debe a respuestas de señales ambientales como el fotoperiodo o el estrés hídrico. Las plantas CAM facultativas pueden fijar el CO_2 como una planta C3 o como una CAM. Este cambio de C3 a CAM esta relacionando con diferentes factores ambientales como, temperatura, radiación solar, así como también salinidad, cantidad de fosfato y nitrógeno. Para algunas especies el fotoperiodo es suficiente, sin embargo a veces depende de la ontogenia de la planta. La fijación del CO_2 es rápida y generalmente reversible. Así a lo largo del día con un incremento en la temperatura y poca cantidad de agua disponible cambian a CAM (Lüttge, 1987; Winter y Smith, 1996; Ernst-Detlef Schulze y colaboradores, 2005).

Las especies CAM más suculentas y con mayor capacidad de almacenamiento de agua pueden mantener por más tiempo la tasa máxima de asimilación de CO₂ y un balance positivo de carbono, aun después de 30 días de sequía (Nobel, 1999).

En general la vegetación de ambientes áridos y semiáridos está bien adaptada a condiciones de estrés hídrico (Bisigato et al., 2009). Fenológicamente y morfológicamente la adaptación a condiciones secas, relación *suelo-planta* y tolerancia a sequías son características sobresalientes de esta áreas. Así mismo, las plantas de zonas áridas se adaptan al medio reduciendo la apertura de los estomas durante los periodos secos, reduciendo la transpiración (Salas, 2000).

En los meses en los que se obtuvieron valores negativos se sugiere que la planta se encuentra metabolizando como CAM facultativa. En general son pocos los estudios realizados en crassulaceas (Stevens et al., 1995) y con respecto a las respuestas fisiológicas de las plantas CAM se han realizado principalmente en miembros adultos de solo tres familias: Agavaceae, Bromeliaceae y Cactaceae (Winter y Smith, 1996).

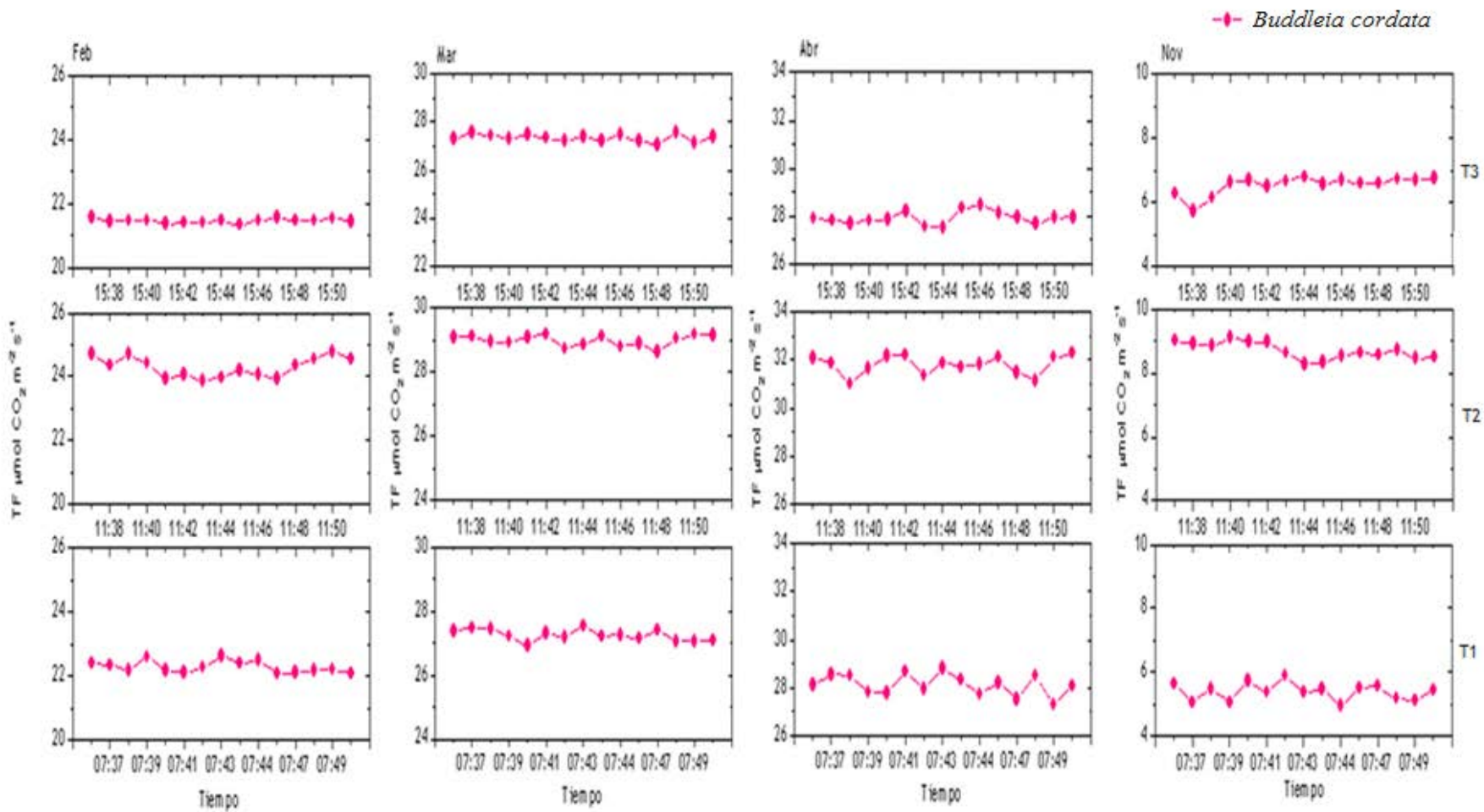


Figura 4.5a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de seca (*Buddleia cordata*).

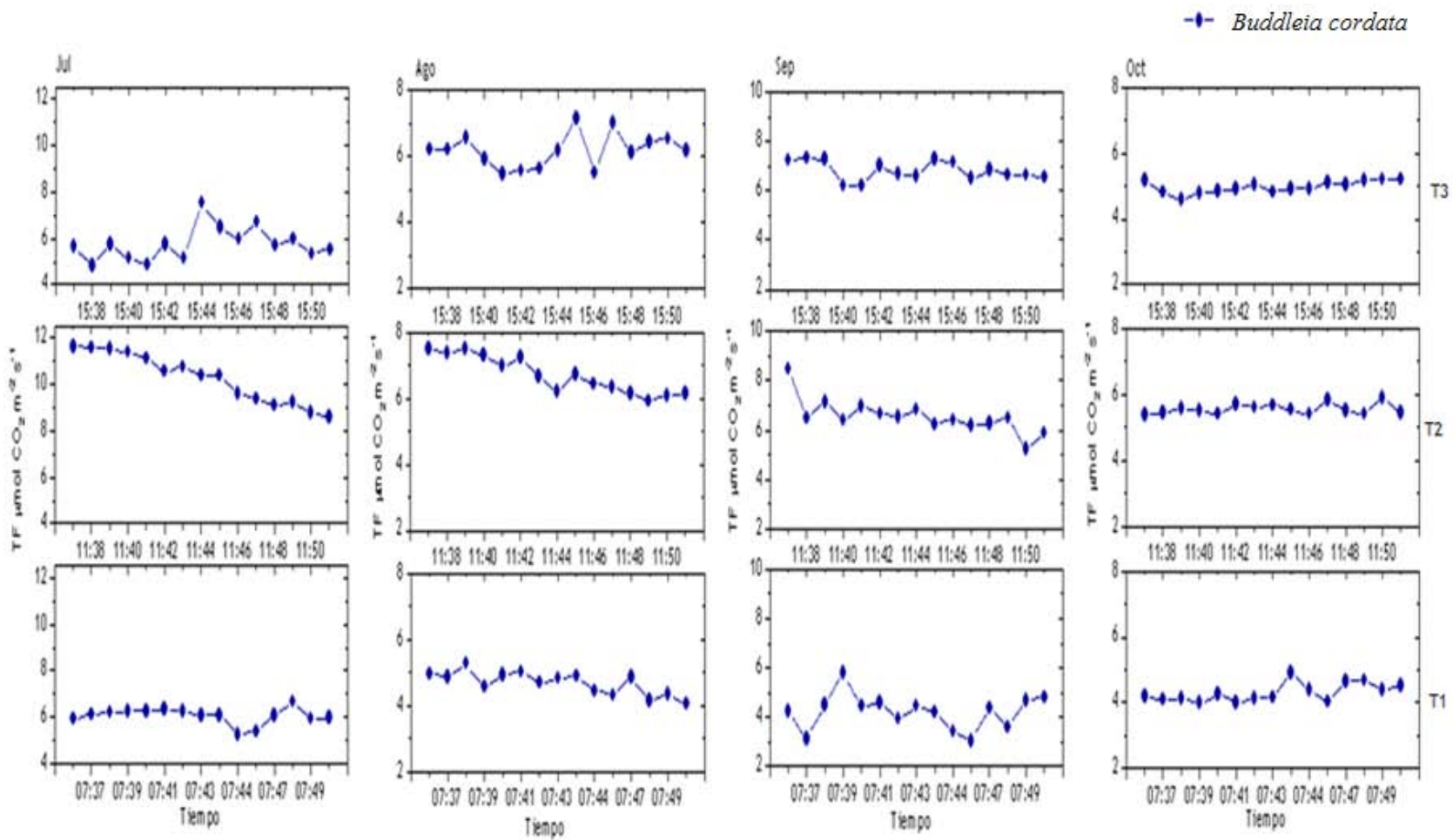


Figura 4.5b Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de lluvia (*Buddleia cordata*).

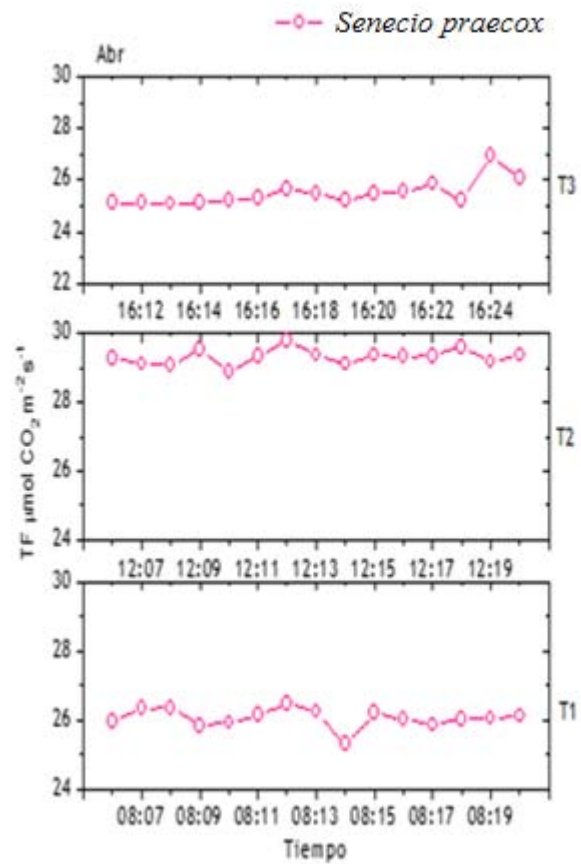


Figura 4.6a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de seca (*Senecio praecox*).

