

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**FLUJOS TURBULENTOS DE DIÓXIDO DE CARBONO
EN UNA ZONA URBANA (CIUDAD UNIVERSITARIA)**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS

PRESENTA:

ARTURO MONTERO JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS: DRA. MARÍA DE LA LUZ ESPINOSA
FUENTES

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

SINODALES:

DR. OSCAR AUGUSTO PERALTA ROSALES

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

DR. FRISO HOLWERDA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

DR. ENRICO ARTURO YEPEZ GONZÁLES

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

DR. RODRIGO VARGAS

COLLEGE OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES, UD

CIUDAD DE MÉXICO MARZO - 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Agradecimientos

A mi directora de tesis la Dra. María de la Luz Espinosa Fuentes, por el apoyo, la confianza brindada y por creer en mi a lo largo del trabajo realizado.

A la Biól. María Eugenia González del Castillo por su disposición, sus observaciones, comentarios acertados, paciencia y apoyo brindado en el desarrollo del trabajo.

A mis sinodales los Dres. Oscar Peralta, Friso Holwerda, Enrico Yopez y Rodrigo Vargas, por sus observaciones que ayudaron a mejorar la tesis.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por recibirme y facilitarme los medios para llevar a cabo este proyecto y en especial al Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Al CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A la beca otorgada por el CCA "Beca de apoyo para la titulación y obtención de grado mediante un fondo especial de ingresos extraordinarios".

A los Dres. George Burba y Erik Velasco por su permiso para utilizar imágenes y disposición de ayudar.

A mi familia por el apoyo durante el posgrado.

A mis amigos CLIMAC, de la sala de estudiantes, de la clase de dinámica de la atmósfera y a René y Aurora; por su ayuda brindada en algún momento.

Resumen

Las superficies urbanas generalmente son fuentes netas de CO_2 . Conocer el patrón de los flujos de CO_2 ayuda a desarrollar planes de control ambiental para reducir las emisiones. Sin embargo, los estudios sobre flujos de CO_2 en ciudades suelen ser escasos y en su mayoría son estudios de latitudes medias con una marcada tendencia estacional.

El presente estudio se realizó en Ciudad Universitaria, Ciudad de México, donde existen dos zonas con características contrastantes. Por un lado, Ciudad Universitaria con amplias zonas vegetadas y una baja densidad de edificios y por el otro lado, Santo Domingo situado en los alrededores de Ciudad Universitaria con una gran densidad de edificios y escasas áreas verdes.

Se realizaron mediciones de flujos de CO_2 , H_2O y energía con la técnica de eddy covariance para el periodo del 22 de octubre 2018 al 22 de marzo 2019. Los datos obtenidos se analizaron temporalmente en los cuales se pueden distinguir dos rubros: días laborables y vacaciones (17/12/2018 a 07/01/2019), que a su vez se dividen en días entre semana y fines de semana. Además, se realizó un análisis del patrón diario de los flujos y se relacionó con las variables meteorológicas.

Para poder estimar la calidad de los datos se utilizó el balance de energía, obteniendo un cierre de energía del 60 %. Gran parte del desbalance se atribuye a flujos de energía que no pudieron ser medidos como el flujo de almacenamiento y antropogénico.

Los footprints variaron de acuerdo a las condiciones meteorológicas a lo largo de todo el estudio. Presentaron diferencias a lo largo del ciclo diurno,

en el día tuvieron forma circular y abarcaron una porción de Santo Domingo, mientras que en la noche su forma fue ovalada con una inclinación al oeste considerando mayormente Ciudad Universitaria.

Las mayores emisiones de CO_2 correspondieron a los días laborables entre semana con un valor promedio de $4.0\mu molm^{-2}s^{-1}$, mientras que en las vacaciones entre semana el promedio fue de $0.9\mu molm^{-2}s^{-1}$. En ambos casos, los flujos disminuyeron durante los fines de semana denotando una clara influencia antropogénica.

El ciclo diario de los flujos de CO_2 entre semana de días laborables presentó 2 picos de valores elevados (uno matutino y otro vespertino) y una meseta intermedia entre estos dos picos. La meseta con valores relativamente constantes corresponde a las actividades al interior de Ciudad Universitaria, mientras que, los picos se relacionan con la horas de mayor afluencia vehicular. En los fines de semana de días laborables el patrón cambia y solo hay 2 picos poco pronunciados. Mientras que en vacaciones los flujos tuvieron emisiones muy bajas ($0.1\mu molm^{-2}s^{-1}$ y $0.03\mu molm^{-2}s^{-1}$) para días entre semana y fines de semana respectivamente observándose que el sistema puede actuar como sumidero en gran parte del día.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice de figuras	VI
1. Introducción	1
1.1. Zonas climáticas locales	2
1.2. Flujo de CO ₂ en urbes	7
1.3. Flujo de CO ₂ en urbes influenciadas por ecosistemas naturales	8
1.4. Justificación.	9
1.5. Hipótesis	9
1.6. Objetivos	10
2. Metodología	11
2.1. Área de estudio	11
2.2. Instrumentación para la aplicación de la técnica EC	14
2.3. Manejo de datos	16
2.4. Aplicación del balance de energía	18
2.5. Calidad de datos	19
2.6. Aplicación del footprint	19
3. Resultados	21
3.1. Zona climática local	21
3.1.1. Meteorología	22
3.2. Flujos de energía	25
3.2.1. Balance de energía	25

3.2.2.	Series de tiempo flujos de energía	28
3.2.3.	Patrón diario	29
3.2.4.	Comportamiento del flujo de H_2O	30
3.3.	Footprint	33
3.4.	Flujos de CO_2	37
3.4.1.	Serie de tiempo del flujo de CO_2	37
3.4.2.	Patrón semanal de los flujos de CO_2	38
3.4.2.1.	Aporte vegetal	40
3.4.3.	Ciclo diario	40
4.	Discusión	44
4.1.	Certeza del balance energético	44
4.2.	Relación de los footprints y los flujos de CO_2	46
4.3.	Análisis temporal de los flujos de CO_2	47
5.	Conclusiones	50
6.	Recomendaciones	52
7.	Anexo 1	53
7.1.	Eddy Covariance	53
7.1.1.	Eddy covariance	53
7.1.1.1.	Footprint o área fuente	55
7.1.1.2.	Técnica de Eddy covariance	56
7.1.2.	Limitaciones en el método Eddy covariance	57
8.	Anexo 2	61
	Referencias	70

Índice de figuras

1.1.	Esquema de las zonas climáticas locales. Modificado de (Stewart y Oke, 2012).	3
1.2.	Esquema de las diferentes escalas longitudinales y su interacción con las diferentes capas. CLP capa límite planetaria, CLU capa límite urbana, CDU capa del dosel urbano. Modificado de (Oke, 2006; Aubinet et al., 2012)	6
1.3.	Comparación de los flujos de CO_2 en distintas ciudades. Las gráficas muestran la variación del promedio diario de CO_2 , durante (a) verano y (b) invierno. Extraído de (Velasco y Roth, 2010).	7
1.4.	Flujo de la biomasa en Telok Kurau, Singapur. Esquema modificado de (Velasco et al., 2013).	9
2.1.	Fotografías obtenidas de Google Earth. a) parte perteneciente a Ciudad Universitaria y la parte de Santo Domingo, b) la torre de flujos, c) imagen general de Santo Domingo y universidad, incluyendo los paraderos y la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). Los puntos rojos indican la ubicación de la torre de flujos.	13
2.2.	Fotografía del equipo en funcionamiento. a) ubicación del anemómetro sónico y el sensor de CO_2 , b) dataloggers, c) el sensor de humedad, d) sensor de la radiación neta.	15
3.1.	Serie de tiempo de la temperatura y la humedad relativa. Arriba la humedad relativa y abajo la temperatura.	23
3.2.	Rosa de vientos para el periodo de estudio.	24
3.3.	Rosa de vientos para el día.	24

3.4. Rosa de vientos para la noche.	25
3.5. Correlación entre los flujos de energía, R_n vs $LE+H$. a) correlación cada media hora, $R^2 = 0.88$, $pendiente = 0.45$ b) correlación diaria $R^2 = 0.69$, $pendiente = 0.60$	26
3.6. Flujo promedio diario de R_n y el residual.	27
3.7. Serie de tiempo del residual. Valores promedio cada media hora por día.	28
3.8. Serie de tiempo de los flujos de energía. En a) el calor latente, en b) el calor sensible, y en c) la radiación neta.	29
3.9. Flujo promedio diario de R_n y $LE+H$	30
3.10. Flujos diario y semanal de H_2O correspondiente a los días laborables. a) ciclo promedio diario para los días entre semana, b) ciclo promedio diario para fines de semana y c) el ciclo semanal.	31
3.11. Flujos promedios de H_2O correspondientes al periodo vacacional. En a) se tienen ciclo promedio diario para los días entre semana, en b) ciclo promedio diario para fines de semana y en c) ciclo promedio diario semanal.	32
3.12. Serie de tiempo de los promedios diarios de las tasas evaporativas de H_2O	33
3.13. Footprint de los flujos para todo el periodo de muestreo.	34
3.14. Footprint de los flujos para el día.	36
3.15. Footprint de los flujos para la noche.	36
3.16. Serie de tiempo del flujo de CO_2 durante todo el periodo de estudio.	38
3.17. Valor promedio de los flujos de CO_2 en los días de la semana durante todo el muestreo	39
3.18. Flujo promedio diario de CO_2 durante todo el estudio. En a) el ciclo diario entre semana, b) en fines de semana, c) días entre semana de vacaciones y d) fines de semana de vacaciones.	42
7.1. Esquema ilustrativo de la torre de flujos, los edies y el viento. Obtenido de (Burba, 2013).	54
7.2. Esquema representativo del área del footprint, las mayores contribuciones del footprint se encuentran debajo de las zonas de color rojo oscuro. Obtenido de (Burba y Anderson, 2010).	55

7.3.	Esquema de la rotación de ejes. En la figura de arriba se muestra un terreno plano donde no es necesario rotar, mientras que en la de abajo es un terreno más complejo donde si es necesario realizar una rotación de ejes. Obtenido de (Finnigan et al., 2003)	58
7.4.	Corrección espectral. Obtenido de (Burba, 2013).	59
8.1.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 22-oct-2018 a 28-oct-2018 (día 295-301)	61
8.2.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 22-oct-2018 a 28-oct-2018 (día 295-301)	62
8.3.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 12-nov-2018 a 25-nov-2018 (día 316-329)	62
8.4.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 26-nov-2018 a 2-dic-2018 (día 330-336)	63
8.5.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 3-dic-2018 a 9-dic-2018 (día 337-343)	63
8.6.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 10-dic-2018 a 16-dic-2018 (día 344-350)	64
8.7.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 17-dic-2018 a 6-ene-2019 (día 351-6)	64
8.8.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 7-ene-2019 a 13-ene-2019 (día 7-13)	65
8.9.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 14-ene-2019 a 20-ene-2019 (día 14-20)	65
8.10.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 21-ene-2019 a 27-ene-2019 (día 21-27)	66
8.11.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 28-ene-2019 a 4-feb-2019 (día 28-34)	66
8.12.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 5-feb-2019 a 10-feb-2019 (día 35-41)	67
8.13.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 11-feb-2019 a 17-feb-2019 (día 42-48)	67
8.14.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 18-feb-2019 a 24-feb-2019 (día 49-55)	68
8.15.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 25-feb-2019 a 3-mar-2019 (día 56-62)	68
8.16.	Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 4-mar-2019 a 10-mar-2019 (día 63-69)	69

8.17. Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 11-mar-2019 a 23-mar-2018 (día 70-82) 69

Introducción

1.1. Zonas climáticas locales	2
1.2. Flujo de CO_2 en urbes	7
1.3. Flujo de CO_2 en urbes influenciadas por ecosistemas naturales	8
1.4. Justificación.	9
1.5. Hipótesis	9
1.6. Objetivos	10

Dentro de un ecosistema las interacciones entre la superficie y la atmósfera forman una de las relaciones más importantes para poder comprender los procesos de intercambio de materia y energía que se llevan a cabo (Vargas et al., 2013). Entre estos procesos atmosféricos destaca el flujo de gases de efecto invernadero (GEI) (Klaus y Kuttler, 2010). En las zonas urbanas los GEI de origen antropogénico como el dióxido de carbono (CO_2) están directamente relacionados a actividades como la producción de energía, la alimentación y el transporte (Crawford et al., 2011) y en los sitios con mayor influencia antropogénica es posible que se llegue a alterar el clima a escala local (Bergeron y Strachan, 2011); ante tal problemática se ha dado pie a algunas políticas de mitigación como es el promover el uso de vegetación para reducir las emisiones netas de GEI (Velasco et al., 2016).

En ambientes urbanos, el CO_2 es generado por diversas fuentes de la superficie, además de que presenta una interacción directa con la vegetación de los alrededores (Song y Wang, 2012). Las plantas participan activamente en el

intercambio de CO_2 , la cobertura vegetal puede actuar como sumidero, ya que reduce la cantidad de CO_2 atmosférico (Grimmond y King, 2002) en lo que se conoce como captura o secuestro de carbono sin embargo, las plantas y el suelo también son una fuente de CO_2 al realizar su respiración. La reducción del CO_2 atmosférico por parte de la vegetación resulta realmente importante si el área de cobertura es extensa y aún más si los árboles son perennifolios (Velasco et al., 2013).

El método de covarianza de flujos turbulentos (eddy covariance en inglés) suele ser el método preferido cuando se desea medir el intercambio ecosistema-atmósfera de vapor de agua, energía, momento y gases traza como CO_2 o CH_4 (Baldochi, 2003; Markwitz y Siebicke, 2019). Ha sido ampliamente utilizado para investigar el ciclo del carbono en ecosistemas naturales, tales como bosques, cultivos, pastizales, etc. Durante los últimos años el método eddy covariance (EC) se ha utilizado cada vez más para evaluar el intercambio de CO_2 sobre las superficies urbanas así como en la industria, agricultura, gestión de residuos, entre otros. (Baldochi et al., 2001; Burba, 2013). En el anexo 1 se profundiza acerca del método EC.

1.1. Zonas climáticas locales

La estructura de la superficie afecta el clima local a través de la modificación del flujo de aire, el transporte de calor atmosférico y los equilibrios de radiación de onda corta y onda larga, mientras que la cubierta de la superficie modifica el albedo, la disponibilidad de humedad y el potencial de calentamiento / enfriamiento del suelo (Stewart y Oke, 2012) .

El asignar una ZCL a un sitio de estudio urbano es importante para tener una descripción general de las características del sitio y poder hacer comparaciones más precisas entre lugares con la misma ZCL o alguna similar. Además de poder asignar valores teóricos a variables no medidas.

De acuerdo con Stewart y Oke (2012) el paisaje se puede clasificar en zonas climáticas locales (ZCL) las cuales se van a determinar de acuerdo con la homogeneidad de la superficie y con un régimen característico de temperatura. Estas zonas se distinguen por sus estructuras (altura de los edificios, dimensio-

nes de las calles), cobertura (permeabilidad), materiales, actividad humana, y el potencial para modificar la naturaleza (figura 1.1).

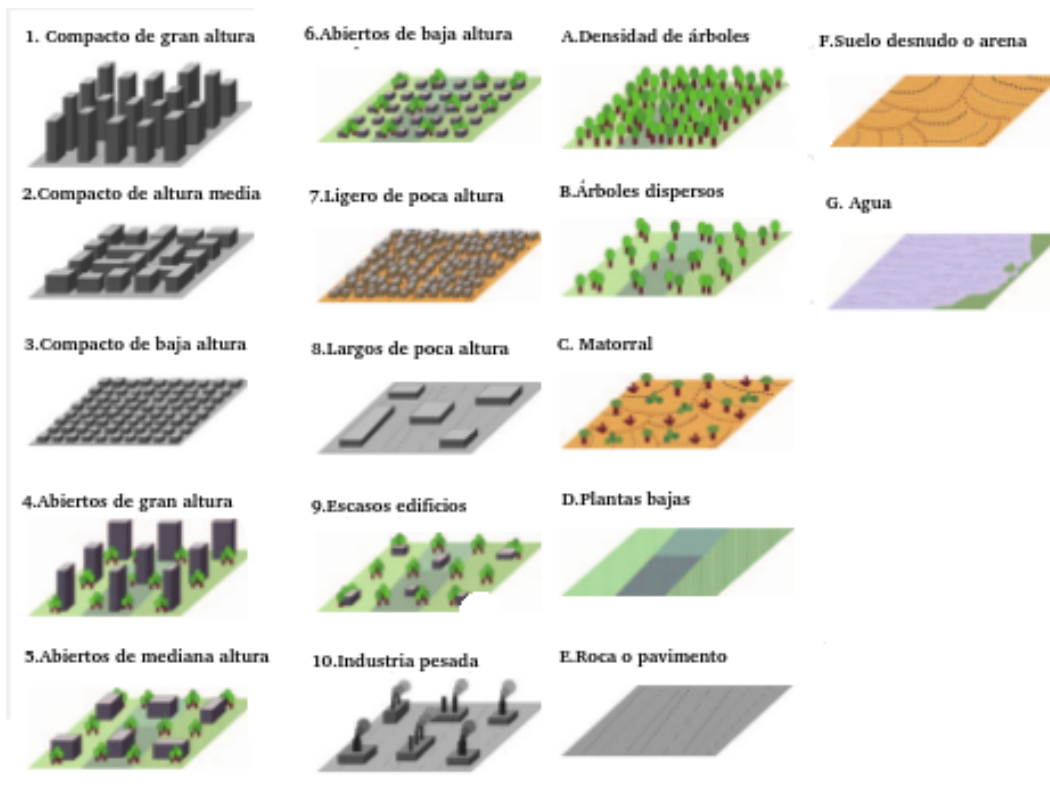


Figura 1.1: Esquema de las zonas climáticas locales. Modificado de (Stewart y Oke, 2012).

La clasificación de la ZCL se muestra a continuación:

Tipos de edificios

- 1. Compacto de gran altura: densa mezcla de edificios altos, pocos o ningún árbol, superficie del suelo mayormente pavimentada.
- 2. Compacto de altura media: densa mezcla de edificios de altura media (3-9 pisos), pocos o ningún árbol, superficie del piso mayormente pavimentada.

- 3. Compacto de baja altura: densa mezcla de edificios de baja altura (1-3 pisos), pocos o ningún árbol, superficie del suelo mayormente pavimentada.
- 4. Abiertos de gran altura: arreglo de edificios altos en lugares abiertos, abundancia de cobertura permeable (plantas, cobertura vegetal).
- 5. Abierto de mediana altura: arreglo de edificios de mediana altura (3-9 pisos) en lugares abiertos, abundancia de cobertura permeable (plantas, cobertura vegetal).
- 6. Abierto de baja altura: arreglo de edificaciones de baja altura (1-3 pisos) en lugares abiertos, abundancia de cobertura permeable (plantas, cobertura vegetal).
- 7. Ligeros de poca altura: mezcla densa de edificios de una sola planta, pocos o ningún árbol, la superficie del suelo es mayormente tierra, los materiales de construcción suelen ser madera o corrugados.
- 8. Largos de poca altura: arreglos abiertos largos de baja altura (1-3 pisos), pocos o ningún árbol, la superficies del suelo es mayormente de pavimento.
- 9. Escasos edificios: arreglo de edificios pequeños o de mediana altura, en una zona natural, abundancia de cobertura permeable (plantas, cobertura vegetal).
- 10. Industria pesada: edificios de uso industrial de baja y mediana altura (torres, contenedores, chimeneas, almacenes, etc), pocos o ningún árbol, la superficie del suelo esta mayormente pavimentada, las construcciones suelen ser metal y concreto.

Tipos de cobertura de la tierra

- A. Densidad de árboles: paisaje muy boscoso de arboles perennes o caducifolios, cobertura permeable; bosque natural, árboles de cultivo o parque urbano.
- B. Árboles dispersos: árboles dispersos caducifolios o perennifolios, cobertura mayormente permeable; bosque natural, árboles de cultivo o parque urbano.

- C. Matorral: arreglo abierto de arbustos, árboles leñosos, cobertura mayormente permeable; zona de cultivos o matorral.
- D. Plantas bajas: paisaje de hiervas o plantas de baja altura, pocos o ningún árbol; pastos, zonas de agricultura o parques urbanos.
- E. Roca o pavimento: roca o superficie pavimentada, pocos o ningún árbol o planta; transporte urbano o zonas rocosas.
- F. Suelo desnudo o arena: paisaje cubierto por tierra o arena, pocos o ningún árboles o plantas; desiertos o zonas de agricultura.
- G. Agua: grandes cuerpos de agua abiertos como mares o lagos, o pequeños cuerpos como presas, riachuelos o lagunas.

Verticalmente hablando es importante tomar en cuenta a la capa límite atmosférica o capa límite planetaria (CLP), que representa al estrato de aire bajo la influencia de la superficie terrestre en el cual se dan muchas interacciones de mezcla debido a la turbulencia. Si esta turbulencia es debida a las estructuras antropogénicas entonces estamos hablando de una capa límite urbana (CLU).

Hablando de un ecosistema urbano es posible subdividir a la CLU en 2 capas: la subcapa urbana rugosa (SUR) y la subcapa inercial suprayacente (SIS). La primera es cercana al dosel urbano y corresponde a elementos individuales de la microescala; mientras que la segunda corresponde a la mezcla de todos los subvecindarios, es decir la mezcla de las SUR. A la parte más baja de la SUR, que es de la superficie a la altura de los edificios se le conoce como capa del dosel urbano (CDU) (Aubinet et al., 2012).

En lo que se refiere a escalas horizontales se presentan tres (Oke, 2006), (figura 1.2), (cuadro 1.1):

- Microescala: cada superficie y objeto tiene su propio microclima y se encuentra dentro de su propia vecindad. La temperatura del aire y de la superficie pueden variar mucho aún en cortas distancias. Está en el orden de centímetros a metros.
- Escala local: esta escala incluye la topografía, pero excluye elementos de la microescala, llega a abarcar pocos kilómetros, ejemplos en el medio urbano podrían ser colonias y barrios.

- Mesoescala: toda una ciudad se ve influenciada por esta escala, está en el orden de decenas de kilómetros.

Cuadro 1.1: Escalas urbanas

Escala urbana	Distancia horizontal	Características estructurales	Escala urbana
Edificio, block	10 x 10m 500 x 500m	casa familiar, block, fabrica	micro
Barrio	5 x 5 km	centro de la ciudad, residencial, industrial	local
Ciudad, región urbana	25 x 25km 10 x 100km	área urbana ciudad más sus entornos	meso

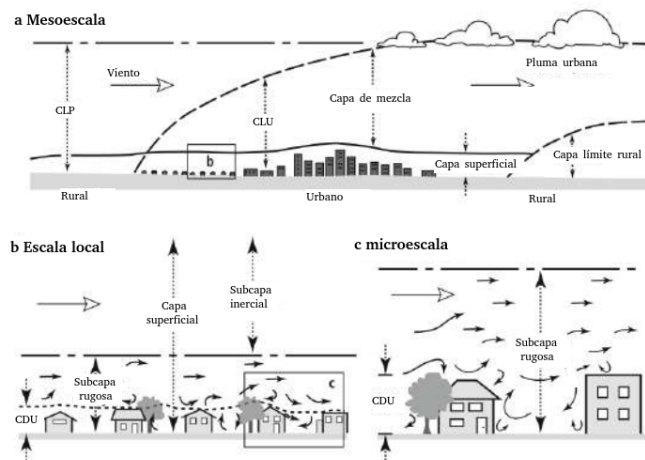


Figura 1.2: Esquema de las diferentes escalas longitudinales y su interacción con las diferentes capas. CLP capa límite planetaria, CLU capa límite urbana, CDU capa del dosel urbano. Modificado de (Oke, 2006; Aubinet et al., 2012)

1.2. Flujo de CO₂ en urbes

Los diversos estudios que se han realizado sobre flujos de CO₂ en grandes urbes refieren la existencia de un patrón diurno con los mayores flujos de CO₂ entre las 6:30 y 8:00 horas y entre las 17:00 y 19 horas variando este intervalo dependiendo del ritmo de vida de las ciudades (Grimmond et al., 2004; Matese et al., 2009; Velasco y Roth, 2010), lo que está relacionado con las contribuciones antropogénicas debido a la quema de combustibles fósiles provenientes de los vehículos.

Otras fuentes de CO₂, aunque con aportes menores son la respiración nocturna de las plantas, la calefacción domestica y la capa de mezcla de las mañanas (Velasco et al., 2005).

De acuerdo con Velasco y Roth (2010) en diversas ciudades se presenta un incremento en los flujos de CO₂ durante el invierno y una reducción durante el verano (figura 1.3), lo que se atribuye entre otros factores al aumento en el uso de la calefacción. Desafortunadamente, la mayoría de los datos son de ciudades donde la variación estacional es notoria. Los datos de ciudades de latitudes tropicales son mínimos y en muchos casos no completan el ciclo anual sin embargo, muestreos en ciudades como Melbourne, Ciudad de México, El Cairo, entre otras, parecen sugerir que también presentan un incremento en invierno aunque no tan grande como en las latitudes medias.

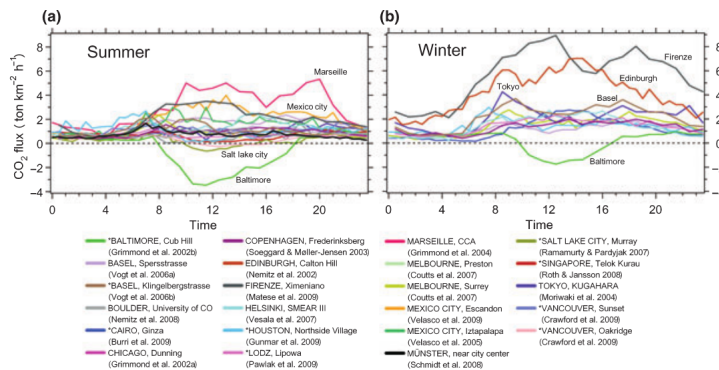


Figura 1.3: Comparación de los flujos de CO₂ en distintas ciudades. Las gráficas muestran la variación del promedio diario de CO₂, durante (a) verano y (b) invierno. Extraído de (Velasco y Roth, 2010).

1.3. Flujo de CO_2 en urbes influenciadas por ecosistemas naturales

El flujo neto urbano de CO_2 está influenciado por fuentes naturales y sumideros. La vegetación (parques urbanos, árboles dispersos, jardines privados, césped, etc.) capta el CO_2 de la atmósfera a través de la fotosíntesis durante el día y libera una fracción de este a través de la respiración, con una liberación adicional de los suelos y la actividad subterránea correspondiente.

Los jardines suburbanos representan una fracción importante de la superficie ya sea, en parques o en los patios de las viviendas, Christen et al. (2009). mencionan que los flujos de CO_2 de los jardines en comparación con los flujos urbanos es mínimo sin embargo, si los jardines o las áreas vegetadas son amplias estas pueden actuar como sumideros de CO_2 .

Pese a ser pocos los lugares con dichas características se han realizado estudios en urbes que tienen grandes parques insertados o en sus alrededores, se ha observado que en algunos casos la vegetación actúa como sumidero de CO_2 (Kowalski y Serrano, 2007).

En áreas tropicales tales como Singapur se han realizado estudios dónde se determina el papel de la vegetación en los flujos de CO_2 en una zona urbana (figura 1.4). En un estudio realizado en un barrio residencial de Singapur los resultados apuntaron que la vegetación secuestra cerca del 8 % del CO_2 emitido total sin embargo, al tomar en cuenta la respiración del suelo, la parte biogénica de los flujos cambia a fuente proporcionando un 4 % del total de los flujos de CO_2 (Velasco et al., 2013). La vegetación puede compensar una fracción significativa del flujo antropogénico de CO_2 emitido dentro de un vecindario específico, dependiendo de la intensidad de las fuentes locales de emisión antropogénica y las características de la biomasa vegetal.