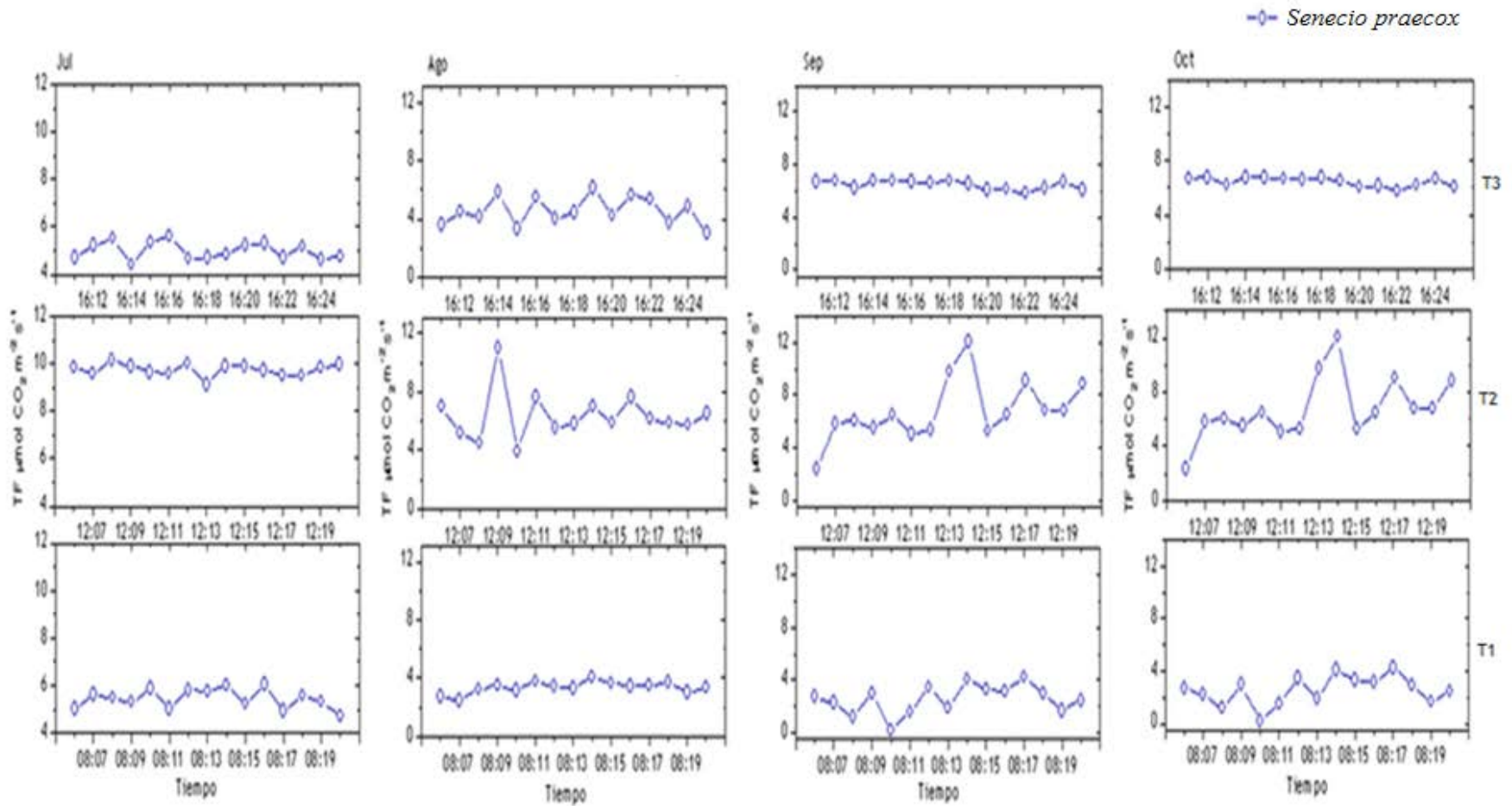


Figura 4.6b Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada de lluvia (*Senecio praecox*).

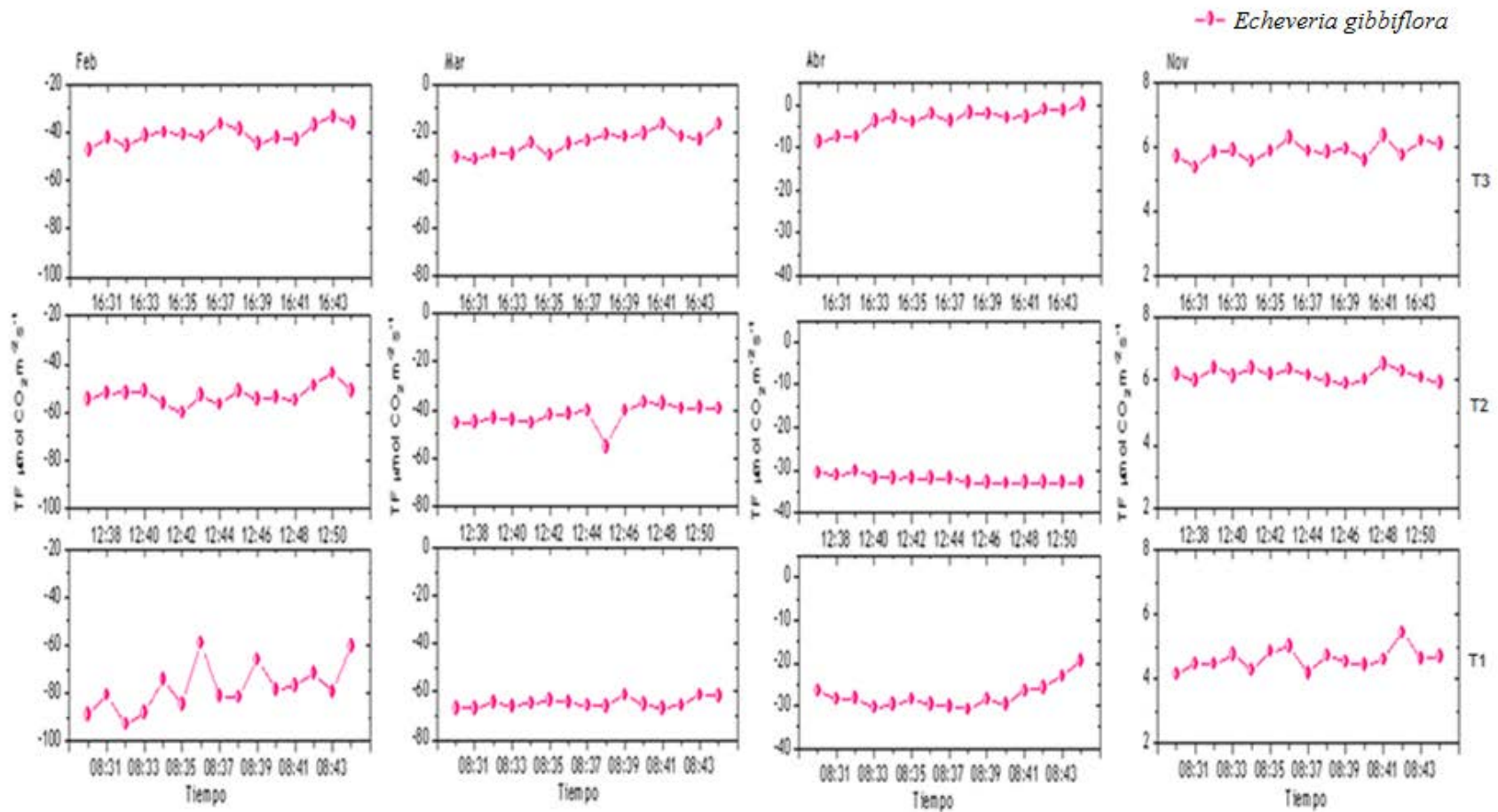


Figura 4.7a Promedio mensual de la Tasa fotosintética, temporada seca (*Echeveria gibbiflora*).

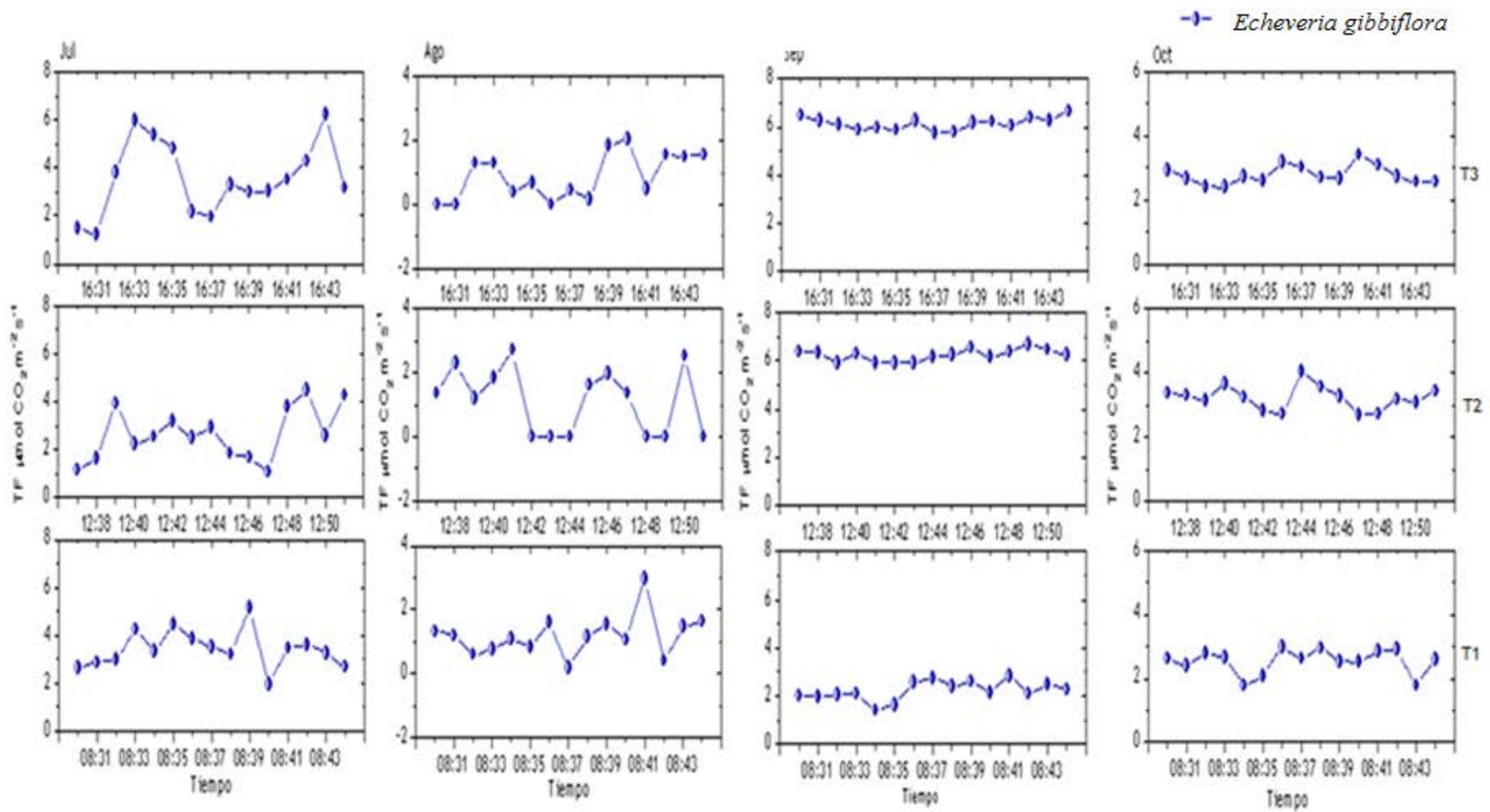


Figura 4.7b Promedio mensual de Tasa fotosintética, temporada de lluvia (*Echeveria gibbiflora*).

4.5 Distribución y dispersión de especies

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos del Coeficiente dispersión (CD), durante ambas temporadas climáticas en los diferentes cuadrantes, indicando que para *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora* el tipo de dispersión fue agregada y aleatoria, en tanto que para la especie *Buddleia cordata*, se hallaron los tres tipos de dispersión.

Tabla 4.3 Coeficiente de dispersión de *Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora* en la REPSA.

<i>Buddleia cordata</i>								
Núcleo	Cuadrante (100m ²)			Σ	x	S	S ² / x	Dispersión
NP	4	4	3	11	3.6	0.5	0.06	Aleatoria
NO	5	6		11	5.5	0.7	0.08	Aleatoria
NSO	4	13		17	8.5	6.3	5.9	Agregada
ZA	4	8		12	6	2.8	1.3	Uniforme
<i>Senecio praecox</i>								
Núcleo	Cuadrante (100m ²)			Σ	x	S	S ² / x	Dispersión
NP	12	7	4	23	7.6	4.0	3.9	Agregada
NO	8	6		14	7	1.4	0.28	Aleatoria
NSO	4	2		6	3	1.4	0.65	Aleatoria
ZA	6	8		14	7	1.4	0.2	Aleatoria
<i>Echeveria gibbiflora</i>								
Núcleo	Cuadrante (100m ²)			Σ	x	S	S ² / x	Dispersión
NP	134	34	21	189	63	61.83	60.6	Aleatoria
NO	126	88		214	107	26.87	6.74	Aleatoria
NSO								
ZA	18	71		89	44.5	37.47	31.5	Aleatoria

4.6 Índices de vegetación y Producción Primaria Bruta

Se realizó el análisis de índice de vegetación de diferencia normalizada (IVDN) de acuerdo con MODIS-NASA en dos sitios de la REPSA, para identificar los cambios de verdor en la vegetación a lo largo del año, utilizando información de las imágenes de resolución moderada del espectro radiómetro conocido como MODIS (por sus siglas en inglés). En el sitio sur-oriente (figura 4.8a), el valor más alto fue de 0.47 durante el mes de agosto y para el sitio poniente (figura 4.8b), los valores del índice estuvieron en un rango de 0.4–0.8, indicando un aumento de verdor y de cobertura vegetal favoreciendo la actividad fotosintética. Durante el mes de julio se presentó el índice más alto que coincide con un mes representativo de la temporada de lluvia. En ambos sitios se observa una tendencia al aumento del IVDN en los meses de lluvia. Debido a la heterogeneidad de diversos microambientes existentes en la reserva, se presentan cambios en la cobertura vegetal de un sitio a otro.

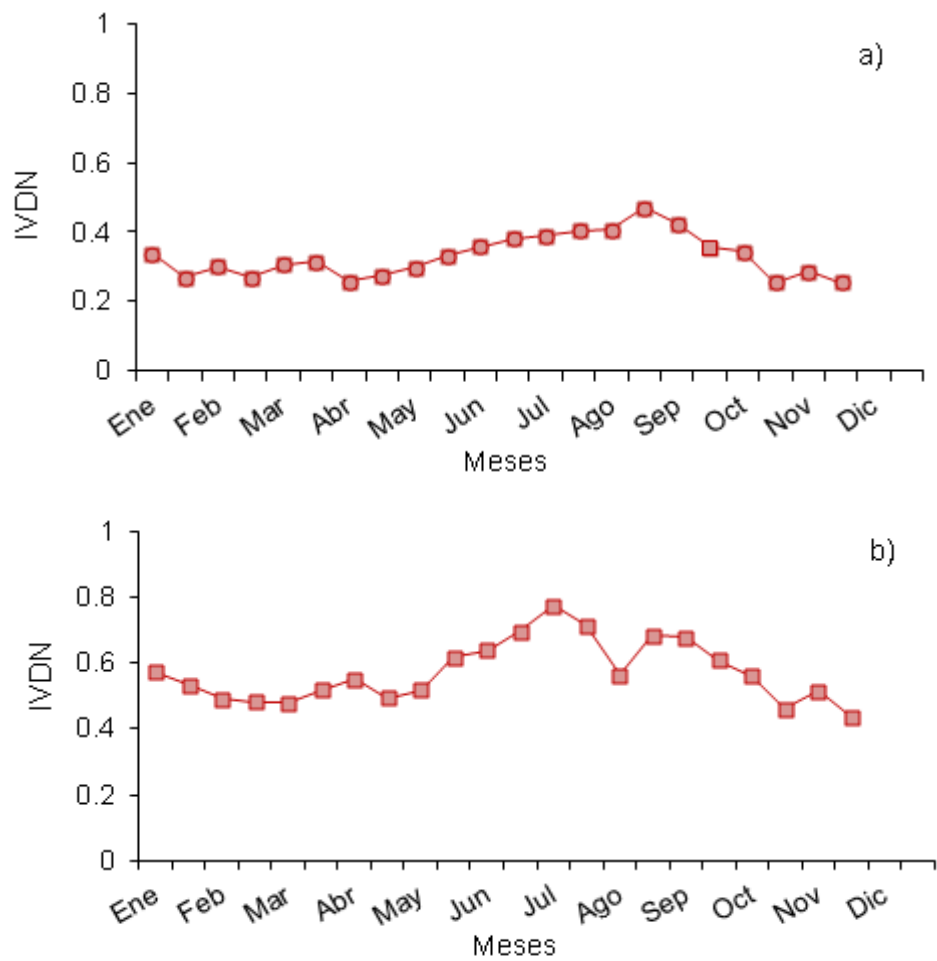


Figura 4.8. Variación anual de IVDN, 2010.

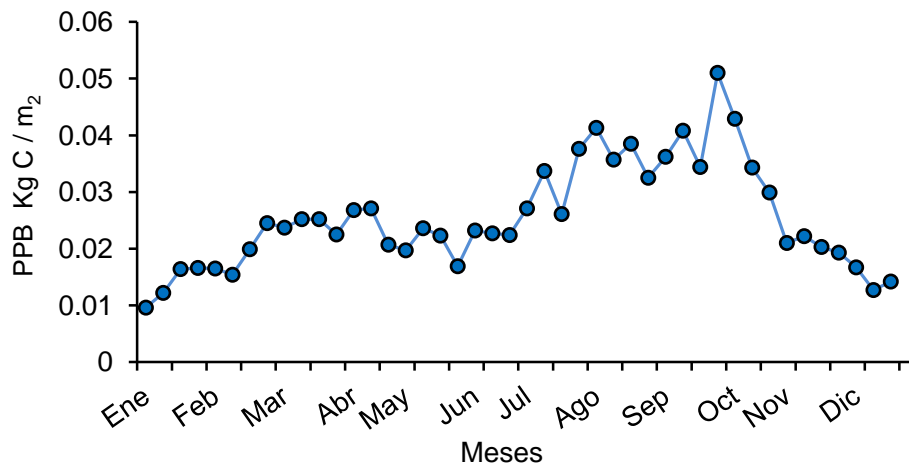


Figura 4.9. Variación anual PPB, 2010.

La Producción Primaria Bruta (PPB) aumentó durante la temporada de lluvia (figura 4.9), en septiembre se observó el valor más grande del ciclo anual con 0.051 KgC m^{-2} , sin embargo en los demás meses de la temporada seca se presentaron valores entre 0 y 0.028 KgC m^{-2} . Los resultados demuestran la relación de la temporada de lluvias y el aumento de la producción primaria. Esta similitud de resultados con los anteriormente mostrados con el IVDN, comprueban que los meses de lluvia favorecen la dinámica de la vegetación de la REPSA. Los resultados obtenidos de PPB en este estudio, difieren con los presentados por Cano-Santana (1994) calculados en $636 \text{ g m}^{-2}\text{año}^{-1}$ y obtenidos para cuatro especies de la reserva que contribuyen con el 52.2% de la producción primaria neta aérea. Probablemente esta diferencia de resultados se deba al método y resolución utilizado para estimar la PPB.

También es importante mencionar que debido a la heterogeneidad presente en la reserva por diferentes de microambientes y su distribución conforman resultados no uniformes.

Estos parches de vegetación propician un efecto de microclima, una radiación menor, temperaturas del aire y suelo más favorables y son condicionadas principalmente por las copas de los árboles y distribución espacial (Moro et al., 1997; Pavón y Briones, 2000; Raddad y Luukkanen, 2006). Por esta razón, su beneficio hidrológico, ecológico y de biodiversidad es importante a micro escala en este tipo de ambientes. Las interacciones entre el suelo-planta y atmósfera están estrechamente relacionados a la estructura o arquitectura de la vegetación (Guevara-Escobar et al., 2005).

4.7 Estimación de CO₂

Los resultados del intercambio de CO₂ (captura y emisión) en la reserva se muestran en la tabla 4.4. El promedio de CO₂ para *Buddleia cordata* y *Senecio praecox* fue de 4.03 y 3.25 kgCO₂ respectivamente. Estas especies presentan valores muy similares en la captura de CO₂ durante las temporadas de seca y de lluvia. En temporada de lluvia se observó una reducción en la captura de dióxido de carbono obteniéndose valores de

1.15 KgCO₂ para *Buddleia cordata* y 0.63 KgCO₂ para *Senecio praecox*. En el caso particular de la especie *Echeveria gibbiflora*, los valores negativos durante los meses de febrero, marzo y abril indican que hay una emisión de CO₂ debido al proceso de fotorrespiración de esta especie, así el promedio fue de -11.44 y 1.22 kgCO₂ en secas y lluvia, respectivamente. En el **anexo d** se detallan los valores del balance de CO₂ estimado por estas especies en la REPSA.

Tabla 4.4 Estimación de flujos de CO₂, promedios mensuales en las tres especies en las temporadas seca y lluviosa.

Temporada seca		Temporada lluviosa			
TF (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Total (kg CO ₂)	TF (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Total (kgCO ₂)		
Nov	6.87	0.87	Jul	7.36	1.41
Feb	22.69	4.35	Ago	5.85	1.12
Mar	27.71	5.31	Sep	5.85	1.12
Abr	29.25	5.61	Oct	4.93	0.95
Promedio	21.63	4.03	Promedio	5.99	1.15
<i>Buddleia cordata</i>					
Nov			Jul	6.72	0.81
Feb			Ago	4.75	0.57
Mar			Sep	5.25	0.63
Abr	26.97	3.25	Oct	4.28	0.52
			Promedio	5.25	0.63
<i>Senecio praecox</i>					
Nov	5.57	2.19	Jul	3.21	1.26
Feb	-57.05	-22.44	Ago	1.17	0.46
Mar	-43.72	-17.19	Sep	5.25	2.06
Abr	-21.16	-8.32	Oct	2.85	1.12
Promedio	-29.09	-11.44	Promedio	3.12	1.22
<i>Echeveria gibbiflora</i>					

La TF y la DFFF para *Buddleia cordata* y *Senecio praecox* mostraron un comportamiento similar para las dos temporadas. Estas especies tuvieron valores más altos en sus tasas fotosintéticas durante la temporada de seca que en la de lluvia,

debido a que los resultados mostraron que en la temporada de seca la radiación solar es mayor que en los meses de seca.

Los resultados muestran la importancia de la radiación solar en el incremento de la tasa fotosintética para estas especies (Larcher, 2003; Marur and Faria, 2006).

La especie *Echeveria gibbiflora* tuvo un comportamiento totalmente diferente, la TF mostró valores negativos en la temporada de seca, indicando respiración y por lo tanto emisión de CO₂ al medio ambiente. Estos resultados están relacionados con el metabolismo ácido de las crasuláceas facultativas, que capturan el CO₂ durante la noche para prevenir la pérdida de agua en el día, disminuyendo la tasa fotosintética. Sin embargo, en la temporada de lluvia presentó actividad de fotosíntesis, capturando bióxido de carbono, probablemente causado por la apertura estomática en periodos cortos del día (Geydan y Melgarejo, 2005; Andrade *et al.*, 2007).

Son pocos los estudios que se han realizado sobre crasuláceas, sin embargo, entre estas investigaciones se encuentra la realizada por Bender (1971), quién reportó un contenido de 18.1 de 13C para *Echeveria gilva*. Otro estudio encontró alcaloides y una pequeña fracción de nicotina en la especie *Echeveria gibbiflora* (Frigot, 1960).

Desde el punto de vista ecológico, el género *Echeveria* se consideran pioneras en el proceso de sucesión ecológica pues son de las primeras plantas en colonizar los espacios originados por disturbios ambientales y/o antropogénicas, ya que son muy eficientes en el aprovechamiento de los recursos. También las crasuláceas contribuyen en las primeras etapas de la formación de suelo, fragmentando la roca, añadiendo materia orgánica y reteniendo el suelo recién formado (Martínez-Avalos, 2009).