En un estudio realizado en un barrio residencial en Vancouver, Canada Crawford et al. (2011) encontraron que la vegetación y el suelo pueden compensar el 1.7% del flujo total de CO_2 emitido a la atmósfera por fuentes antropogénicas.

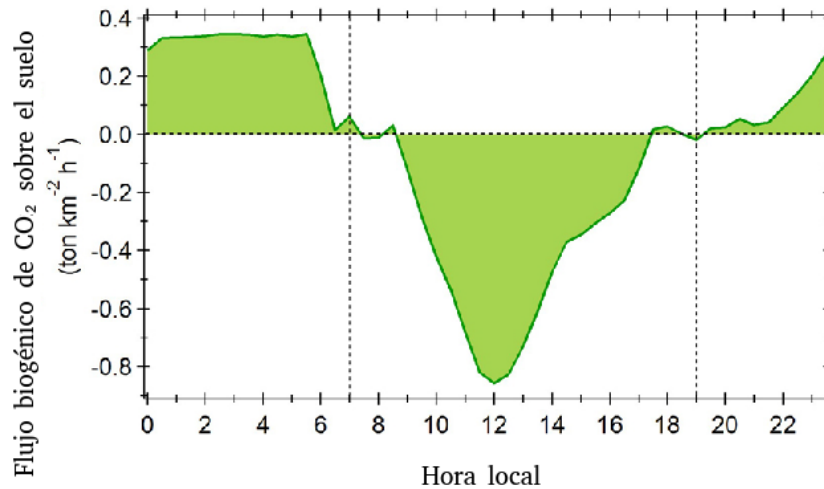


Figura 1.4: Flujo de la biomasa en Telok Kurau, Singapur. Esquema modificado de (Velasco et al., 2013).

1.4. Justificación.

La urbanización e industrialización crecientes han provocado un incremento en las concentraciones GEI generando cambios en la composición química de la atmósfera a nivel global así como incrementos en la temperatura y en el nivel del mar (IPCC, 2015). El CO_2 es un GEI generado por actividades humanas, como la producción industrial, el transporte y la deforestación. Las superficies urbanas suelen ser fuentes netas de CO_2 sin embargo, la vegetación circundante puede ser un factor importante para que ayude a mitigar los flujos.

Por lo que, al evaluar cual es la magnitud y variación del flujo de CO_2 en el tiempo en una zona parcialmente urbanizada y vegetada como es Ciudad Universitaria nos permitirá conocer el impacto antropogénico derivado de la actividad vehicular.

1.5. Hipótesis

Los flujos de CO_2 serán mayores en las horas de mayor tránsito vehicular dentro de Ciudad Universitaria debido a su origen antropogénico.

Se esperan variaciones de los flujos de CO_2 en escalas semanales debido a las diferencias de movilidad antropogénica entre el fin de semana y los días laborables.

1.6. Objetivos

Objetivo general

Cuantificar los flujos de CO_2 , vapor de agua y energía en una superficie urbana (Ciudad Universitaria, UNAM, CDMX) y estimar su variación temporal.

Objetivos particulares

- Implementar la técnica de eddy covariance EC en una zona urbana de uso mixto y baja densidad poblacional (Ciudad Universitaria).
- Determinar la zona climática local, de acuerdo con Stewart y Oke (2012).
- Estimar los componentes turbulentos (calor sensible, calor latente) y no turbulentos (radiación neta de la superficie) del balance de energía de la superficie urbana en la zona de estudio.
- Determinar el footprint o el área fuente de los flujos monitoreados dentro de la zona urbana.
- Analizar el comportamiento de las variables meteorológicas y relacionarlo con los flujos de CO_2 .

Metodología

2.1. Área de estudio	11
2.2. Instrumentación para la aplicación de la técnica EC	14
2.3. Manejo de datos	16
2.4. Aplicación del balance de energía	18
2.5. Calidad de datos	19
2.6. Aplicación del footprint	19

2.1. Área de estudio

La torre de flujos se ubicó en la plataforma de monitoreo de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), localizado al sur de la Ciudad de México ($19.3262^{\circ}N$, $99.1761^{\circ}W$) a una altitud de 2,280 metros sobre el nivel del mar. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (época de lluvias de junio a octubre y época seca de noviembre a mayo). Los vientos predominantes son del sureste.

Las instalaciones del CCA se encuentran casi en los límites, de Ciudad Universitaria por lo que el área de estudio abarca dos zonas contrastantes en relación a la densidad poblacional y las características de la superficie urbana. Por un lado, al norte, oeste y sur de la torre de flujos se extiende Ciudad Universitaria, (con una población aproximada de 80 mil sin embargo, la población no es fija, y una extensión aproximada de $7km^2$ que comprenden bastas áreas

verdes, incluyendo una reserva natural), y al noreste y este de la torre se encuentra la colonia Santo Domingo (con una población aproximada de 110,000 habitantes y pocas áreas verdes) existe un contraste entre el área de estudio y la zona aledaña (colonia Santo Domingo); por una parte se tiene el área perteneciente a Ciudad Universidad con zonas muy arboladas y por la otra se tiene un área densamente poblada con vegetación prácticamente nula (figura 2.1).

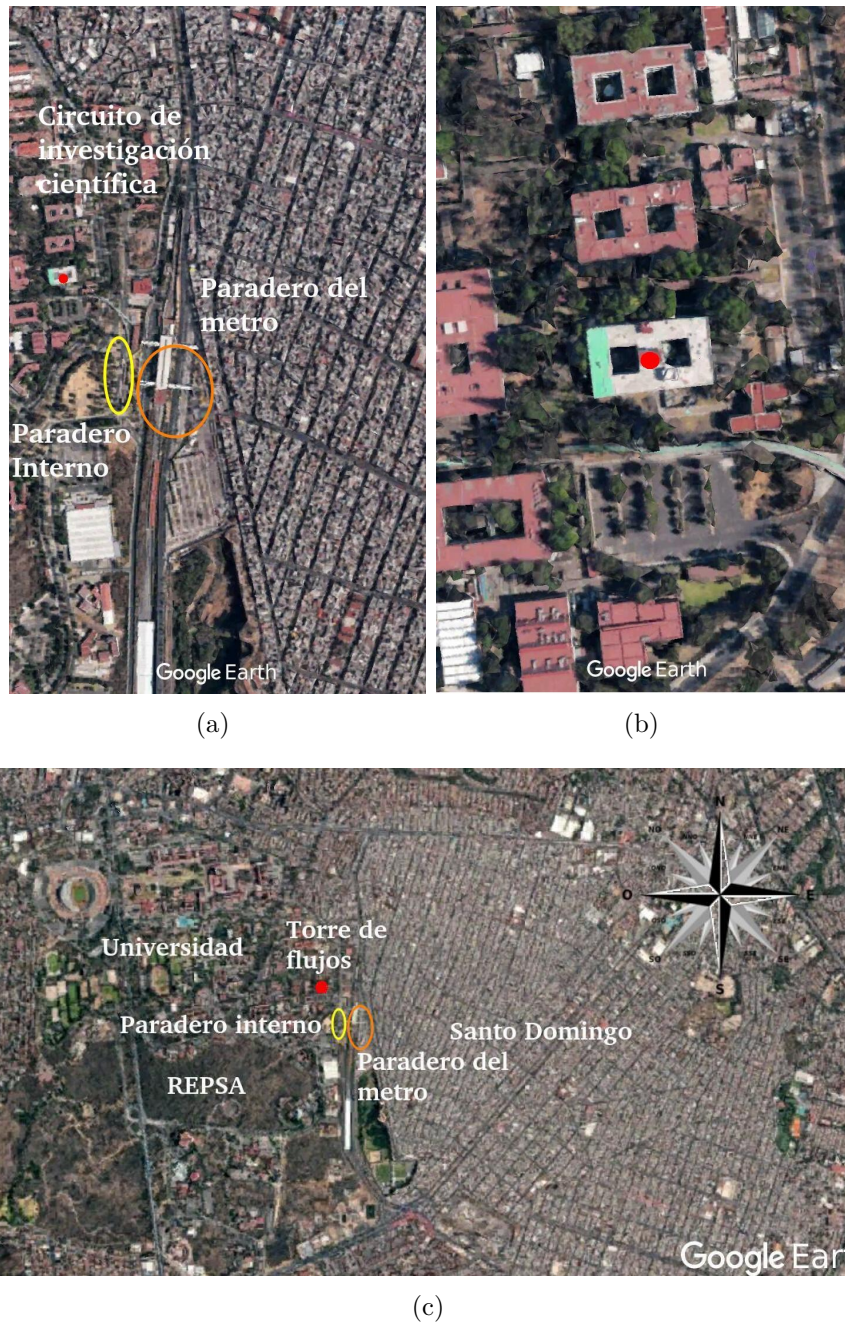


Figura 2.1: Fotografías obtenidas de Google Earth. a) parte perteneciente a Ciudad Universitaria y la parte de Santo Domingo, b) la torre de flujos, c) imagen general de Santo Domingo y universidad, incluyendo los paraderos y la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). Los puntos rojos indican la ubicación de la torre de flujos.

2.2. Instrumentación para la aplicación de la técnica EC

El sistema de *eddy covariance* consistió de un anemómetro sónico tridimensional (WindMaster Pro, Gill Instruments) que se empleó para medir la velocidad vertical del viento en las tres dimensiones y la temperatura del aire T_a , y un Analizador de Gases en el Infrarrojo (IRGA LI-COR 7500A) para medir la concentración de CO_2 y vapor de agua en el aire, a una frecuencia de 10 Hz. Se promedió la covarianza entre w y las magnitudes escalares a intervalos de 30 minutos, después de efectuar una doble rotación en el sistema de coordenadas para forzar las medias de v y w a cero (Burba, 2013) (ver la teoría de eddy covariance en el anexo).

El calor sensible (H) se calculó a partir de las covarianzas entre w y la temperatura del aire T_a , mientras que el calor latente de evaporación (LE) se calculó como la covarianza entre w y q , como lo describe Stull (1988). Mientras que los flujos se calcularon a partir de las covarianzas de w y la concentración del gas de interés.

El equipo de medición se instaló en la cima de una torre de aproximadamente 9.24m de altura, situada en el techo del edificio del Centro de ciencias de la atmósfera que se encuentra a 14.17m de altura sobre el suelo, dando un total aproximado de 24 m de altura de ubicación para estos instrumentos. El anemómetro sónico se colocó, a la misma altura que el analizador de CO_2 , este último se posicionó en un ángulo de 15° de inclinación y orientando hacia los vientos dominantes (NE). Ambos sensores estuvieron sincronizados y separados a una distancia de 15 cm desde el centro de los ejes del anemómetro hasta el camino óptico del IRGA.

A 10 m de la altura de la torre se colocó un radiómetro neto (Kipp and Zonen NR Lite 2), un piranómetro (LI-COR LI-200SL) y un sensor cuántico (LI-COR LI-190SL). A 4 m de altura colocó un sensor de humedad y temperatura (Vaisala HMP155).

A 10m de la altura de la torre, se dispusieron los dataloggers (donde se registran las mediciones), el datalogger sutron de Biomet recibió los datos del radiómetro neto, piranómetro, sensor cuántico, y del sensor de humedad y

2.2. INSTRUMENTACIÓN PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA EC15

temperatura. El datalogger LI-7550 recabó los datos del anemómetro sónico y del IRGA (figura 2.2). La configuración que se le dio al datalogger fue para obtener promedios cada media hora para todas las variables.



Figura 2.2: Fotografía del equipo en funcionamiento. a) ubicación del anemómetro sónico y el sensor de CO_2 , b) dataloggers, c) el sensor de humedad, d) sensor de la radiación neta.

La altura del dosel urbano promedio fue de 17.7m y se obtuvo estimando la altura de los árboles y edificios cercanos.

2.3. Manejo de datos

Para procesar los datos obtenidos de la técnica EC se utilizó el software EddyPro 6.2.1, el cual es un software diseñado por LI-COR Biosciences. La configuración del software fue la siguiente.

Doble rotación de coordenadas cada media hora de medición. Corrección del tiempo de retraso (lag) por la posición relativa del IRGA respecto al anemómetro. Estimación del footprint. Correcciones por densidad aparente causada por fluctuaciones en la temperatura (corrección WPL). Correcciones por pérdidas a las altas y bajas frecuencias el filtro de coespectra fue de acuerdo a Vickers y Mahrt (1997). Ajuste de w por un bug en el anemómetro que sobreestima la velocidad vertical. Indicador combinado para la calidad de los datos, contador y remoción de picos, con reemplazo por interpolación lineal y un máximo de tres variables atípicas consecutivas con 5σ , 3.5σ y 3.5σ para w , CO_2 y H_2O respectivamente.

Amplitud de la resolución para diferenciar cuando la señal es demasiado grande respecto a la resolución del instrumento, tomando un rango de variación de 7σ , los límites absolutos en el equipo empezando por el inferior y después el superior fueron $u = -30ms^{-1}$ y $30ms^{-1}$, $w = -5ms^{-1}$ y $5ms^{-1}$, $Ts = -40$ y $50^\circ C$, $CO_2 = 200$ y $900\mu molmol^{-1}$, $H_2O = 0$ y $40mmolmol^{-1}$. Se ocupó skewness y kurtosis para ayudar a validar los datos, se utilizó la ventana de Harmming para evitar discontinuidades en el procesamiento, los valores fijados para los mínimos inestables fueron $u^* = 0.2ms^{-1}$, $H = 20Wm^{-2}$, $LE = 20Wm^{-2}$, $CO_2 = 2\mu molm^{-2}s^{-1}$, para los mínimos estables $u^* = 0.05ms^{-1}$, $H = 5Wm^{-2}$, $LE = 3Wm^{-2}$, $CO_2 = 0.5\mu molm^{-2}s^{-1}$, y para los máximos $u^* = 5ms^{-1}$, $H = 1000Wm^{-2}$, $LE = 1000Wm^{-2}$, $CO_2 = 100\mu molm^{-2}s^{-1}$. La corrección en el filtrado de paso alto fue de acuerdo a Mauder and Foken (2004), la corrección en el filtrado de paso alto Moncrieff et al (1997).