La temperatura influye directamente en las actividades de las plantas; temperaturas altas provocan el cierre de los estomas reduciendo el intercambio de gases (CO₂ y O₂), Sin embargo las temperaturas óptimas para la fotosíntesis, de acuerdo con Azcon-Bieto y Talon (2000), son muy similares a las temperaturas diurnas de los

ambientes en los que las plantas crecen, debido no solo al proceso de adaptación genotípica que asegura un ajuste en la temperatura media del hábitat de la especie, sino también a la capacidad de las plantas para aclimatarse a la temperatura del medio, es decir, que las plantas pueden cambiar el régimen térmico necesario para fotosintetizar, promoviendo además actividades fisiológicas que aumentan la tasa de fotosíntesis (Lambers et al., 2008). En este estudio, la temperatura promedio durante la campaña de medición fue de 25 °C, temperatura óptima que favoreció la fotosíntesis de las especies *Buddleia cordata* y *Senecio praecox* en este microambiente.

Los ciclos de fotosíntesis se ven influidos por los cambios estacionales, que aumentan en los primeros meses del año y disminuyen en el otoño, con la pérdida de hojas (Lambers et al., 2008). Sin embargo, las variables ambientales como la temperatura, la densidad del flujo de fotones para la fotosíntesis y la humedad relativa son determinantes para las respuestas de la fotosíntesis. De acuerdo con los resultados, el promedio de humedad relativa fue del 11% durante la temporada seca sugiriendo que los bajos valores de humedad relativa son apropiados para la captura de CO₂ para *Buddleia cordata* y *Senecio praecox*.

El promedio de HR durante la temporada de lluvias fue de 40%, y cuando aumenta la humedad relativa la planta reduce su transpiración, evitando la pérdida de agua. Algunos estudios muestran que en los bosques, las nubes de inmersión favorecen la fotosíntesis (Letts y Mulligan, 2005; Johnson y Smith, 2008), pero en estas especies los días soleados son esenciales. El IVDN mostró que en la reserva la intensidad del verdor es superior a 0.4, este valor es un indicador que sugiere fotosíntesis y la productividad primaria en este lugar.

Los resultados también mostraron una disminución de TF y DFFF durante la temporada de lluvia para las especies *Buddleia cordata* y *Senecio praecox*. Se ha sugerido que las nubes presentes o la inmersión de nubes, en esta temporada afectan a

los procesos de la fotosíntesis. También se observó que el microambiente y las variables fisiológicas de estas especies son importantes en su respuesta a la fotosíntesis. La contribución de la reserva de acuerdo a las estimaciones, permite conocer la captura de CO₂ ara estas dos especies durante las estaciones de lluvia y seca que fueron 3.86 y 3.03 Kg de CO₂, respectivamente.

4.8 CO₂ en aire y suelo

En la tabla 4.5 se presentan los promedios mensuales en la concentración de CO₂ del aire para ambas temporadas climáticas. Los valores máximos se presentaron en los meses de julio y agosto, estos resultados sugieren que debido a la altura de la medición se debe a la influencia de respiración del suelo en el sitio de muestreo. Y durante el mes de febrero se obtuvieron los promedios de concentración más bajos del año con 252 ppm.

En la tabla 4.6 se presentan los resultados en suelo, observándose un aumento en del CO₂ durante la época de lluvia. Como se mencionó anteriormente el tipo de suelo que existe en la reserva es basáltico y poroso, con una pobre cobertura vegetal. Como descripción del sitio de muestreo se observó una ligera capa de pasto verde que creció en esta temporada. Sin embargo se presume que los resultados obtenidos de la respiración se debe a microorganismos que hay en el suelo.

La respiración del suelo constituye la principal vía en la que el carbono del ecosistema interactúa con la atmósfera y puede influir fuertemente en la absorción neta de carbono de la atmósfera o en la producción neta de los ecosistemas, considerándose el balance entre la fotosíntesis y la respiración del ecosistema (Ryan y Law, 2005).

Estos resultados concuerdan con algunos estudios en los que se menciona que en ecosistemas áridos y semiáridos caracterizados por una marcada heterogeneidad espacial, sus dinámicas funcionales son peculiarmente controladas por la disponibilidad de agua en forma de pulsos (Loik et al., 2004). En estos ecosistemas, la

respiración del suelo es un flujo muy dinámico que puede alcanzar tasas altas justo después de eventos de lluvia o ser crónicamente bajos durante periodos secos (Huxman et al., 2004).

Tabla 4.5. Concentración promedio de CO₂ del aire

Temporada de seca	CO ₂ (ppm)	Temporada de lluvia	CO ₂ (ppm)
Nov	398	Jul	405
Feb	252	Ago	402
Mar	345	Sep	376
Abr	341	Oct	345

Tabla 4.6. Concentración promedio de CO₂ en suelo

Temporada de seca	CO ₂ (ppm)	Temporada de lluvia	CO ₂ (ppm)
Nov	1.20	Jul	2.2
Feb	0.12	Ago	2.0
Mar	1.15	Sep	2.41
Abr	1.32	Oct	1.56

5. CONCLUSIONES

En año 2010 se realizó una campaña de muestreo durante 8 meses en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), en donde se estudiaron tres especies endémicas y representativas del ecosistema xerófilo durante las temporadas de seca y de lluvia. Esta investigación cumplió con el objetivo planteado de conocer el intercambio de CO₂ a través del proceso de fotosíntesis. Los resultados presentados en este trabajo muestran la importancia de la vegetación en los ciclos biogeoquímicos, y en este caso su contribución al ciclo del carbono.

La investigación indica que durante la temporada de seca, la tasa fotosintética de las especies *Buddleia cordata* y *Senecio praecox* fue mayor que en lluvias, además de presentar un comportamiento y características muy similares en el intercambio de flujo de CO₂. Sin embargo, la especie *Echeveria gibbiflora* debido a su particular metabolismo mostró un comportamiento totalmente diferente en ambas estaciones. Para no sobreestimar los resultados y para una mejor comprensión de intercambio de CO₂ en la reserva se recomienda realizar mediciones nocturnas o en las plantas que posiblemente son CAM facultativas realizar estudios de acidez titulable y discriminación de isótopos de ¹³C. Tal y como sugieren algunas investigaciones para obtener el intercambio de gases total de las especies CAM se necesita medir ciclos de 24 horas con diseños de cámaras especiales para medir la asimilación total de esta planta, (Graham y Andrade, 2004; Cervera et al., 2007).

En cuanto a las variables ambientales se comprobó la influencia de la temperatura y la densidad del flujo fotosintético de fotones en la respuesta de la fotosíntesis de las especies estudiadas.

De acuerdo al análisis de coeficiente de dispersión, se determinó la distribución espacial de *Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora* comprobándose la diversidad de microambientes en la REPSA y su importancia para el mantenimiento de la variedad de

especies vegetales en este ecosistema. Estos resultados también están relacionados con la presencia de especies indicadoras asociadas a condiciones micro climáticas que representan el mayor componente dentro del sistema.

Se confirma la importancia de los parches de vegetación en la REPSA, ayudando a regular el funcionamiento hidrológico de ambientes semiáridos que están estrechamente ligados con la cantidad de cobertura y planta, así como las características del suelo, y la variabilidad en el sistema *suelo - planta - atmósfera*.

Se mostró la relación de la temporada de lluvia con el incremento en la densidad de población, área foliar y los índices de vegetación. En general la cobertura vegetal de la reserva, a pesar de no ser muy abundante, presenta un cambio bien definido y visible durante los meses de lluvia. Referente al análisis de la PPB también mostró un aumento durante estos meses y un comportamiento similar con los índices de vegetación.

La metodología utilizada en esta investigación sugiere realizar más mediciones de forma continua a lo largo del día para obtener más datos. De acuerdo al análisis realizado en este trabajo las variables ambientales juegan un papel importante en el aumento y disminución de la tasa fotosintética.

Este estudio indica una posible perturbación de CO₂ atmosférico debido a la emisión de fuentes naturales principalmente por la respiración de algunas especies que habitan en la reserva. Se sabe también que algunas especies vegetales en situación de estrés hídrico o debido a concentraciones altas de dióxido de carbono pueden emitir también concentraciones mayores de dióxido de carbono, sin embargo se requieren más estudios al respecto para comprobar estos procesos.

Es importante mencionar que para las mediciones de CO₂ atmosférico se recomienda hacer un monitoreo de forma diaria. La REPSA se encuentra rodeada de diferentes fuentes antropogénicas y naturales que pueden sobrestimar los resultados, se recomienda utilizar otro tipo de metodología como torres de covarianza de torbellinos (Eddy covariance).

El análisis de suelo confirmó que en la reserva predomina el suelo nuevo, en el que la profundidad es poca y los nutrientes como fósforo y nitrógeno son mínimos o quizás escasos al igual que la materia orgánica, debido a esto la actividad microbiana del suelo es baja.

La reserva es un ecosistema dinámico que permite realizar diversos estudios para comprender la importancia de la interacción suelo-planta y atmósfera, por lo cual preservarla es vital.

Los resultados presentados en este trabajo constituyen una primera aproximación del intercambio de CO_2 en un ecosistema urbano. Para un trabajo futuro estos resultados pueden utilizarse en modelos que evalúen ecosistemas para actualizar y validar los datos. Finalmente con los resultados presentados en este trabajo, se desea resaltar la importancia de la integración del sistema atmósfera-planta-suelo, como un conjunto de factores que influyen en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos y no como sistemas aislados.

6. Referencias

- Akbari, H.(2002).Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental pollution*, 116, S119 – S126.
- Alberts Buce., Bray D., Hopkin K., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K. y Walter P.(2010). *Essential Cell Biology*, Third edition, Garland Science, Taylor &Francis Group.
- Aguiar M.R. y Sala O.E.(1999).Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Tree* 14(7):273-277.
- Aguiar M.R. y Sala O.E.(1994). Competition, facilitation, seed distribution, and the origin of patches in a Patagonian steppe. *Oikos* 70:26-34.
- Andrade J.L., de la Barrera E., Reyes-García C., Ricalde M.F., Vargas-Soto G., Cervera J.C., (2007). El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 81, 37-50.
- Antonio L. y Cano-Santana Z.(2009). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Azcon- Bieto J. y Talón M. (2000). *Fundamentos de fisiología vegetal*, Mc. Graw-Hill, Barcelona, España 247 – 261.
- Baird C. (2001). *Química Ambiental*, Reverté S.A., Barcelona ,España.
- Baldocchi D., Falge E., Gu L.H., Olson R., Hollinger D, Running S., Anthoni P., Bernhofer C., Davis K., Evans R., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B., Lee X.H., Malhi Y., Meyers T., Munger W., Oechel W.,Paw K.T, Pilegaard K., Schmid H.P., Valentini R.,Verma S.,Vesala T,. Wilson y Wofsy S. (2001).FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial K variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *B. Am. Meteorol. Soc.* 82, 2415-2434.
- Bender M.M. (1971).Variations in the ¹³C/¹²C ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbón dioxide fixation.*Phytochemistry*.10:1239-1244.

- Bisigato, A.J., Villagra, P.E., Ares, J.O y Rossi, B.E.(2009). Vegetation heterogeneity in Monte Desert ecosystems: A multi-scale approach linking patterns and processes. *Journal of arid environments* 73:182-191.
- Carrillo-Reyes P., Sosa V. y Mort M.E., (2009). Molecular phylogeny of the Acre clade (Crassulaceae): Dealing with the lack of definitions for *Echeveria* and *Sedum*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 53, 267-276.
- Castillo-Argüero S., Martínez Orea Y., Romero Romero M.A., Guadarrama Chávez P., Núñez Castillo O., Sánchez Guillén I. y Meave J.A. (2007). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, aspectos florísticos y ecológicos. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria, México.
- Chávez C. y Ceballos G. (2009). Implications for conservation of the species diversity and population dynamics of small mammals in an isolated reserve in Mexico City. *Natural Areas Journal* 29 (1), 27-41.
- Cano-Santana Z., Pisanty I., Segura S., Mendoza-Hernández P.E., León-Rico R, Soberón J., Tovar E., Martínez-Romero E., Ruiz L.C. y Martínez-Ballesté A. (2006). Ecología, conservación, restauración y manejo de las áreas naturales y protegidas del Pedregal del Xitle. In: Oyama K and Castillo A (Eds.). *Manejo, Conservación y Restauración de Recursos Naturales en México, UNAM y Siglo XXI*, México.
- Cano-Santana, Z. (1994). La Reserva del Pedregal como ecosistema: estructura trófica. En: A. Rojo (Comp.) *Reserva Ecológica “El Pedregal de San Ángel”, ecología, historia natural y manejo*. UNAM, D.F. México.
- Caylor, K.K.y Shugart H.H.(2006). Pattern and process in savanna ecosystems. Chapter 15. P.D’Odorico and A. Porporato (eds.), *Dryland Ecohydrology*,259-281.Springer.Printed in the Netherlands.
- Cervera J.C., Andrade J.L., Graham E.A., Durán R., Jackson P.C. y Simá J.L. (2007). Photosynthesis and optimal light microhabitats for a rare cactus, *Mammillaria gaumeri*, in two tropical ecosystems. *Biotropica* 39:620-627.

- Cueva-Rodríguez A., Yépez E.A., Garatuza-Payán, J., Watts, C.J. y Rodríguez J.C.(2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, vol. 30, núm. 4, 2012.Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Delegido, J., V. Caselles y E. Hurtado.(1991). Determinación a escala regional de la evapotranspiración. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. *Recursos renovables: Agricultura*. (Gandía S. y Meliá J., Eds.). Valencia, Universidad Politécnica: 345-370.
- D'Odorico, P. y Porporato A.(2006). Ecohydrology of arid and semiarid ecosystems: an introduction. P.D`Odorico and A. Porporato(eds.), *Dryland Ecohydrology*, 1-10 p. Springer.Printed in the Netherlands.
- Ernst-Detlef S., Beck E. y Muller-Hohenstein K. (2005).*Plant Ecology*. Springer, Berlín. ISBN 3-540-20833-X; S. 137
- FAO (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 2010 11-45. ISBN 978-92-5-306654-4.
- Facelli J.M. y Temby A.M. (2002). Multiple effects of shrubs on annual plant communities in arid lands of South Australia.*Austral ecology* 27:422-432.
- Frigot P. (1960).Contribution á l'étude chimique de quelques Crassulacées et en particulier de divers Sedum.Thesis.Paris.
- Geydan T.D. y Melgarejo L.M. (2005). Metabolismo acido de las crasuláceas. *Acta Biológica Colombiana* 10, 3-15
- Graham E.A. y Andrade J.L. (2004). Drought tolerance associated with vertical stratification of two co-occurring epiphytic bromeliads in a tropical dry forest. *American Journal of Botany* 91:699-706.
- Guevara-Escobar, A., Tellez, J. y González-Sosa, E.(2005). Use of digital photography for analysis of canopy closure.*Agroforestry systems* 65:175-185.
- Hanson P.J, Edwards N.T, Garten C.T. y Andrews J.A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115–146.

- Harnos N., Nagy Z., Balogh J. y Tuba Z. (2006). Modeling net photosynthetic rate of temperate dry grassland species and winter wheat at elevated air CO₂ concentration. *Applied Ecology and Environmental Research* 4 (2), 47-53.
- Huxman T.E., Snyder K.A., Tissue D. et al., (2004). Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 141, 254–268.
- Henry J.G. y Heinke G.W.(1999). *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 2da. Edición., México.
- Hopkins W.G. y Hüner N.P.A. (2004). *Introduction to Plant and Physiology*. John Wiley & Sons, Inc., Ontario, Canada.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change. J.T Houghton, Y.Ding, D.J.Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden and D.Xiaosu [Eds.] Cambridge University Press, UK:2001.
- IPCC (2007): *Summary for Policymakers*. In: *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- INE (2010). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (IV)*, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Jáuregui O.E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Johnson D.M. y Smith W.K. (2008). Cloud immersion alters microclimate, photosynthesis and water relations in *Rhododendrom catawbiense* and *Abies fraseri* seedlings in the southern Appalachian Mountains, USA. *Journal of Experimental Botany* 47, 639-645
- Kim S.H. y Lieth J.H. (2003). A coupled model of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration for a rose leaf (*Rosa hybrida* L). *Annals of Botany* 91, 771-781. doi:10.1093/aob/mcg080

- Kitao M., Lei T.T., Koike T., Kayama M., Tobita H. y Maruyama Y.,(2007). Interaction of drought and elevated CO₂ concentration on photosynthetic down regulation and susceptibility to photo inhibition in japanese white birch seedlings grown with limited N availability. *Tree Physiology* 27, 727-735.
- Kordowski K.y Kuttler W. (2010). Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, 44, 2722-2730.
- Lambers H. y Chapin III F.S. y Pons T.L (2008) *Plant Physiological Ecology*. Springer, New York .
- Larcher W.(2003). *Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Springer, Berlin.
- Letts M. G. y Mulligan M.(2005). The impact of light quality and leaf wetness on photosynthesis in the north-west Andean tropical, montane cloud forest. *J.Trop. Ecol*, 21:549-557.
- Loik M. E., Breshears D. D., Lauenroth W. K. y Belnap J.(2004). A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia* 141: 269-281.
- Long S.P.y Bernacchi C.J. (2003). Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. *Journal of Experimental Botany* 54(392), 2393-2401. doi:0.1093/jxb/erg262.
- Lot A. y Cano-Santana Z. (2009). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lüttge U. (1987): Carbon dioxide and water demand: Crassulacean acid metabolism (CAM), a versatile ecological adaptation exemplifying the need for integration in ecophysiological work. In: *New Phytologist* 106(4); 593–629;
- Marur C.J. y Faria R.T.(2006). Photosynthesis of individual leaves in a coffee plant. *Acta Scientiarum – Agronomy* 28(3), 331-335.
- Martínez-Avalos, et al.2009.Germinación de *Sedum oxypetalum* H.B.K. (Crassulaceae) en ambientes contrastantes del Ajusco medio, D.F.Tesis de Licenciatura.Facultad de Ciencias UNAM.

- Myers D.A., Thomas R.B. y DeLucia E.H.(1999). Photosynthetic responses of loblolly pine (*Pinus taeda*) needles to experimental reduction in sink demand. *Tree Physiology* 19, 235-242
- NOAA (2014). Annual Data Atmospheric CO₂ Concentration. Mauna Loa CO₂ Data IOP Publishing: PhysicsWeb.<http://co2now.org/Know-CO2/CO2-Monitoring/mauna-loa-co2.html>. Accessed 5 September 2012.
- NOAA(2016). Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division., Trends in in Atmospheric Carbon Dioxide. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- Nobel P.S. (1988). *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press, Nueva York.
- Nobel Park S.(2009). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, Academic Press, California, 245 and 272.
- Ocampo-Acosta G. (2004). Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Vol 39, Buddlejaceae, México.
- Odum E.P y Barret G.W.(2006). *Fundamentos de Ecología*. CENGAGE Learning Editores, S.A. de C.V.
- Okimoto Y., Nose A., Katsuta Y., Tateda Y., Agarie S. y Ikeda K. (2007). Gas exchange analysis for estimating net CO₂ fixation capacity of mangrove (*Rhizophora stylosa*) forest in the mouth of river Fukido, Ishigaki Island, Japan. *Plant Production Science* 10 (3), 303-313.
- Pavón N.P. y Briones O.(2000). Root distribution, standing crop biomass and belowground productivity in a semidesert in Mexico. *Plant ecology* 146:131-136.
- Pérez-Calix E.(2008). Flora del Bajío y regiones adyacentes. Instituto de Ecología, Centro regional del Bajío. Vol 156, Crassulaceae, México.
- Pimienta-Barrios E.(2003). *Ecofisiología de la fotosíntesis: temas selectos en ecología y fisiología vegetal*. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

- Raddad E. A. Y. y Luukkanen O.(2006). Adaptive genetic variation in water-use efficiency and gum yield in *Acacia Senegal* provenances grown on clay soil in the Blue Nile region, Sudan. *Forest ecology and management* 226:219-229.
- Rango A., Tartowski S.L., Laliberte A., Wainwright, J. y Parsons A. (2006). Islands of hydrologically enhanced biotic productivity in natural and managed arid ecosystems *Journal of Arid Environments* 65,235-252.
- Reyes-Agüero J.A., Aguirre J.R. y Valiente-Banuet A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *Journal of arid environments* 64:549-585.
- Rosell J.A. y Olson M.E.(2007). Testing implicit assumptions regarding the age vs. size dependence of stem biomechanics using *Pittocaulon (Senecio) praecox* (Asteraceae). *American Journal of Botany* 94(2), 161-172.
- Ryan M.G. y Law B.E.(2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73, 3–27.
- Running S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao M., Reeves M. y Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary productivity: Future science and applications. *Bioscience*, 56 (6), 547 – 560.
- Rzedowski J.(1954). Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). *Anales Escuela Nacional Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional* 8 59-129. *Nacional* 8 59-129.
- Sadava D.E., Craig Heller H., Orians Gordon H., Purves W.K. y Hillis David M.(2003) *Life: The Science of Biology*, 7th Edition, by Sinauer Associates, W.H. Freeman and Company.
- Salas J.D.(2000). Hidrología de las zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del agua* 7(4):409-429.
- Seinfeld, J.H. y Pandis S.N.(2006). *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*. Wiley & Sons, New York.
- Sharkey T.D., Bernacchi C.J., Farquhar G.D. y Singsaas E.L.(2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant, Cell and Environment* 30, 1035-1040.

- Schultz R.H.(2003). Extension of a Farquhar model for limitations of leaf photosynthesis induced by light environment, phenology and leaf age in grapevines (*Vitis vinifera* L. cvv. White Riesling and Zinfandel). *Functional Plant Biology* 30, 673-687.
- Smith T.M. y Smith R. L.(2007) .*Ecología*. Sexta edición. PEARSON EDUCACION, S.A, Madrid
- Stevens, J.F., Hart T.H., Van Ham Roeland C.H.J., Elema E.T., Van Den Ent Maya M.V.X., Wildeboer M. y Zwaving J.H.(1995). Distribution of Alkaloids and Tannins in the Crassulaceae. *Biochemical Systematics and Ecology* 23:157-165
- Taiz L. y Zeigel E.(2006). *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Sunderland.
- Vásquez-Méndez R., Ventura-Ramos E., Olesckkho K., Sandoval-Hernández L., Parrot J.F. y Nearing M.(2010). Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena* 80, 162-169.
- Velasco E., Roth M., Tan S.H., Quak M., Nabarro S.D.A.y Norford L.(2013). The role of vegetation in the CO₂ flux from a tropical urban neighborhood. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 7267–7310.
- Winter, K. y Smith J.A.C. (1996) An introduction to crassulacean acid metabolism:Biochemical principles and biological diversity. En: Winter, K. y J.A.C. Smith, (eds).*Crassulacean Acid Metabolism. Biochemistry, Ecophysiology and Evolution*. Springer-Verlag, Germany.
- Xu L. y Baldocchi D.D. (2003). Seasonal trends in photosynthetic parameters and stomatal conductance of blue oak (*Quercus douglasii*) under prolonged summer drought and high temperature. *Tree Physiology*, 23, 865-877
- Yang J., McBride J., Zhou J. y Sun Z.(2005).The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3, 65-78.
- Zhao M., Heinsch F.A., Nemani R. R. y Running S. W.(2005).Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote sensing of environment*, 95, 164-176.