De acuerdo con el eddyPro se tiene la tabla 2.1 con las correcciones de los flujos.

Cuadro 2.1: Correcciones de los flujos promedio.

	Valor corregido	Valor sin corregir	Porcentaje de corrección
H	$46.4Wm^{-2}$	$46.5Wm^{-2}$	0.5 %
LE	$24.2Wm^{-2}$	$20.2Wm^{-2}$	16.7 %
CO_2	$3.6\mu molm^{-2}s^{-1}$	$1.0\mu molm^{-2}s^{-1}$	72.2 %

Tras haber eliminado manualmente los periodos donde ocurrió precipitación pluvial, colocar los valores no numéricos y completar los datos faltantes de las series de tiempo se exportó en formato csv. Los archivos de texto así generados se procesaron en el software Matlab 2016a de la siguiente manera: se trabajaron como valores nulos los que estaban por debajo de 80 % en el índice de CO_2 y en el índice RSSI (Residual Signal Strength Indicator), el cual es un índice de la calidad de los datos del sensor.

Se crearon vectores de las diferentes variables medidas (temperatura, humedad relativa, calor sensible, calor latente, radiación neta, flujo de CO_2 , flujo de H_2O , etcétera.) para todo el periodo de muestreo, para fines de semana, días entre semana y vacaciones, para cada uno de los vectores antes mencionados se calculó el promedio y la variación estándar. Una vez se obtuvieron todos los vectores las variables de interés se graficaron contra el tiempo (todo el estudio, vacaciones, fines de semana, entre semana, etc). Además se realizaron rosas de viento que se separaron por día, noche y por su similitud en el patrón de vientos a lo largo de todo el estudio.

Las tendencias diarias y estacionales de los flujos fueron analizadas en conjunto con las variables meteorológicas. Además se evaluaron las tendencias obtenidas considerando periodos semanales.

Para tener un estimado del aporte vegetal se ocupó la ecuación de los flujos de CO_2 en ciudades de Velasco et al. (2014, 2013) ecuación (2.1)

$$Fc = E_T + E_B + R_H + (R_S + R_V - P_V) \quad (2.1)$$

donde Fc es el flujo de carbono, E_T las emisiones del tráfico vehicular, E_B las actividades del hombre, R_H el aporte de la respiración humana, R_S la respiración del suelo, R_V la respiración de las plantas y P_V el CO_2 asimilado por fotosíntesis.

2.4. Aplicación del balance de energía

Tener un buen balance de energía es complicado, es difícil medir todos los términos, no obstante, a pesar de las dificultades y debidas precauciones el balance de energía es uno de los caminos más convenientes para evaluar la calidad de los resultados en el eddy covariance, además de ser ampliamente usado (Aubinet et al., 2012). Y pese a que un buen cierre no necesariamente indica buenas mediciones del gas traza, un mal cierre suele indicar un problema en las mediciones del flujo (Burba, 2013).

Para evaluar la capacidad del sistema de EC para capturar el intercambio turbulento de materia y energía se utilizó la ecuación del balance de energía para ciudades (Feigenwinter et al., 2018).

$$Rn + A = H + LE + Qs + Adv \quad (2.2)$$

donde Rn es el flujo de la radiación neta, H el flujo de calor sensible, LE el flujo de calor latente, Qs el flujo de calor almacenado, A el flujo de calor antropogénico y Adv la advección neta.

Lo que significa que la energía radiante neta del sistema se disipa principalmente en forma de calor sensible y calor latente.

En la ecuación (2.2) no se considera G , el término referente al suelo, debido a que en urbes no suele ser importante y los aportes energéticos vienen por otros términos como A y Qs . En ecuación (2.2) se desprecia Adv por tener un aporte insignificante de acuerdo con Barlow (2014), en cuanto al término A y Qs suelen ser difíciles de cuantificar por lo que uno de ellos se estima, o Qs se considera 0 tras tener 1 año de mediciones como lo han mencionado Offerle et al. (2005); Aubinet et al. (2012). De este modo se tiene

$$Rn - Qs \approx H + LE \quad (2.3)$$

Sin embargo en muchos otros estudios A y Qs no se calculan y se manejan conjuntamente como el residual (Nordbo et al., 2012):

$$Res = Rn - H - LE = Qs - A \quad (2.4)$$

Si el balance de energía fuese perfecto al realizar una gráfica de dispersión de $Rn - Qs$ vs $(H + LE)$, la correspondencia sería 1:1, $y = x$ (Burba, 2013),

(Offerle et al., 2005). Además si se consideran promedios diarios de $Rn - Qs$ y $H - LE$ en lugar de cada media hora se puede tener una mejora substancial en el cierre del balance de energía (Leuning et al., 2012; Song y Wang, 2012) debido a que el almacenamiento de calor se balancea a lo largo de todo un ciclo diario. Para este trabajo se realizó una gráfica de dispersión Rn vs $H-LE$ calculando su línea de pendiente, y para obtener el porcentaje del residual se calculó la diferencia entre la pendiente y uno. Mientras que para los valores no porcentuales se ocupó ecuación (2.4) .

2.5. Calidad de datos

Las mediciones se realizaron del 22 de octubre de 2018 (día 295 del calendario juliano) al 22 de marzo de 2019 (día 81 del calendario juliano), incluyendo el periodo vacacional de 17 de diciembre 2018 a 7 de enero 2019, con valores promedio cada media hora. Teniendo un total de 152 días medidos que corresponden a 7296 periodos de media hora. De este universo se eliminaron 547 periodos (8 %) de los cuales $\sim 62\%$ fueron por valores del indicador relativo de intensidad de la señal de CO_2 y RSSI menores a $80\% CO_2$, $\sim 9\%$ por lluvias (no se incluye la precipitación cuando se registraban valores bajos del índice anterior), $\sim 6\%$ por fallas humanas, $\sim 14\%$ por falta de datos para promediar medias horas y $\sim 8\%$ por picos electrónicos.

No se ocupó ningún filtro para la velocidad de fricción u^* , la cual es uno de los parámetros para la turbulencia, lo cual podría generar errores durante las mediciones en la noche. Sin embargo el problema del flujo nocturno rara vez se presenta en sitios urbanos (Aubinet et al., 2012) debido a que la turbulencia no decrece mucho ($\sim 10\%$ en el centro de una ciudad). Además u^* es un filtro poco usual en estudios urbanos (Bergeron y Strachan, 2011).

2.6. Aplicación del footprint

Los modelos de footprint se utilizan para describir la extensión espacial y posición del área de superficie que esta contribuyendo a la medida del flujo turbulento en un punto específico en el tiempo (Kljun et al., 2015). En térmi-

nos simples, es el área vista por los instrumentos en la torre. Para este trabajo se muestran modelos de footprint basados en (Kljun et al., 2015), con líneas de contorno de 10 a 90 %, en pasos de 10 %.

Para la elaboración del footprint se utilizó la plataforma online <http://footprint.kljun.net/> que cuenta con una estimación online del área fuente de los flujos según el modelo descrito en Kljun et al. (2015).

Resultados

3.1. Zona climática local	21
3.1.1. Meteorología	22
3.2. Flujos de energía	25
3.2.1. Balance de energía	25
3.2.2. Series de tiempo flujos de energía	28
3.2.3. Patrón diario	29
3.2.4. Comportamiento del flujo de H_2O	30
3.3. Footprint	33
3.4. Flujos de CO_2	37
3.4.1. Serie de tiempo del flujo de CO_2	37
3.4.2. Patrón semanal de los flujos de CO_2	38
3.4.2.1. Aporte vegetal	40
3.4.3. Ciclo diario	40

3.1. Zona climática local

De acuerdo con la clasificación de Stewart y Oke (2012), de donde se obtienen los siguientes valores teóricos, se le asignó una ZCL a la zona de estudio. Existen dos zonas contrastantes: una zona urbana y poco vegetada correspondiente a la región de Santo Domingo y una zona con pocos edificios y áreas verdes como lo es Ciudad Universitaria.

Ciudad Universitaria tiene una ZCL correspondiente a 5 *Open Midrise*, edificios de mediana altura, de 3-9 pisos, con abundancia de cobertura vegetal (plantas bajas y algunos árboles), con materiales de construcción de concreto, piedra, vidrio, conglomerado o madera. La cantidad de cielo visible sobre la tierra sin que lo obstruyan edificios es de 0.5-0.8, la razón de espacio (alto/ancho) es de 0.3-0.75, el porcentaje de área de construcción es del 20-40 %, la fracción de cobertura impermeable en la superficie es de 30-50 %, el porcentaje vegetal o permeable es de 20-40 %, la altura promedio oscila entre 10-25 m. La superficie de admitancia (capacidad para aceptar o liberar calor) es de 1200 a 1800 $Jm^{-2}K^{-1}s^{-1/2}$, la superficie de albedo de 0.12-0.25 y la salida por calor antropogénico (promedio anual) de $< 25Wm^{-2}$.

Santo Domingo, que es una zona altamente poblada, tiene una ZCL de 3 *Compact low rise*, edificios de baja altura, de 1-3 pisos, con pocos o sin árboles, poca cobertura vegetal, superficie mayormente pavimentada, con materiales de construcción de concreto, piedra, baldosa y hormigón. La cantidad de cielo visible sobre la tierra sin que lo obstruyan edificios es de 0.2-0.6, la razón de espacio es 0.75-1.15, el porcentaje de área de construcción de 40-70 %, la fracción de cobertura impermeable en la superficie es de 20-50 %, el porcentaje vegetal o permeable $< 30\%$, la altura promedio entre 3-10 m. La superficie de admitancia de 1200-1800 $Jm^{-2}s^{-1/2}K^{-1}$, la superficie de albedo de 0.1-0.2 y la salida por calor antropogénico es $< 75Wm^{-2}$.

3.1.1. Meteorología

Durante el periodo de estudio la precipitación total fue de 57.7mm.

La temperatura ambiente osciló entre una mínima de $2.5^{\circ}C$ (275.64 K) y una máxima de $28.3^{\circ}C$ (301.46 K) teniendo como media $15.7^{\circ}C$ (288.85 K), diciembre y enero fueron los meses más fríos, y a partir de febrero se comienza a ver un incremento en la temperatura. La humedad relativa promedio fue 49.8 % los valores más altos se registraron en octubre (primeros días del muestreo) y decreciendo levemente a medida que avanzaba el año (figura 3.1).

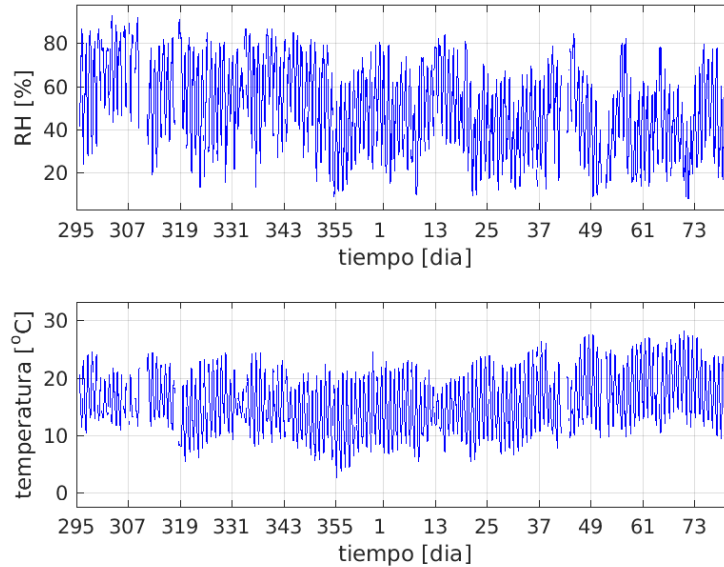


Figura 3.1: Serie de tiempo de la temperatura y la humedad relativa. Arriba la humedad relativa y abajo la temperatura.

Los vientos predominantes a lo largo de todo el estudio fueron del suroeste y la velocidad promedio del viento fue 1.3ms^{-1} (figura 3.2).

A fin de observar las variaciones del viento en un periodo de 24 horas se realizaron rosas de viento separando las horas del día de acuerdo con la salida y puesta del sol.

El patrón del viento durante el día entre las 6:30 y 19:30 hora local muestra una dirección noreste y velocidades que alcanzan hasta 4ms^{-1} (figura 3.3).

La rosa de vientos de la noche muestra vientos de baja intensidad ($< 2\text{ms}^{-1}$) con dirección predominante del suroeste (figura 3.4).

Los cambios drásticos en el patrón de vientos tienen dos implicaciones, relacionadas con la calidad de los datos y el footprint, la primera tienen que ver con la velocidad, y se debe a que con velocidades pequeñas no suele haber suficiente turbulencia por lo que la capa turbulenta decrece e incluso puede no ser medida a la altura de los sensores. La segunda está relacionada con la

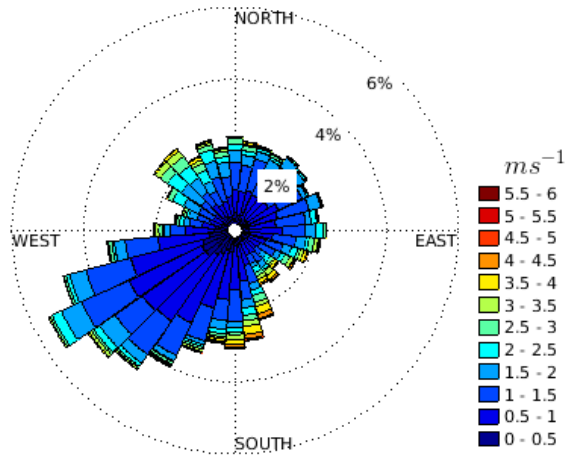


Figura 3.2: Rosa de vientos para el periodo de estudio.