7. ANEXOS

Anexo A. Resultados del error estándar de las medias de TF, T, HR y DFFF de (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*), en las temporadas secas y lluviosas.

	TF ($\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	HR (%)	DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
<i>Buddleia cordata</i>				
	seca			
Feb	22.69 \pm 1.46	22.48 \pm 1.24	10.24 \pm 1.33	811.21 \pm 430
Mar	27.71 \pm 1.13	26.24 \pm 2.35	10.83 \pm 1.09	849.78 \pm 419
Abr	29.25 \pm 2.22	29.11 \pm 2.21	12.24 \pm 4.09	971.74 \pm 450
Nov	6.87 \pm 1.68	18.36 \pm 1.80	11.81 \pm 1.56	368.19 \pm 278
	lluvia			
Jul	7.36 \pm 2.52	25.29 \pm 1.43	43.46 \pm 5.41	577.28 \pm 251
Ago	5.85 \pm 1.05	24.64 \pm 2.37	39.21 \pm 6.22	432.65 \pm 206
Sep	5.85 \pm 1.43	23.49 \pm 2.34	30.61 \pm 8.51	385.98 \pm 275
Oct	4.93 \pm 0.63	22.78 \pm 2.40	21.34 \pm 4.46	358.45 \pm 270
<i>Senecio praecox</i>				
	seca			
Feb				
Mar				
Abr	26.97 \pm 2.03	27.51 \pm 2.36	11.51 \pm 4.19	823.14 \pm 455.69
Nov				
	lluvia			
Jul	6.72 \pm 2.62	23.96 \pm 1.78	34.95 \pm 2.23	386.84 \pm 234.66
Ago	4.75 \pm 1.51	22.84 \pm 2.18	34.66 \pm 3.46	389.86 \pm 223.99
Sep	5.25 \pm 2.37	22.73 \pm 1.89	29.29 \pm 6.51	367.84 \pm 233.95
Oct	4.28 \pm 1.02	21.84 \pm 2.07	19.15 \pm 1.96	358.23 \pm 231.25
<i>Echeveria gibbiflora</i>				
	seca			
Feb	-57.05 \pm 18.75	20.53 \pm 2.04	13.77 \pm 5.50	567.86 \pm 377.22
Mar	-43.72 \pm 20.27	20.54 \pm 1.84	10.64 \pm 7.40	701.24 \pm 309.74
Abr	-21.16 \pm 15.37	25.53 \pm 1.26	10.03 \pm 3.60	753.90 \pm 312.17
Nov	5.57 \pm 0.82	20.55 \pm 1.52	9.62 \pm 1.28	334.66 \pm 226.18
	lluvia			
Jul	3.21 \pm 0.49	23.38 \pm 1.03	31.23 \pm 3.54	312.11 \pm 182.25
Ago	1.17 \pm 0.08	22.83 \pm 1.08	27.05 \pm 4.99	373.06 \pm 228.70
Sep	5.15 \pm 2.54	22.54 \pm 1.25	23.12 \pm 4.23	331.67 \pm 181.44
Oct	2.85 \pm 0.35	21.99 \pm 1.63	16.39 \pm 0.18	329.24 \pm 225.57

Anexo B : Resultados de tasa fotosintética promedio de las especies (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*) en las temporadas secas y lluviosas.

Especies	Temporada de Seca ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Temporada de lluvia ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
<i>Buddleia cordata</i>	21.63 \pm 1.40	5.99 \pm 1.09
<i>Senecio praecox</i>	26.97 \pm 0.97	5.25 \pm 1.01
<i>Echeveria gibbiflora</i>	-29.09 \pm 1.82	3.07 \pm 1.20
<i>Promedio</i>	6.50 \pm 1.39	4.78 \pm 1.1

Anexo C: Resultados de los máximos y mínimos de tasa fotosintética promedio mensual en los tres horarios (T1,T2 y T3) en (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*) en las temporadas secas y lluviosas.

<i>Buddleia cordata</i>							
Seca	Horario	Max	Min	Lluvia	Horario	Max	Min
Feb	T1	22.64	22.08	Jul	T1	6.66	5.26
	T2	24.78	23.88		T2	11.60	8.59
	T3	21.58	21.34		T3	7.53	4.82
Mar	T1	27.53	26.90	Ago	T1	5.26	4.04
	T2	29.18	28.62		T2	7.51	5.93
	T3	27.58	27.04		T3	7.15	7.48
Abr	T1	28.81	27.27	Sep	T1	5.78	3.04
	T2	32.08	31.02		T2	8.49	5.24
	T3	28.47	27.51		T3	7.31	6.21
Nov	T1	5.90	4.96	Oct	T1	4.90	3.99
	T2	9.10	8.27		T2	5.89	5.40
	T3	6.78	5.71		T3	5.21	4.57

<i>Senecio praecox</i>							
Seca	Horario	Max	Min	Lluvia	Horario	Max	Min
Feb	T1			Jul	T1	6.05	4.72
	T2				T2	10.10	9.11
	T3				T3	5.62	4.41
Mar	T1			Ago	T1	4.10	2.48
	T2				T2	11.00	12.10
	T3				T3	6.11	3.02
Abr	T1	26.50	25.30	Sep	T1	4.21	0.17
	T2	29.80	28.90		T2	12.10	2.40
	T3	26.90	25.10		T3	6.11	3.02
Nov	T1			Oct	T1	4.10	0.10
	T2				T2	11.08	2.20
	T3				T3	5.20	2.45

<i>Echeveria gibbiflora</i>							
Seca	Horario	Max	Min	Lluvia	Horario	Max	Min
Feb	T1	-59.12	-92.80	Jul	T1	5.17	1.96
	T2	-43.60	-60.10		T2	4.47	1.07
	T3	-33.50	-47.50		T3	6.21	2.02
Mar	T1	-61.30	-67.10	Ago	T1	2.97	0.18
	T2	-36.80	-55.20		T2	2.71	0
	T3	-16.80	-31.60		T3	2.02	0
Abr	T1	-19.40	-30.80	Sep	T1	2.84	1.40
	T2	-30.30	-33.10		T2	6.67	5.89
	T3	0	-8.80		T3	6.66	5.74
Nov	T1	5.46	4.16	Oct	T1	2.98	1.78
	T2	6.54	5.90		T2	5.44	2.72
	T3	6.37	5.38		T3	3.43	2.40

Anexo D: Resultados del balance de CO₂ obtenido por las especies (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*) en las temporadas de secas y lluviosas.

Especies	Temporada de Seca (KgCO ₂)	Temporada de lluvia (Kg CO ₂)
<i>Buddleia cordata</i>	16.14	4.6
<i>Senecio praecox</i>	3.25	2.53
<i>Echeveria gibbiflora</i>	-45.76	4.9
Balance de CO ₂	-26.37	12.03

Estos resultados se obtuvieron del la suma total de CO₂ estimado de cada mes, tanto en la Temporada de seca, como en la de lluvia.

Estimated carbon dioxide exchange for three native species in an ecological reserve of Mexico City

ERIKA SÁNCHEZ-LEÓN, TELMA CASTRO, ÓSCAR PERALTA, HARRY ÁLVAREZ-OSPINA,
MARÍA DE LA LUZ ESPINOSA and AMPARO MARTÍNEZ-ARROYO

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

Corresponding author: Erika Sánchez-León; email: erikas@atmosfera.unam.mx

Received: December 10, 2015; accepted: May 11, 2016

RESUMEN

Se estimó la captura y emisión de CO₂ de tres especies (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* y *Echeveria gibbiflora*) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. El muestreo se realizó durante los meses de febrero, marzo, abril y noviembre (temporada seca) y de julio a octubre (temporada de lluvias) en 2010. En la temporada seca *B. cordata* y *S. praecox* capturaron 16.14 y 3.25 kg de CO₂, respectivamente, en tanto que *E. gibbiflora* emitió 45.76 kg de CO₂. En la temporada de lluvias el intercambio de CO₂ fue diferente para las tres especies. La tasa de fotosíntesis durante la temporada seca y de lluvias fue respectivamente de 22 y 6 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ para *B. cordata*, 27 y 5.25 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ para *S. praecox*, y 29 y 3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ para *E. gibbiflora*. Adicionalmente, se estimó el índice de vegetación de diferencia normalizada con datos de MODIS. Los resultados indican que la intensidad del verdor en el sitio aumentó durante los meses de lluvia. En este trabajo se explica la contribución de dichas plantas al ciclo de carbono en un ecosistema ubicado dentro de una zona urbana, así como la relación de variables ambientales como temperatura, densidad del flujo fotosintético de fotones y humedad relativa en la captura o emisión de CO₂. Este trabajo proporciona información sobre la dinámica del ciclo del carbono en ecosistemas urbanos, lo cual puede ser útil para estudios futuros sobre la mitigación del cambio climático.

ABSTRACT

Capture and emission of carbon dioxide of three species (*Buddleia cordata*, *Senecio praecox* and *Echeveria gibbiflora*) in the Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (Ecological Reserve of the Pedregal de San Ángel), were estimated. CO₂ sampling was carried out in 2010 during the dry (February, March, April and November) and rainy seasons (July to October). On the dry season *B. cordata* and *S. praecox* captured 16.14 and 3.25 kg CO₂, respectively, whereas *E. gibbiflora* emitted 45.76 kg CO₂. In the rainy season the exchange of CO₂ was different for the three species. In the dry season, the photosynthetic rate was 22 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ for *B. cordata*, 27 μmolCO₂ m⁻² s⁻¹ for *S. praecox* and 29 μmolCO₂ m⁻² s⁻¹ for *E. gibbiflora*. In the rainy season they were 6, 5.25 and 3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectively. In addition, MODIS data were used to estimate the normalized difference vegetation index (NDVI), indicating that the intensity of greenery at the site increased during the rainy months. This paper explains the contribution of studied plants to the carbon cycle of an ecosystem located within an urban area, and the relationship of environmental variables such as temperature, density photosynthetic photon flux and relative humidity in the capture or emission of CO₂. This work provides valuable information about the carbon cycle dynamics on urban ecosystems, which can be useful in future studies for climate change mitigation.

Keywords: Photosynthesis, *Buddleia cordata*, *Senecio praecox*, *Echeveria gibbiflora*, capture and emission CO₂, Mexico City.

1. Introduction

The global warming phenomenon, which is caused by emissions of greenhouse gases (GHGs) that contribute to an increase in earth surface temperature, is presented nowadays as a problem for the development of life on earth. Carbon dioxide (CO₂) is one of the gases that most favors the heating process, and its concentration has increased in recent years mainly due to anthropogenic activities, going from 280 ppm in pre-industrial times to 398.72 ppm in 2014 (IPCC, 2007; NOAA, 2014). According to the national inventory of GHGs of Mexico, the total CO₂ emissions were 493.45 Mt in 2010, contributing with 65.9% to the total inventory and having an increase of 23.6 % compared to 1990 (INE, 2010).

There are various carbon sinks in the world that have been associated to an important contribution of forests, which are responsible for 60% of the net sequestration of carbon dioxide (Nobel, 2009). It is estimated that the world's forests capture over 650 Mt of carbon, which helps to mitigate climate change and preserve biodiversity (FAO, 2010). However, not only forests sequester CO₂; it has been shown in several studies that the presence of trees in urban areas favors the reduction of some air pollutants and contributes to carbon sequestration (Yang *et al.*, 2005; Kordowski and Kuttler, 2010; Velasco *et al.*, 2013). There are several techniques for estimating carbon sequestration; one of them is through the use of technologies such as satellite imagery from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), whose purpose is to model carbon and water cycles globally. Furthermore, MODIS allows measuring ecosystem's primary productivity, vegetation indices and other environmental variables (Zhao *et al.*, 2005).