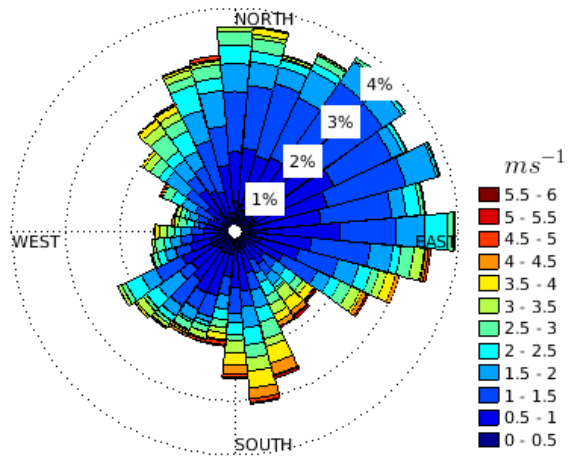


Figura 3.3: Rosa de vientos para el día.

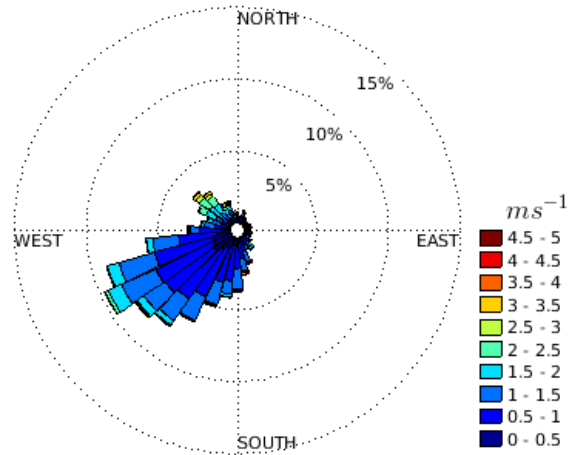


Figura 3.4: Rosa de vientos para la noche.

dirección del viento e influye directamente a las contribuciones del área medida, en otras palabras la extensión y forma de la superficie medida (footprint).

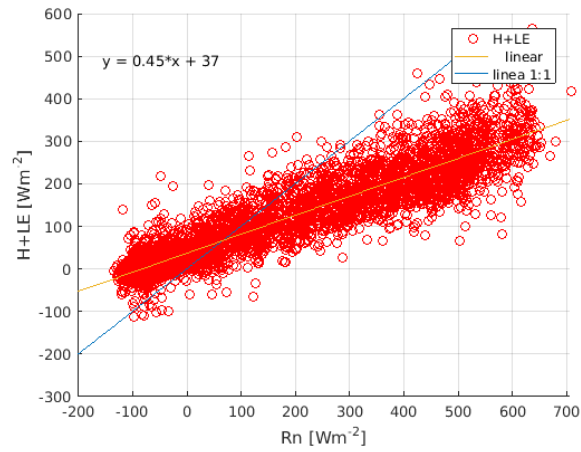
Estos cambios abruptos principalmente se dan en el cambio de día a noche, aunque también se pueden apreciar por patrones estacionales o algún evento meteorológico de escala sinóptica, por ejemplo frentes fríos.

3.2. Flujos de energía

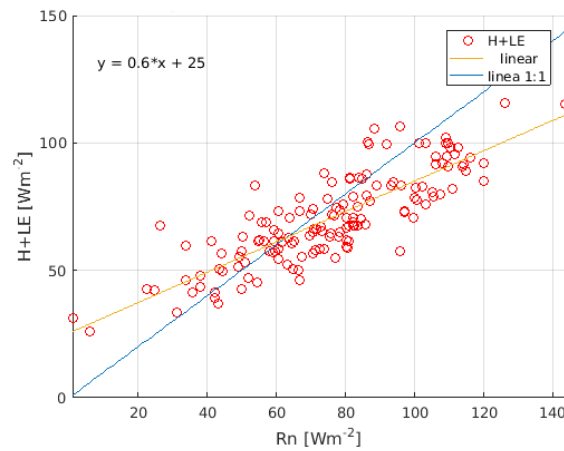
3.2.1. Balance de energía

Los resultados obtenidos con el diagrama de dispersión de Rn vs $H + LE$ para cada uno de los valores de media hora, muestran una $R^2 = 0.88$ y una pendiente de 0.45, es decir, la suma de los flujos turbulentos de calor sensible y latente equivale sólo a un 45% de la energía disponible en el sistema. Este es un nivel de cierre considerablemente bajo, dado que la pendiente promedio de la ecuación de cierre entre los sitios de medición pertenecientes a la red

Fluxnet es de 0.79 ± 0.01 (Wilson et al., 2002).



(a)



(b)

Figura 3.5: Correlación entre los flujos de energía, Rn vs LE+H. a) correlación cada media hora, $R^2 = 0.88$, *pendiente* = 0.45 b) correlación diaria $R^2 = 0.69$, *pendiente* = 0.60.

Tras la mejora con los promedios diarios se obtuvo una pendiente de 0.60 y una $R^2 = 0.70$ (figura 3.5).

Al realizar los promedios diarios en lugar de cada media hora se tiene una mejora del 15 %, aún así, no se tiene un buen balance de energía. Cabe destacar que en este trabajo no se estimó ni midió el flujo de calor antropogénico (A) ni el almacenamiento de calor (Qs), sin embargo al tener dichos valores se esperaría una mejora en el balance de energía. Se profundizará más a detalle en discusiones.

De acuerdo con la correlación de Rn vs $H + LE$ el residual es de un 20 %. El flujo promedio del residual a lo largo del día es $3.8Wm^{-2}$ que equivale a $184.8Wm^{-2}$ en un día.

En el ciclo diario los valores del residual tienen su máximo a las 10:30 horas con $252.7Wm^{-2}$ y con valores mínimos durante la noche que llegan hasta $-93.5Wm^{-2}$, además presenta una asimetría que podría indicar que las tasas de intercambio de A y Qs no van completamente acordes a las horas de luz solar, es decir, el intercambio antes del medio día es mayor que posterior al medio día (figura 3.6).

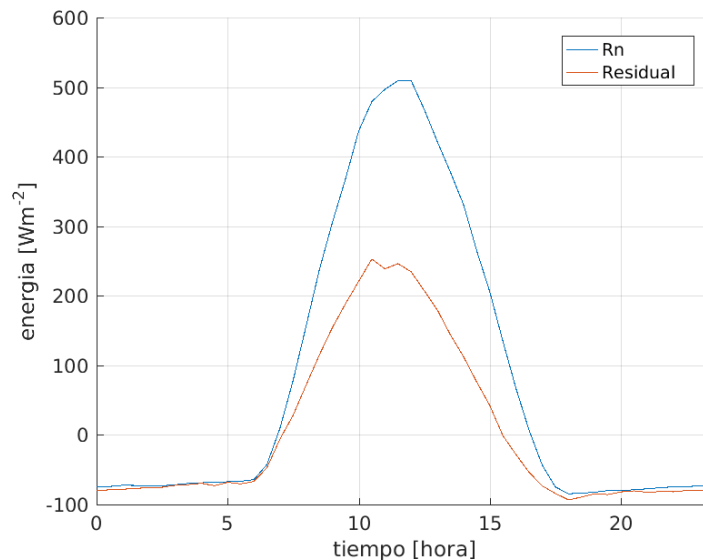


Figura 3.6: Flujo promedio diario de Rn y el residual.

En lo que respecta a la serie temporal del residual con valores promedio del

día (figura 3.7) tiene máximos de $34.1Wm^{-2}$ y mínimos de $-29.4Wm^{-2}$. Presentando el conjunto de valores más elevados en los días más cálidos, últimos días del invierno, los valores más bajos se tuvieron a principios del invierno y durante los primeros días del año. La serie temporal tiene una tendencia positiva con el tiempo.

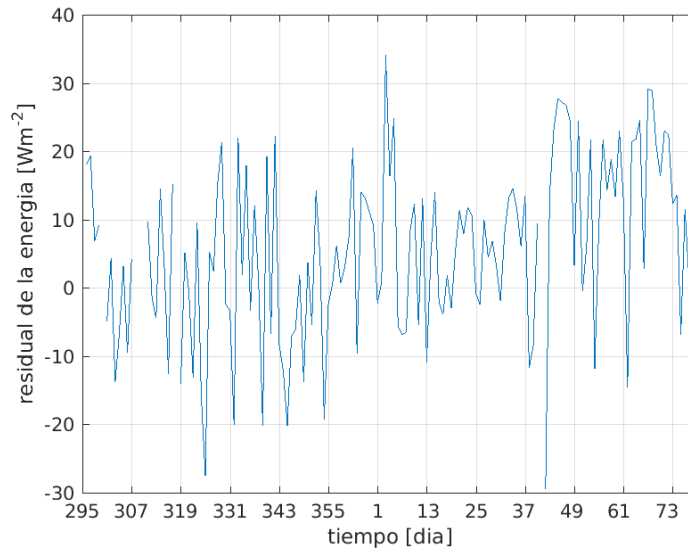


Figura 3.7: Serie de tiempo del residual. Valores promedio cada media hora por día.

3.2.2. Series de tiempo flujos de energía

La radiación neta promedio fue $76.1Wm^{-2}$, la radiación neta decrece de octubre a diciembre, y se mantiene más o menos constante hasta finales de enero donde se observa un incremento gradual, coincidiendo los meses de menor radiación con los meses más fríos (figura 3.1). El calor latente tiene un promedio de $24.3Wm^{-2}$, su comportamiento es similar a la radiación neta, disminuye gradualmente y a finales de enero comienza a aumentar. En cuanto al calor sensible el promedio fue $46.4Wm^{-2}$ y su tendencia es similar al calor

latente y radiación neta (valores decrecen hasta diciembre y enero, y después comienzan a aumentar) sin embargo, no es tan marcada (figura 3.8).

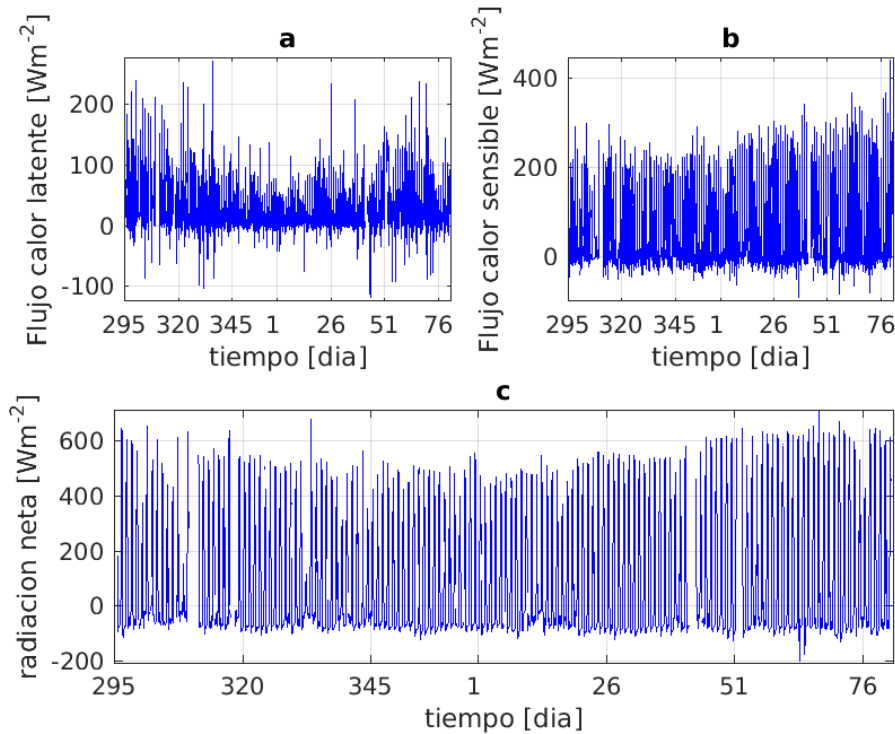


Figura 3.8: Serie de tiempo de los flujos de energía. En a) el calor latente, en b) el calor sensible, y en c) la radiación neta.

3.2.3. Patrón diario

El patrón diario es muy claro, en la noche los flujos de energía (Rn , H y LE) fueron muy bajos (cerca de cero o incluso por debajo de cero), y aproximadamente a las 6:00 horas los flujos aumentaron, su punto máximo lo alcanzan aproximadamente al medio día, después disminuyen, y al llegar la noche los valores se mantienen constantes. Al medio día la radiación neta se observó arriba de los $500Wm^{-2}$, el calor latente aproximadamente $75Wm^{-2}$ y el calor sensible $200Wm^{-2}$. La suma del calor latente y del calor sensible debe compensar la radiación neta, por ello es común sumarlas y graficar su ciclo diario con el de la radiación neta (figura 3.9), el espacio entre las dos curvas

es la energía faltante para cerrar el balance energético.

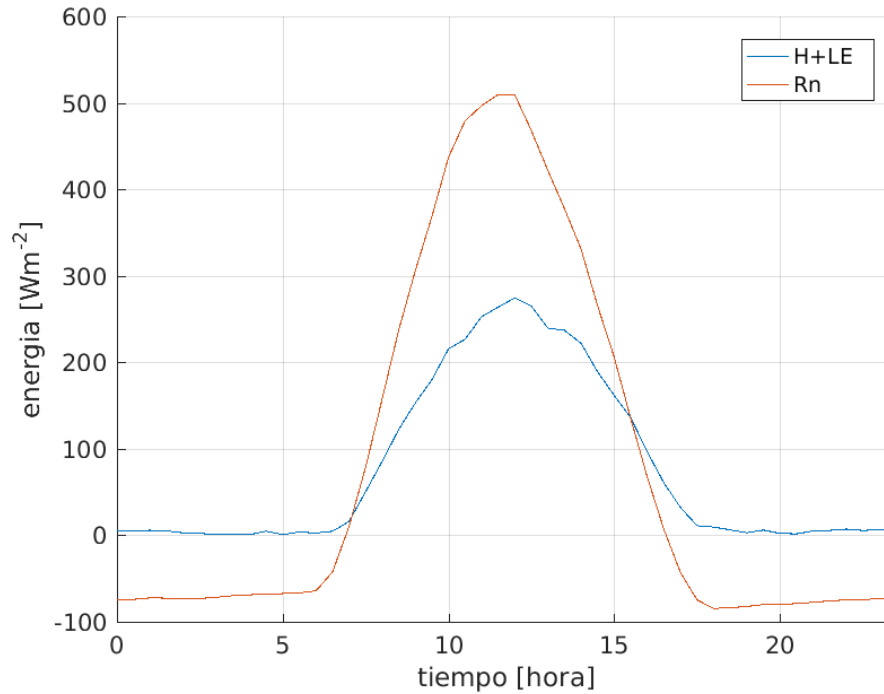


Figura 3.9: Flujo promedio diario de Rn y LE+H.