The captured carbon is also estimated using different models, which evaluate photosynthetic and environmental parameters (Kim and Lieth, 2003; Schultz 2003; Xu and Baldocchi, 2003; Sharkey *et al.*, 2007), whereas others evaluate the carbon balance between plants and the atmosphere (Harnos *et al.*, 2006). Several experimental studies of photosynthesis use CO₂ analyzers and measurements in situ (Myers *et al.*, 1999; Long and Bernacchi, 2003; Kitao *et al.*, 2007). However, few studies have evaluated the importance of individual species concerning their contribution to CO₂ capture and emission in the environment. This information

provides knowledge over the role of vegetation. Urban forests can contribute significantly to the reduction of air pollution by relieving the intensity of the heat island (Yang *et al.*, 2005). Velasco *et al.* (2013) mentioned that vegetation in an urban area contributes to the capture of CO₂ during the day and promotes local air cooling due to transpiration, serving as an alternative mitigation for climate change.

In this study our objective was to estimate CO₂ capture and emission through the photosynthetic rate of three endemic plants (*E. gibbiflora*, *B. cordata*, and *S. praecox*) and the relationship between temperature (T), density photosynthetic photon flux (DPPF), and relative humidity (RH) in dry and rainy seasons at the Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (Ecological Reserve of the Pedregal de San Ángel, REPSA); we also estimated the contribution to the carbon cycle to understand the role of urban plant ecosystems in climate change mitigation. This site was chosen because it is one of the few protected natural reserves located in a megacity; moreover, it is of great value for the conservation of biodiversity and it provides environmental services to the south of the metropolitan area of Mexico City. It also has a special ecosystem, a xerophilus shrubland settled into a basaltic substrate whose soils are scarce and shallow (Rzedowski, 1954), which is the reason why this work is focused on the aboveground biomass. The carbon cycle in vegetation starts with CO₂ fixation mainly in the photosynthetic processes in which the plants absorb CO₂ from the atmosphere to produce oxygen and carbohydrates through solar radiation. We hypothesized that different climatic conditions produce significant changes regarding the carbon balance during the dry and rainy seasons.

2. Experimental

2.1 Sampling site description

This study was conducted in the REPSA, located southeast of Mexico City (19° 17' N, 99° 11' W). It covers an area of approximately 273 hectares and its nominal elevation is 2329 masl. The vegetation consists of xerophilous shrubs and dominant life forms are herbs and shrubs (Castillo-Argüero *et al.*, 2007; Chávez and Ceballos, 2009). According to Jáuregui (2000) the climate has dry and rainy seasons. The dry season runs from November to May and the rainy

season from June to October. The average annual precipitation is 803 mm and mean annual temperature is 15.6 °C.

Figure 1 shows monthly average temperature and precipitation for 2010, obtained from a weather station near the sampling point. The highest temperature during that year was recorded in May with an average value of 20 °C, and the lowest was 12 °C in December. The highest precipitation was 255 mm in July and the lowest values were 3 and 0 mm in November and December, respectively.

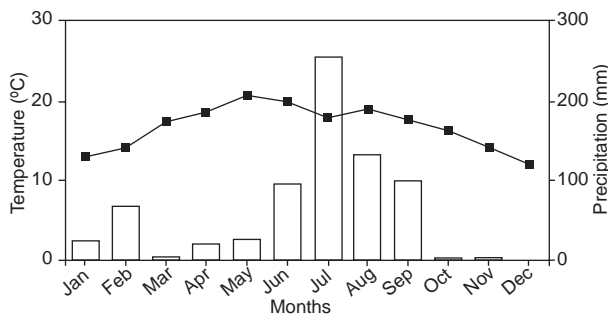


Fig. 1. Temperature and precipitation during 2010.

2.2 Sampling

The studies of CO₂ exchange were made on three sampling times: T1 (7:30-9:30 LT), T2 (11:30-13:30 LT) and T3 (15:30-17:30 LT). The sampling times were chosen because two of the selected plants have C3 metabolism and light saturation curves ranged from 500 to 1000 μmol m⁻²s⁻¹. The experimental campaign was conducted during 2010, on February 8-12, March 8-12, April 12-16, July 5-9, August 16-20, September 6-10, October 11-15, and November 8-12.

The photosynthetic rate (PR), temperature (T), and relative humidity (RH) were measured with a LI-6400 CO₂ analyzer (LI-COR Inc., NE, USA) on leaves of each species exposed to sun. Additionally, the photosynthetic photon flux density (PPFD) was measured with an LI-190SA external sensor (LI-COR Inc., NE, USA). The experimental measurements consisted of three replicates per plant during the three sampling times.

2.3 Plants

Measurements were conducted in situ considering three native and abundant REPSA's species. *E. gibbiflora* is a perennial plant with succulent leaves and stems, belonging to the Loganiaceae family

(Carrillo-Reyes *et al.*, 2009). This plant blooms from November to February, and its leaves have a 24-30 cm long diameter forming a rosette (Pérez-Calix, 2008). *B. cordata* is an evergreen small tree, belonging to the Loganiaceae family; it blooms from July to October with oblong and pubescent leaves (5-24 cm long, 1.5-10.5 cm wide). *S. praecox* belongs to the Asteraceae family, and it has a similar lifestyle to *B. cordata* specie with oblong leaves 2-18 cm long and 2-10 cm wide, which reduces its canopy leaf area during the dry season. *E. gibbiflora* has a Crassulaceae acid metabolism known as CAM which allows the fixation of CO₂ at night, while in the light period it assimilates CO₂ into chloroplasts by the C3 cycle (Taiz and Zeigel, 2006). *S. praecox* and *B. cordata* have a Calvin-Benson cycle metabolism, allowing the fixation and assimilation of CO₂ to form organic compounds, and the photosynthesis takes place in chloroplasts (Nobel, 2009).

2.4 Population and density

In order to estimate the number of individuals from each species in the REPSA, eight quadrants of 10 by 10 m were selected. The sampling method was selective: the numbers of individuals, branches and leaves were counted in each quadrant for the three species in both climatic seasons.

In order to calculate the total CO₂ captured and emitted by the REPSA, we averaged the number of individuals for each species in eight quadrants. The results (six, seven and 79 for *B. cordata*, *S. praecox*, and *E. gibbiflora*, respectively) were then extrapolated to the REPSA. We also used the average leaf area (LA) to calculate the surface and average branches per species, in order to estimate the total contribution of REPSA. Applying a destructive method, samples and branches were taken randomly from each species in all quadrants, and then the leaf area was measured using a LI-3000 (LI-COR Inc., NE, USA).

2.5 Estimation of CO₂ (capture and emission)

The CO₂ exchange between the species and the atmosphere was estimated using average values of the photosynthetic rate, plant population and leaf area of each plant during three schedules in both seasons (dry and rainy). The estimation of CO₂ was performed with the following equation:

$$\text{CO}_2 \text{ (estimated)} = (\text{PR} \times t \times \text{LA})/\text{RA}$$

where PR represents the photosynthetic rate (kg CO_2), t the sampling time (s), LA the leaf area (m^2), and RA the REPSA area (m^2). Positive values of CO_2 indicate capture and negative values represent emissions from the plant to the environment.

2. 6 Statistical analysis

Correlation coefficient was used to test relations of PR among temperature, PPFD and relative humidity (Statistics R2015a, Matlab). Data are presented as the means of three tests and standard error.

3. Results and discussion

3.1 Photosynthetic rate, photosynthetic photon flux density, temperature and relative humidity

The maximum average temperature was 27°C in April (dry season), while the minimum was 22°C measured in September, at the end of the rainy season. Figure 2 shows the averages of PR, PPFD, T and RH for the three sampling times. We also analyzed the correlation coefficients between these variables.

The PR changed both in the dry and rainy seasons for all species (Fig. 2a, d, g). *B. cordata* had a maximum PR of $29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in April and a minimum of $5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in October (Fig. 2a); it also showed a good correlation between PR and PPFD.

However, T and RH showed very poor correlations (Table I). *S. praecox* loses its leaves during the dry season; in April PR reached $27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, in October it decreased to $4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, from July to October it ranged from 6.72 to $4.28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, and in April it increased to $27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ showing a strong change from one season to another (Fig. 2d). Temperature range was 21 - 23°C in the rainy season and 28°C in the dry season (Fig. 2e), both cases showing a good correlation among PR, PPFD, and T ($r = 0.96$, Table I). *E. gibbiflora* had a totally different behavior and the correlation coefficients of PR indicated respiration instead of photosynthesis processes. PR increased from -57 to $-21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ from February to April, but in the rainy season it was positive, ranging from 1 - $5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Also, PPFD changed from $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ during the dry season to $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the rainy season (Fig. 2g). PR and PPFD had an $r = -0.78$, perhaps indicating an inverse relationship between both variables.

Analysis of normalized difference vegetation indexes (NDVI) was also performed to identify changes of greenery in both measuring seasons, using information of the MODIS from the Earth Observing

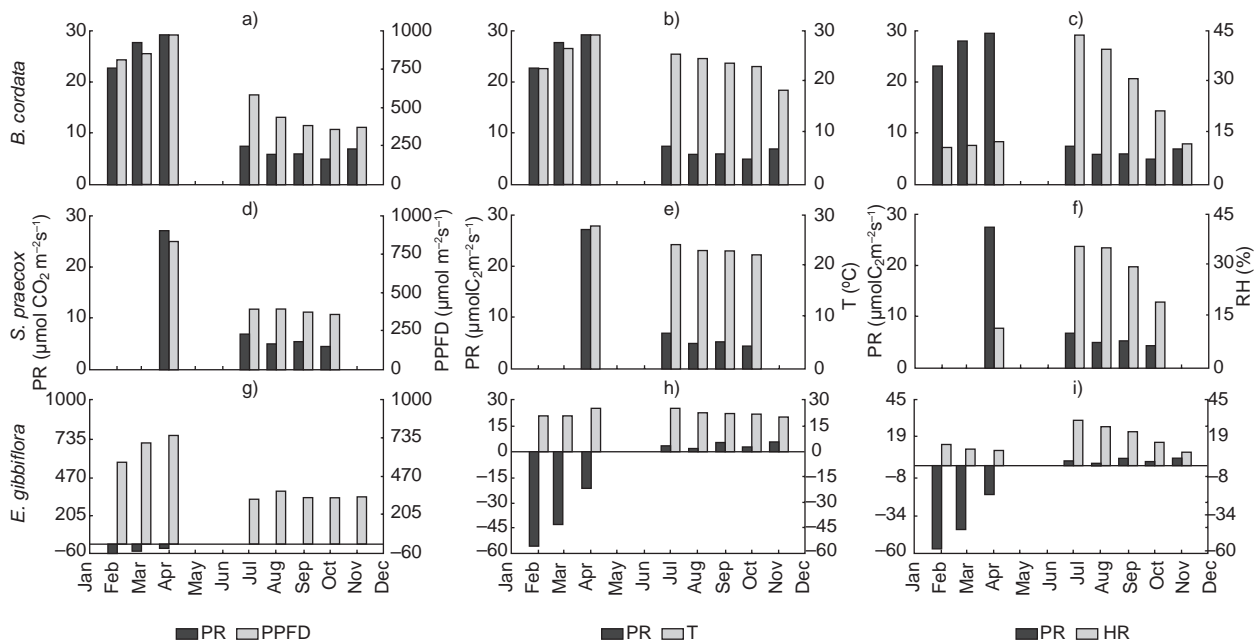


Fig. 2. Photosynthetic rate vs. photosynthetic photon flux density averages (a, d, and g); photosynthetic rate vs. temperature (b, e and h), and photosynthetic rate vs. relative humidity (c, f and i) for *B. cordata*, *S. praecox* and *E. gibbiflora*, respectively.

Table I. Cross correlation of variables for *B. cordata*, *S. praecox* and *E. gibbiflora*.