3.2.4. Comportamiento del flujo de H_2O

Los ciclos diarios del vapor de agua de entre semana y fines de semana tienen una pequeña variación en su forma, pese a que el flujo máximo de ambos se encuentra al mediodía y es aproximado a $1.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en los fines de semana de 12 a 13 horas hay un descenso abrupto, mientras que entre semana es gradual, cabe destacar que se tiene una variabilidad considerable en los datos.

No se encontró diferencia entre los flujos de vapor de agua con respecto a los días entre semana y fines de semana (figura 3.10). Con el fin de diferenciar el comportamiento de los flujos entre los días laborables y los no laborables se separó el periodo de vacaciones administrativas las cuales fueron del 17 de

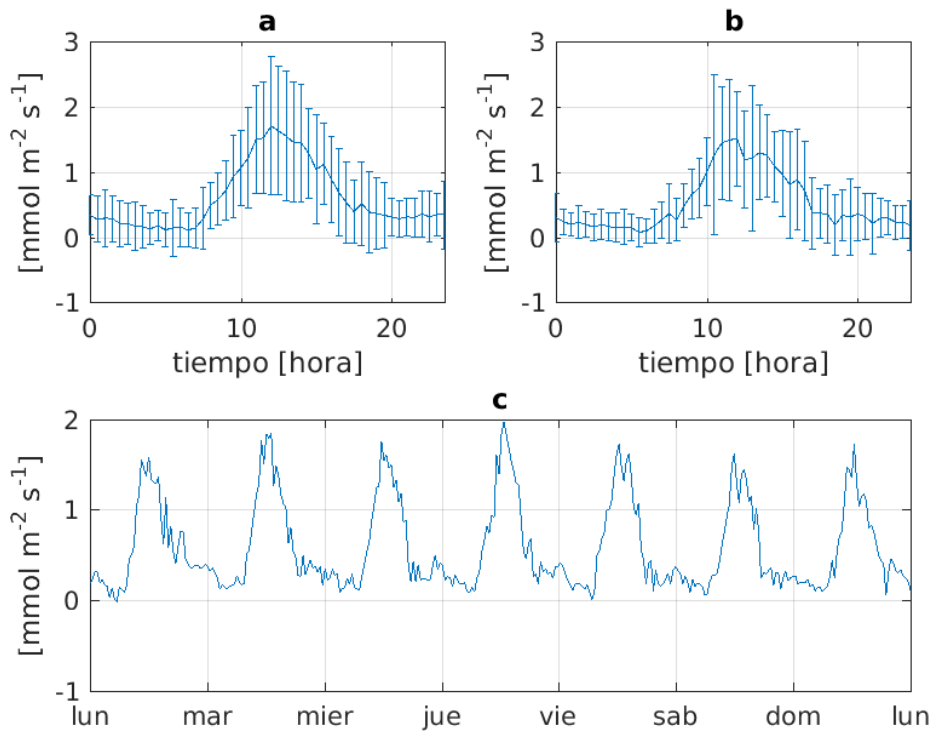


Figura 3.10: Flujos diario y semanal de H_2O correspondiente a los días laborales. a) ciclo promedio diario para los días entre semana, b) ciclo promedio diario para fines de semana y c) el ciclo semanal.

diciembre de 2018 al 7 de enero de 2019. Durante este periodo los flujos disminuyeron de manera general a lo largo de toda la semana, aunque si se toma en cuenta sus barras de error no tienen diferencias entre sí, sus máximos fueron alrededor de $1.2 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ manteniendo valores similares entre semana y fines de semana estos resultados se pueden deber a que durante este periodo se presentaron los días más fríos del año, donde las tasas evaporativas son menores (figura 3.11).

Para ver el comportamiento de las tasas evaporativas a lo largo del estudio se realizó una serie de tiempo de las tasas evaporativas (LE/R_n) figura 3.12 en la cual se aprecia que de manera general que en los días más fríos existe una menor tasa evaporativa, teniendo algunas anomalías en los primeros días del

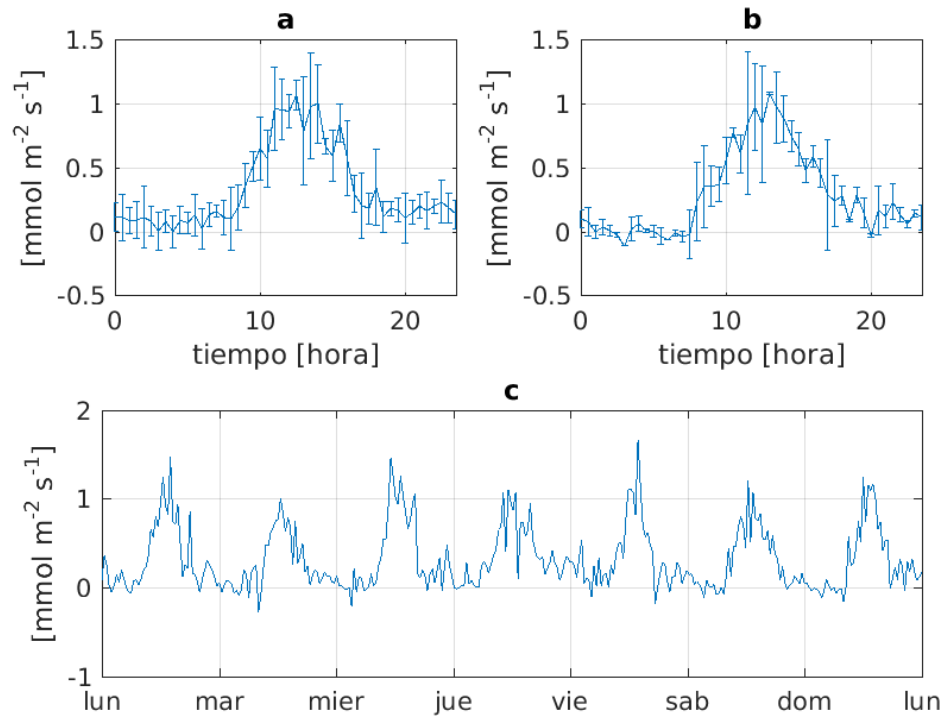


Figura 3.11: Flujos promedios de H_2O correspondientes al periodo vacacional. En a) se tienen ciclo promedio diario para los días entre semana, en b) ciclo promedio diario para fines de semana y en c) ciclo promedio diario semanal.

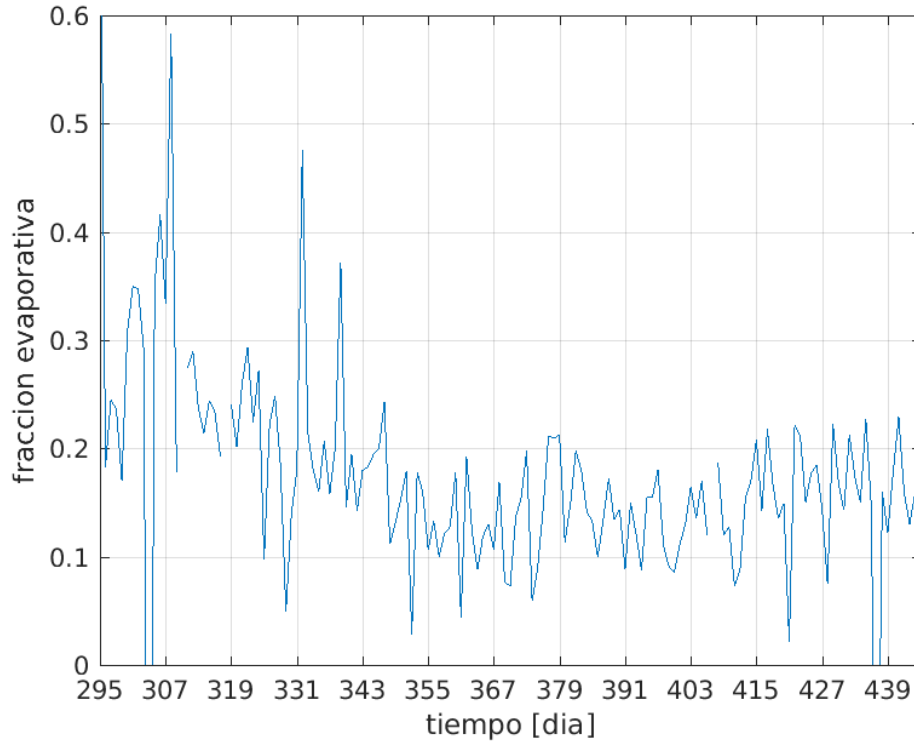


Figura 3.12: Serie de tiempo de los promedios diarios de las tasas evaporativas de H_2O .

estudio (octubre), sin embargo los días más fríos coinciden en gran parte con las vacaciones administrativas y el periodo intersemestral por lo que también es posible que el patrón de los flujos de H_2O este relacionado con la actividad de riego en jardines realizadas en las zonas aledañas al sitio de estudio.

3.3. Footprint

El footprint de todo el periodo de estudio tiene un diámetro aproximado de 800 m, que es menor al estimado de 100m en longitud por cada metro de altura, pero hay que recordar que ese estimado es en condiciones ideales, la longitud del footprint disminuye considerablemente con los edificios y la rugo-

sidad del terreno (Burba, 2013).

La mayor parte del footprint durante todo el periodo de estudio está comprendida por Ciudad Universitaria (figura 3.13), aunque se alcanzan a registrar parte de las emisiones del paradero del metro Universidad y también del paradero del pumabús. Hay que recordar que los footprint aquí presentados son con isolíneas de 10 a 90 % con pasos de 10 %, las contribuciones promedio del footprint más representativas son las del 70 % con $X_{70\%} = 252.2m$. Mientras que las contribuciones promedio al 50 % y 70 % son $132.2m$ y $772.6m$ respectivamente.

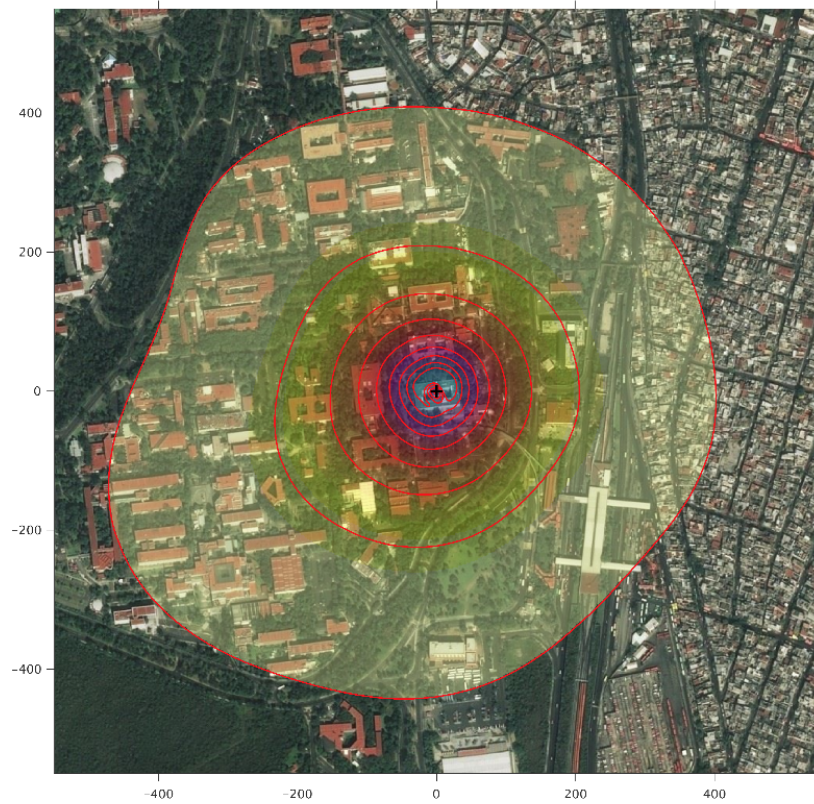


Figura 3.13: Footprint de los flujos para todo el periodo de muestreo.

Basándose en las contribuciones del footprint al 70 % la gran mayoría de los flujos provienen de Ciudad Universitaria y más concretamente de las edificaciones cercanas al CCA, las principales fuentes provienen de las avenidas aledañas al sitio de estudio, la cual es la fuente principal de contribuciones automovilísticas.

Al realizar footprints separando el día y la noche (figura 3.14), (figura 3.15) respectivamente se observan dos áreas comprendidas muy distintas entre sí, esto se debe al patrón de vientos. El footprint durante el día abarca tanto la zona de Santo Domingo como de Ciudad Universitaria (contribuciones al 90 %), y tiene un diámetro aproximado de 700 m. En la noche no se observan flujos provenientes de Santo Domingo (contribuciones al 90 %), pero aún se conserva una pequeña parte del paradero y del metro universidad. Del sitio donde se tienen los sensores hacia Santo Domingo se tiene un aproximado de 300 m, mientras que en la dirección opuesta alcanza un máximo de hasta 600 m de longitud.

Tomando en cuenta únicamente las contribuciones al 70 % en ambos casos solo abarca Ciudad Universitaria, y en la noche el área en dirección a Santo Domingo se ve reducida considerablemente además de presentar una clara inclinación hacia el oeste.

Se realizó una secuencia de footprints en el tiempo, para ver cual era su evolución a lo largo del año, esta secuencia es dependiente de los patrones de viento que se tenían, por ello primero se determinaron los patrones de viento. Se obtuvieron 17 patrones de viento a lo largo del estudio, y por ende 17 footprints (capítulo 8).

Este análisis nos ayuda a ver en que momento se tiene una ampliación o reducción del área fuente a lo largo del muestreo, que a su vez nos puede ayudar a explicar el aumento o disminución en los flujos.

Los footprints fueron diferentes entre si, los momentos en los que se registró una mayor área fuente de Santo Domingo (al 90 %) fue en los días 330-336 del 2018 y 42-48 del 2019.

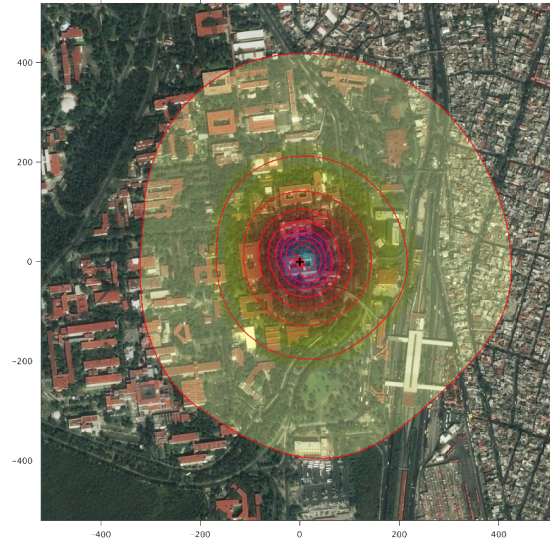


Figura 3.14: Footprint de los flujos para el día.

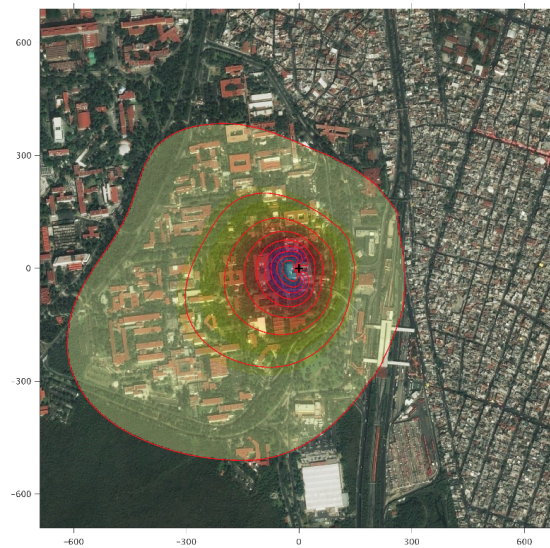


Figura 3.15: Footprint de los flujos para la noche.

3.4. Flujos de CO_2

3.4.1. Serie de tiempo del flujo de CO_2

El promedio de los flujos de CO_2 fue de $3.5 \pm 5.9 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, con máximas de $34.9 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ y mínimas de $-19.9 \mu mol m^{-2} s^{-1}$.

En la serie de tiempo (figura 3.16) los flujos muestran un patrón relativamente homogéneo, sin embargo en los últimos días del mes de noviembre se observa una disminución en el valor de los flujos que se puede relacionar con la actividad antropogénica dentro de Ciudad Universitaria, las actividades tanto de personal como vehiculares disminuyen por ser un periodo de exámenes finales para solo algunos de los estudiantes, de tal manera que la movilidad se reduce lo cual se ve reflejado en los valores del flujo de CO_2 , después al haber concluido los cursos escolares varias instalaciones se mantienen cerradas y la actividad humana decrece aún más, en el periodo intersemestral (10 al 14 de diciembre y del 7 al 25 de enero) disminuyen otro poco los valores del flujo. En las vacaciones administrativas (17 de diciembre al 4 de enero) las actividades académicas cesan por completo y Ciudad Universitaria se mantiene cerrada en su totalidad, la única actividad es debida a mantenimiento de las instalaciones y a la presencia de personal pero en tiempos muy cortos, en este periodo se registran los niveles mínimos en el flujo de CO_2 , llegando a estar en gran parte del día por debajo de cero, es decir, actuando como sumidero. Al concluir las vacaciones administrativas nuevamente viene el periodo intersemestral y con ello un incremento en los flujos, para después dar inicio a las actividades regulares donde los flujos retoman valores elevados (encima de cero) en comparación con el periodo intersemestral o vacacional.

En el caso de la zona comercial aledaña a Ciudad Universitaria su actividad está muy relacionada con los periodos laborales y de vacaciones por lo que, la disminución de los flujos puede ser también a la baja actividad comercial a los alrededores de la Ciudad Universitaria.

Es importante mencionar que si bien los flujos durante la temporada de vacaciones disminuyen en la serie de tiempo se observan flujos que indican la existencia de fuentes netas de CO_2 las cuales pueden provenir de la colonia Santo Domingo.

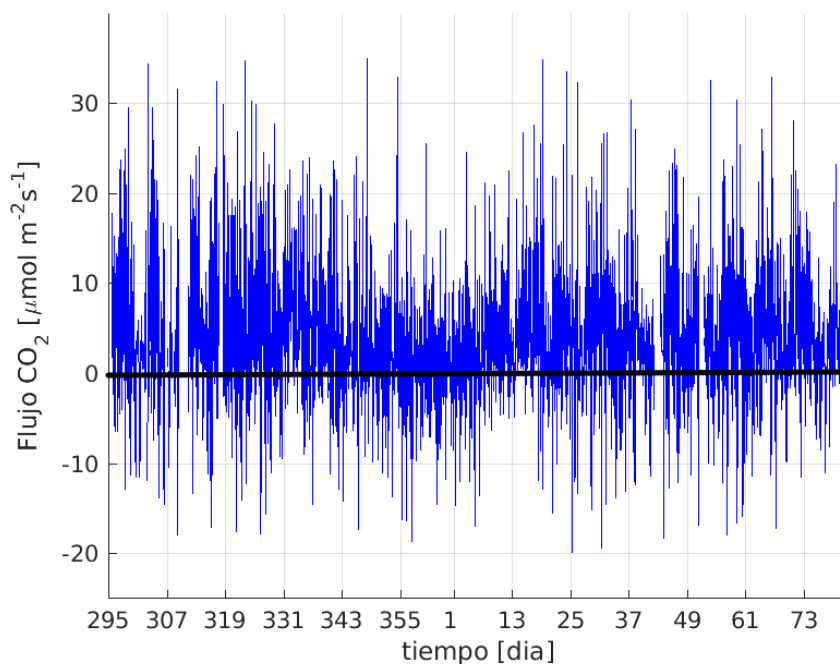


Figura 3.16: Serie de tiempo del flujo de CO_2 durante todo el periodo de estudio.

3.4.2. Patrón semanal de los flujos de CO_2

El flujo promedio semanal de CO_2 durante el periodo de actividades académicas fue $4.0 \pm 2.6 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, el flujo máximo $11.0 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y el mínimo $-4.8 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. La tendencia semanal presentó 2 patrones, uno que abarca los días entre semana (laborables) y en otros fines de semana. De lunes a viernes, días en que Ciudad Universitaria tiene actividades regulares, los flujos promedio oscilaron entre 1.5 y $10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ considerando un flujo neto de CO_2 hacia la atmósfera en tanto, los fines de semana se observó una clara disminución en las emisiones de CO_2 , registrando flujos que oscilaron entre -4.8 y $5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Estos resultados indican que durante un periodo del día la superficie actúa como sumidero neto de CO_2 .

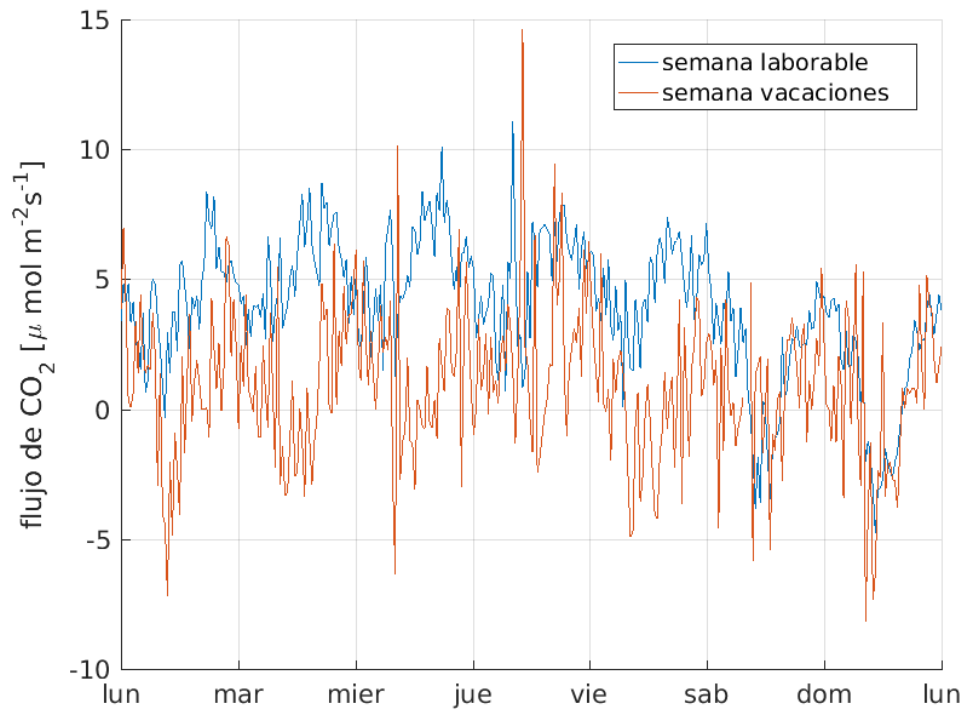


Figura 3.17: Valor promedio de los flujos de CO_2 en los días de la semana durante todo el muestreo .

Durante el periodo vacacional el flujo semanal promedio fue de $0.9 \pm 2.9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, el máximo de $14.0 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y el mínimo de $-8.2 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 3.17).

El patrón observado indica que en todos los días de la semana se mantiene una variabilidad similar a lo largo del día mostrando periodos donde el sistema se comporta como una fuente neta de CO_2 y en otro momento como sumidero.

3.4.2.1. Aporte vegetal

Al considerar los flujos más bajos del estudio (los fines de semana de vacaciones) como un aporte puramente de la vegetación entonces tenemos ecuación (3.1):

$$Fc = \cancel{E_T} + \cancel{E_B} + \cancel{R_H} + (R_S + R_V - P_V) = 0.03 \pm 0.13 \text{molm}^{-2}\text{d}^{-1} \quad (3.1)$$

Tomando como referencia los flujos de entre semana de los días laborables (flujos más altos y también más numerosos estadísticamente) con un valor de $0.4 \text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$, el porcentaje que correspondería a la parte biogénica sería 7.5% sin embargo, su rango de error es de $\pm 32\%$ lo que puede convertirlo en un valor increíblemente grande (-24.5% a 39.5%), contrario a lo esperado es posible que el sistema actué como una fuente.

3.4.3. Ciclo diario

El promedio diario de los flujos de CO_2 entre semana fue de $0.4 \pm 0.1 \text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$, los flujos oscilaron entre un límite máximo de $8.0 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y un mínimo de $2.3 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 3.18). Se presenta un pequeño pico entre 6:00 y 7:00 horas, estos flujos pueden atribuirse a la combustión ocasionada por los vehículos de la zona aledaña y a la entrada de personal a la universidad, la otra hora pico (horas con mayor actividad, incluyendo vehicular y antropogénica) se presentó a las 17:30 siendo esta la más alta con un valor promedio de $8.0 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, que correspondería al flujo ocasionado por los vehículos internos de Ciudad Universitaria al finalizar su mayoría la jornada laboral.

En este estudio se presenta una meseta intermedia entre 2 picos máximos de flujos (matutino y vespertino) y de una duración mucho más extensa, de

12:00 horas hasta las 15:30 horas con valores que van de $5.6\mu mol m^{-2} s^{-1}$ a $6.7\mu mol m^{-2} s^{-1}$, estas horas no suelen ser una hora pico en la mayoría de las ciudades sin embargo, se puede relacionar de manera directa con el tráfico al interior de Ciudad Universitaria (carros que se transportan de una facultad o instituto a otro y las rutas de autobuses al interior de la Ciudad Universitaria), dejando en un papel secundario a las fuentes alrededor de Ciudad Universitaria, las cuales parecen tener un rol más importante en el pico de la mañana.

El promedio diario de los flujos de CO_2 en fines de semana fue de $0.1 \pm 0.12 mol m^{-2} d^{-1}$, con máxima de $4.5\mu mol m^{-2} s^{-1}$ y mínima de $-3.5\mu mol m^{-2} s^{-1}$. Los flujos presentan valores mucho menores a los días entre semana, y el patrón cambia por completo, ya no se aprecia un pico matutino se observa un pico vespertino a las 18:00 horas pero con valores relativamente bajos de emisiones $3.3\mu mol m^{-2} s^{-1}$. De 8:00 hasta las 14:30 horas el sistema actúa como un sumidero neto. Los valores bajos en el flujo de CO_2 se pueden relacionar a que durante el fin de semana disminuye el aforo vehicular dentro de la Ciudad Universitaria y al proceso de fotosíntesis ya que en el interior de Ciudad Universitaria existen zonas arboladas extensas.

En vacaciones para los días entre semana el promedio diario de los flujos fue de $0.1 \pm 0.11 mol m^{-2} d^{-1}$, máxima de $3.6\mu mol m^{-2} s^{-1}$ y mínima de $-3.5\mu mol m^{-2} s^{-1}$ (figura 3.18). La primer hora pico se tiene de 6:30 a 7:00 horas y una segunda hora pico a las 18:00 horas, a las 21:00 los flujos vuelven a subir. De 7:00 a 15:30 horas los flujos son cercanos a cero o bien un sumidero.

Durante el periodo vacacional el promedio diario de flujo de CO_2 en fines de semana fue de $0.03 \pm 0.13 mol m^{-2} d^{-1}$, con un máximo de $4.5\mu mol m^{-2} s^{-1}$ y un mínimo de $-3.8\mu mol m^{-2} s^{-1}$, cabe destacar que para este caso la muestra estadística es muy pequeña y únicamente se compone de 4 días. Los picos que se pueden observar son a las 8:00 horas con un flujo de $4.5\mu mol m^{-2} s^{-1}$ y a las 19:00 horas con $3.8\mu mol m^{-2} s^{-1}$.