	PR (CO ₂ μmol m ⁻² s ⁻¹)	T (°C)	PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)	RH (%)
<i>B. cordata</i>				
PR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	1.00	0.58	0.97	-0.66
T (°C)		1.00	0.68	0.12
PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)			1.00	-0.49
RH (%)				1.00
<i>S. praecox</i>				
PR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	1.00	0.97	1.00	-0.74
T (°C)		1.00	0.96	-0.56
PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)			1.00	-0.74
RH (%)				1.00
<i>E. gibbiflora</i>				
PR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	1.00	0.32	-0.78	0.50
T (°C)		1.00	0.16	0.29
PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)			1.00	-0.63
RH (%)				1.00

System (EOS). Figure 3 shows the results and changes on greenery along the year. July presented the highest value of the rainy season.

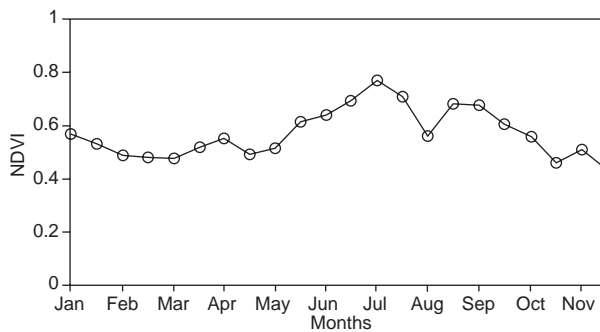


Fig. 3. Annual NDVI changes on greenery in 2010.

3.2 Estimated CO₂ (capture and emission)

Table II shows the results of CO₂ fluxes (capture and emission) estimated in the REPSA. *B. cordata* and *S. praecox* species had similar behavior in capturing CO₂ during both seasons, with 4.03 and 3.25 kg CO₂ in the three sampling times. During the rainy season there was a reduction in the capture of CO₂, decreasing to 3.25 kg for *B. cordata* and 0.63 kg for *S. praecox*. On the other hand, *E. gibbiflora* showed negative values in February, March, and April, indicating respiration processes, so the average emitted CO₂ was 11.44 kg in the dry season and the average captured CO₂ was 1.12 kg in the rainy season.

PR and PPFD for *B. cordata* and *S. praecox* showed a similar behavior on both the dry and rainy seasons. Those species had higher PR in the dry than in the rainy season. The results show the relevance of solar radiation by increasing the photosynthetic rate for this species (Larcher, 2003; Marur and Faria, 2006).

E. gibbiflora had a totally different behavior, PR showed negative values on the dry season, indicating respiration and therefore CO₂ released to the environment. The results are related to the facultative metabolism (Crassulacean acid metabolism) that captures CO₂ during the night to prevent the loss of water and also decreases its photosynthetic rate during the day. However, in the rainy season, this species showed photosynthetic activity capturing carbon dioxide probably caused by stomatal opening in short periods of the day (Geydan and Melgarejo, 2005; Andrade *et al.*, 2007).

Temperature has a direct influence on the activities of plants; it promotes physiological activities, increasing the photosynthetic rate (Lambers *et al.*, 2008), but high temperatures cause stomata closure reducing gas exchange. The environmental temperature average throughout the measuring campaign was 25 °C, thus favoring the photosynthetic activity of *B. cordata* and *S. praecox* in this microenvironment.

Photosynthesis cycles are influenced by seasonal changes, which increase in the first months of the year and decrease during fall, with the loss of leaves (Lambers *et al.*, 2008). However, environmental variables such as temperature, PPFD and

Table II. Estimation of CO₂ fluxes by *B. cordata*, *S. praecox* and *E. gibbiflora* in both seasons.

	Dry season		Rainy season		
	PR (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Total CO ₂ (kg)	PR (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Total CO ₂ (kg)	
<i>B. cordata</i>					
Feb	22.69	4.35	Jul	7.36	1.41
Mar	27.71	5.31	Aug	5.85	1.12
Apr	29.25	5.61	Sep	5.85	1.12
Nov	6.87	0.87	Oct	4.93	0.95
<i>S. praecox</i>					
Feb			Jul	6.72	0.81
Mar			Aug	4.75	0.57
Apr	26.97	3.25	Sep	5.25	0.63
Nov			Oct	4.28	0.52
<i>E. gibbiflora</i>					
Feb	-57.05	-22.44	Jul	3.21	1.26
Mar	-43.72	-17.19	Aug	1.17	0.46
Apr	-21.16	-8.32	Sep	5.25	2.06
Nov	5.57	2.19	Oct	2.85	1.12

RH are determinant for photosynthesis responses. According to the results, the RH average was 11% during the dry season, suggesting that low RH values are appropriate for CO₂ capture by *B. cordata* and *S. praecox*. Average RH during rainy season increased to 40%, reducing plant transpiration and preventing water loss. Some studies show that in forests, clouds dipping favors photosynthesis (Letts and Mulligan, 2005; Johnson and Smith, 2008), but in these species sunny days are essential. NDVI showed that in the reserve, greenness intensity is greater than 0.4; this value is an indicator that suggests photosynthesis and secures primary productivity in this place.

The results showed a decrease of PR and PPFd during the rainy season for the species *B. cordata* and *S. praecox*. It has been suggested that clouds present in this season affect the processes of photosynthesis. It was also observed that the microenvironment and physiological variables of these species are critical in their response to photosynthesis. The contribution of the reserve according to the estimates, allows knowing the CO₂ balance of these two species during the dry and rainy seasons, which was 3.86 and 3.03 kg CO₂, respectively.

4. Conclusions

Results are a first approximation to CO₂ exchange in an urban ecosystem. This information could be integrated into ecosystem models to update and validate data. *B. cordata* and *S. praecox* have a similar

behavior in CO₂ exchange, but *E. gibbiflora* shows a totally different behavior that could overestimate the CO₂ capture in the REPSA. For a better understanding of CO₂ exchange in this reserve, we recommend that night measurements should be performed too.

Acknowledgments

We thank M. I. Saavedra for her technical assistance; also H. Padilla, J. García, E. Montes, A. Ysunza, J. Rosas, R. López, E. Galindo, and T. Castillo for their help during the measuring campaign.

References

- Andrade J. L., E. de la Barrera, C. Reyes-García C, M. F. Ricalde M.F, G.Vargas-Soto and J. C. Cervera, 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 81, 37-50.
- Carrillo-Reyes P., V. Sosa and M. E. Mort, 2009. Molecular phylogeny of the Acre clade (Crassulaceae): Dealing with the lack of definitions for *Echeveria* and *Sedum*. *Mol. Phylogenet. Evol.* 53, 267-276, doi: 10.1016/j.ympev.2009.05.022.
- Castillo-Argüero S., Y. Martínez Orea, M. A. Romero Romero, P. Guadarrama Chávez, O. Núñez Castillo, I. Sánchez Guillén and J. A. Meave, 2007. *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, aspectos florísticos y ecológicos*. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria, México, 11-15.

- Chávez C. and G. Ceballos, 2009. Implications for conservation of the species diversity and population dynamics of small mammals in an isolated reserve in Mexico City. *Nat. Area. J.* 29, 27-41, doi: <http://dx.doi.org/10.3375/043.029.0104>.
- FAO, 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 11-45, ISBN 97892-5-306654-4.
- Geydan T. D. and L. M. Melgarejo, 2005. Metabolismo ácido de las crasuláceas. *Acta Biológica Colombiana* 10, 3-15.
- Harnos N., Z. Nagy, J. Balogh, Z. Tuba, 2006. Modeling net photosynthetic rate of temperate dry grassland species and winter wheat at elevated air CO₂ concentration. *Appl. Ecol. Env. Res.* 4, 47-53.
- IPCC, 2007. Summary for policymakers. In: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 1-18.
- INE, 2010. Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (IV). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, 384 pp.
- Jáuregui O. E., 2000. El clima de la Ciudad de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 139 pp.
- Johnson D. M. and W. K. Smith, 2008. Cloud immersion alters microclimate, photosynthesis and water relations in *Rhododendrom catawbiense* and *Abies fraseri* seedlings in the southern Appalachian Mountains, USA. *J. Exp. Bot.* 47, 639-645.
- Kim S. H. and J. H. Lieth, 2003. A coupled model of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration for a rose leaf (*Rosa hybrida* L). *Ann. Bot.* 91, 771-781, doi:10.1093/aob/mcg080.
- Kitao M., T. T. Lei, T. Koike, M. Kayama, H. Tobita and Y. Maruyama, 2007. Interaction of drought and elevated CO₂ concentration on photosynthetic down regulation and susceptibility to photo inhibition in Japanese white birch seedlings grown with limited N availability. *Tree Physiol.* 27, 727-735.
- Kordowski K. and W. Kuttler, 2010. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmos. Environ.* 44, 2722-2730, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.04.039.
- Lambers H., F. S. Chapin and T. L. Pons, 2008. *Plant physiological ecology*. Springer, New York, 605 pp.
- Larcher W., 2003. *Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer, Berlin, 514 pp.
- Letts M. G. and M. Mulligan, 2005. The impact of light quality and leaf wetness on photosynthesis in the north-west Andean tropical, montane cloud forest. *J. Trop. Ecol.* 21, 549-557, doi:10.1017/S0266467405002488.
- Long S. P. and C. J. Bernacchi, 2003. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. *J. Exp. Bot.* 54, 2393-2401, doi:0.1093/jxb/erg262.
- Marur C. J. and R. T. Faria, 2006. Photosynthesis of individual leaves in a coffee plant. *Acta Sci.-Agron.* 28, 331-335.
- Myers D. A., R. B. Thomas and E. H. de Lucia, 1999. Photosynthetic responses of loblolly pine (*Pinus taeda*) needles to experimental reduction in sink demand. *Tree Physiol.* 19, 235-242.
- NOAA 2014. Annual Data Atmospheric CO₂ Concentration. Mauna Loa CO₂ Data IOP Publishing: PhysicsWeb. Available at: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2014-state-climate-carbon-dioxide>.
- Nobel Park S., 2009. *Physicochemical and environmental plant physiology*. Academic Press, California, 567 pp.
- Okimoto Y., A. Nose, Y. Katsuta, Y. Tateda, S. Agarie and K. Ikeda, 2007. Gas exchange analysis for estimating net CO₂ fixation capacity of mangrove (*Rhizophora stylosa*) forest in the mouth of river Fukido, Ishigaki Island, Japan. *Plant Prod. Sci.* 10, 303-313, doi:10.1626/pps.10.303.
- Pérez-Calix E., 2008. Crassulaceae. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes* 156, 1-141.
- Rzedowski J., 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). *Anales de la Escuela Nacional Ciencias Biológicas* 8, 59-129.
- Sharkey T. D., C. J. Bernacchi, G. D. Farquhar and E. L. Singsaas, 2007. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C3 leaves. *Plant Cell Environ* 30, 1035-1040, doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01710.x.
- Schultz R. H., 2003. Extension of a Farquhar model for limitations of leaf photosynthesis induced by light environment, phenology and leaf age in grapevines (*Vitis vinifera* L. cvv. White Riesling and Zinfandel). *Functional Plant Biology* 30, 673-687, doi:10.1071/FP02146.
- Taiz L. and E. Zeigel, 2006. *Plant physiology*. Sinauer Associates, Sunderland, 623 pp.

- Velasco E., M. Roth., S. H. Tan, M. Quak, S. D. A. Nabarro and L. Norford, 2013. The role of vegetation in the CO₂ flux from a tropical urban neighborhood. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 7267-7310, doi:10.5194/acp-13-10185-2013.
- Xu L. and D. D. Baldocchi, 2003. Seasonal trends in photosynthetic parameters and stomatal conductance of blue oak (*Quercus douglasii*) under prolonged summer drought and high temperature. *Tree Physiol.* 23, 865-877.
- Yang J., J. McBride, J. Zhou and Z. Sun, 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban For. Urban Gree.* 3, 65-78, doi:10.1016/j.ufug.2004.09.001.
- Zhao M., F. A. Heinsch, R. R. Nemani and S. W. Running, 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sens. Environ.* 95, 164-176, doi:10.1016/j.rse.2004.12.011.