Los valores de los flujos en vacaciones son mucho menores que en el resto de los días, el flujo diario es muy bajo en ambos sentidos tanto en emisión como en captura, estando muy cercano a cero en gran parte del día. Las tendencias diarias presentaron diferentes patrones, principalmente en su número de picos de valores elevados. Los alrededores de Ciudad Universitaria (Santo Domingo) tienen un ritmo y Ciudad Universitaria tiene otro ritmo que no necesariamente

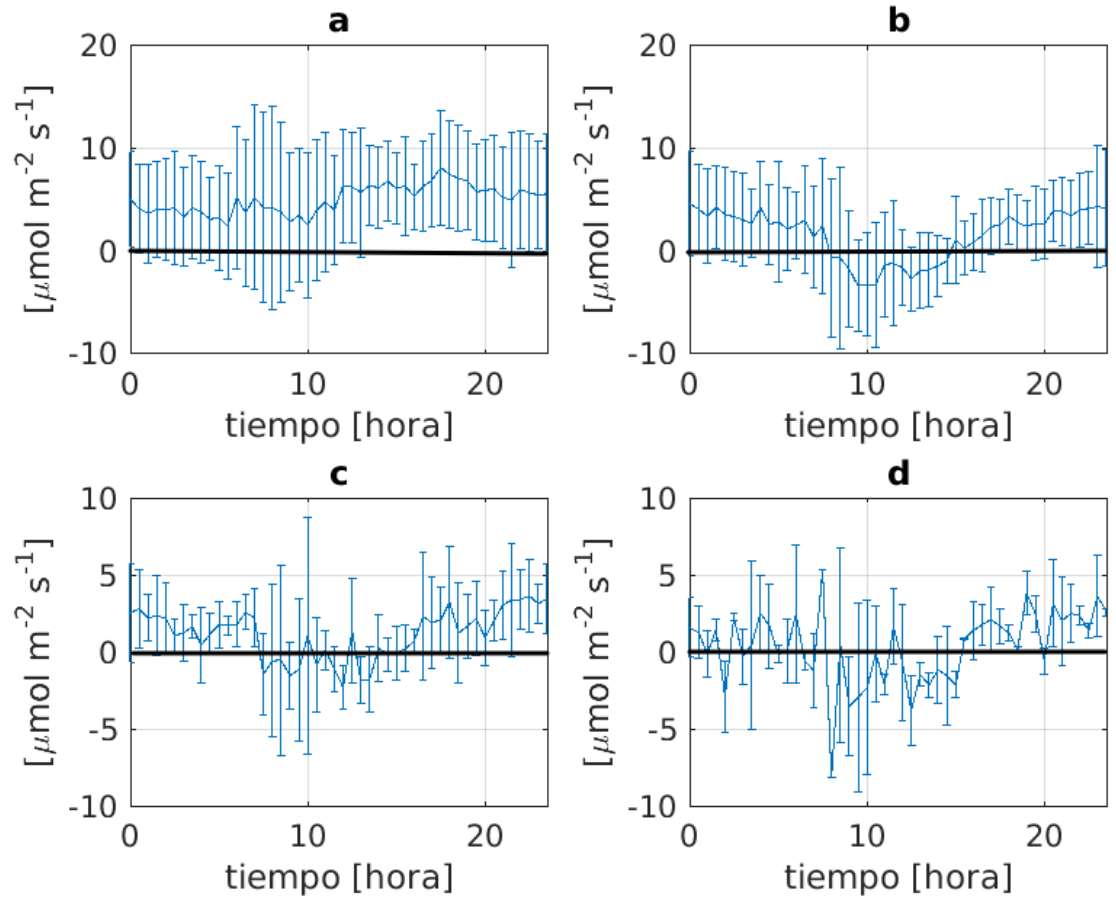


Figura 3.18: Flujo promedio diario de CO_2 durante todo el estudio. En a) el ciclo diario entre semana, b) en fines de semana, c) días entre semana de vacaciones y d) fines de semana de vacaciones.

te es igual, sin embargo los sensores captan los flujos de todas las horas pico: Universidad y Santo Domingo (alrededores de la universidad).

Otro factor que puede incrementar los flujos de CO_2 es que en los alrededores se encuentra el metro Universidad y alberga uno de los paraderos de autobuses de la ciudad. Por otra parte, dentro de la universidad y no muy lejos de la torre de flujos se encuentra un paradero de camiones internos que alberga vehículos de 5 rutas.

Discusión

4.1. Certeza del balance energético	44
4.2. Relación de los footprints y los flujos de CO_2	46
4.3. Análisis temporal de los flujos de CO_2	47
7.1. Eddy Covariance	53

4.1. Certeza del balance energético

El balance de los flujos energéticos es hasta cierto punto análogo a los flujos del gas de interés, un mal balance suele ser un indicador de subestimación de los flujos. Una forma en la que influye directamente tener malas mediciones de H y LE (balance de energía) es en la propagación de los errores de la corrección WPL (ver anexos), la cual puede alterar los flujos en un rango de 0-50% (Burba, 2013). En la ecuación WPL ecuación (4.1) la evapotranspiración modifica el término de dilución del agua, mientras que el calor sensible modifica el término de expansión térmica.

$$Fc = \overline{w'q'_c} + \mu \frac{E}{\rho_d} \frac{\overline{q_c}}{1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d}} + \frac{H}{\rho C_p T_a} \overline{q} - \left(1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d}\right) \frac{\overline{w'P'}}{\overline{P}} \overline{q_c} \quad (4.1)$$

donde: Fc es la corrección final del flujo, E la evapotranspiración, H calor sensible, P presión del aire, q_c promedio de densidad de CO_2 , ρ_d densidad de aire seco, ρ_v densidad del vapor de agua, ρ densidad del aire, C_p calor específico

del aire, T_a temperatura ambiente en K y μ la razón mol (masa de aire en agua).

En el estudio se tuvo un cierre de balance del 60 % por lo que en una primera instancia pareciera indicar una subestimación de los flujos sin embargo, la suma de la radiación neta y el flujo de calor del suelo en la gran mayoría de los casos es mayor que la suma del calor sensible y calor latente. Se ha aceptado como un buen cierre de balance de energía en sistemas no urbanos aproximadamente el 80 % (Aubinet et al., 2012) y en ciudades este porcentaje suele ser aún menor. En estudios de ciudades donde se ha utilizado la correlación para estimar el cierre energético se tienen los siguientes valores: Phoenix, Estados Unidos ZCL5 84 %, ZCL6 90 %, ZCL8 64 %, ZCL9 84 % (Templeton et al., 2018), Kansas, Estados Unidos 95 % (Balogun et al., 2009), todos ellos con una estimación de Q_s , el cual puede ser de hasta el 60 % de la radiación neta (Aubinet et al., 2012). De acuerdo con Nordbo et al. (2012) la subestimación con los flujos urbanos comúnmente es observada alrededor del 20 %.

Estudios en ciudades en 2 términos cobran relevancia, el antropogénico (A) y el almacenamiento (Q_s), que pese a que no se pudieron medir se manejan conjuntamente como el residual teniendo un rango promedio por media hora de $-29.4Wm^{-2}$ a $34.1Wm^{-2}$ y de acuerdo con la correlación lineal el equivalente al 40 % de la energía en el sistema. Comparando estos valores con otros estudios el residual es inferior al 57 % en Montreal, Canada (Lemonsu et al., 2008), 57 % Montreal rural, 46 % Montreal suburbios, 47 % Montreal urbano, Canada (Bergeron y Strachan, 2012), 49 % Vancouver, Canada, (Grimmond y Oke, 1999). Pero mayor al 36 % de Basilea, Suiza (Christen y Vogt, 2004), 37 % Lodz, Polonia (Offerle et al., 2005), 24 % Helsinki, Finlanda (Nordbo et al., 2012), 26 % Tokyo, Japón (Moriwaki y Kanda, 2004), Chicago, Estados Unidos (Grimmond y Oke, 2002), 22 % Kansas, Estados Unidos (Balogun et al., 2009). En términos generales nuestro residual es mayor al promedio lo que podría indicar que hay una subestimación de los flujos o que los términos de almacenamiento y antropogénico son bastante grandes.

El gran problema en la ecuación de balance de energía en urbes es Q_s , puesto que las características tridimensionales de las ciudades tienden a incrementar la absorción de calor comparado con un área plana además de que decrece la pérdida de calor sensible por transporte turbulento. Y a pesar de que existe un balance energético diario, el ciclo diario en ciudades no presenta una simetría en sus flujos de energía lo que sugiere que el balance diario no es

perfecto (Oke et al., 2017).

En gran parte de los estudios se intenta omitir el término A para ello asumen un superficie urbana extensa y relativamente homogénea donde las diferencias horizontales son despreciables (Feigenwinter et al., 2018). Sin embargo, las ciudades rara vez cumplen estas características, de acuerdo con Oke et al. (2017) la ZCL3 (Santo Domingo) y ZCL6 (parecida a Ciudad Universitaria) producen de 30-100 y de 5-50 Wm^{-2} por hora respectivamente. Por lo que este flujo no es despreciable.

Dejando de lado las dos principales causas en el desbalance energético (A y Q_s) también se tiene la carencia de un ciclo anual con el que se pueden balancear los flujos con las entradas y salidas a lo largo del año, teóricamente no se toman en cuenta los flujos de calor del suelo sin embargo, la cobertura natural de la superficie es cercana al 20% (en estudios urbanos no se suele tomar en cuenta el término G), otro factor que puede influir aunque en mucha menor proporción es la advección y aunque en Oncley et al. (2007) se diga que puede jugar un rol significativo, en la mayoría de los estudios se asume insignificante (Barlow, 2014).

De acuerdo con lo reportado en los estudios anteriormente presentados y la teoría es posible decir que se tiene una buena calidad en las mediciones, y de tener los términos faltantes en la ecuación el balance cerraría de mejor manera, también se asume que existe una subestimación en los flujos pero se estima que es de un 20% o menor.

4.2. Relación de los footprints y los flujos de CO_2

Al observar las contribuciones del footprint únicamente al 70% se puede identificar en toda la parte este una vía principal dentro de Ciudad Universitaria (circuito de investigación científica) así mismo, los vientos predominantes durante el día son del noreste por lo que esta arteria vehicular se considera la fuente principal de flujos de CO_2 . Sin embargo, al relacionar los patrones de viento con la serie de tiempo de flujos de CO_2 no parece haber una corres-

pondencia clara, lo que indica que la influencia temporal tiene un peso mucho mayor que la dirección del viento. Y aunque en menor medida también es posible que el equipo este midiendo flujos de CO_2 de otra fuente que en algún momento pueda tener una mayor relevancia que el circuito de investigación científica.

4.3. Análisis temporal de los flujos de CO_2

En las series de tiempo de CO_2 se aprecian los flujos mínimos durante el periodo vacacional diciembre-enero, que resulta coincidir con algunos de los días más fríos, en algunos trabajos (Velasco y Roth, 2010; Moriwaki y Kanda, 2004; Coutts et al., 2007; Soeggard y Moller-Jensen, 2003; Pawlak et al., 2011) mencionan que la variación estacional en los flujos de CO_2 en ciudades ubicadas en latitudes medias presentan los valores más altos durante el invierno y que parte de ese incremento se debe a una mayor combustión por calefacción. En nuestro estudio, los bajos valores en los flujos de CO_2 se relacionan mayormente con la disminución de emisiones antropogénicas dado que la movilidad en Ciudad Universitaria durante éste periodo es mínima además de que, en pocas edificaciones en la ciudad de México se usa calefacción durante el invierno.

Al igual que en la mayoría de las ciudades, el flujo observado es mucho mayor en los días entre semana que en los días de fin de semana. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Coutts et al. (2007); Velasco et al. (2016); Velasco y Roth (2010). En el caso de un estudio realizado en El Cairo Burri et al. (2009) reportó diferencias en su tendencia semanal aunque en éste caso se debe a una festividad religiosa (Sabbath) que ocasiona que el viernes sea el día con los menores flujos y no los fines de semana.

En los estudios realizados en ciudades el periodo vacacional no suele tener tanta importancia como lo es en este estudio, pero si tiene la misma tendencia que en los fines de semana solo que mucho más marcado en el decremento de los flujos.

El flujo diurno de CO_2 en las ciudades se caracteriza por tener dos picos de altos valores que corresponden a las horas de mayor tráfico relacionado con el inicio y término de la jornada laboral así como, flujos más bajos en horas

intermedias (Grimmond et al., 2004; Moriwaki y Kanda, 2004; Liu et al., 2012; Pawlak et al., 2011). Este patrón varía de ciudad en ciudad, considerando las costumbres y ritmo de vida de los pobladores en el caso de Basilea, Suiza (Vogt et al., 2006) menciona que los flujos máximos se presentan a las 18:00 horas, que corresponde al termino de la jornada laboral. (Burri et al., 2009) indica que en El Cairo, Egipto, únicamente se presenta un pico con altos flujos entre 13:00 y 15:00 horas. Ciudades como Chicago, EUA donde el flujo se mantiene constante a lo largo del día y muy cercano a 0 (Grimmond y King, 2002).

En este estudio el flujo presenta 2 periodos de flujos de valores altos uno matutino y otro vespertino, y una meseta intermedia entre estos dos picos de valores elevados. La explicación a este patrón de comportamiento es que la movilidad de Ciudad Universitaria y sus alrededores está ligada principalmente a las actividades diarias de entrada y salida de personal y estudiantes; el primer pico corresponde al inicio de actividades en la zona de Santo Domingo aledaña a la Ciudad Universitaria y a su influencia sobre la universidad, la meseta se debe principalmente a la movilidad dentro de Ciudad Universitaria y las actividades desarrolladas ahí, el tercer pico corresponde al habitual pico vespertino aunque anticipado, donde la mayor parte del personal y alumnos terminan sus actividades y regresan a sus casas, cabe destacar que en éste periodo es donde se observa el mayor flujo de CO_2 .

El flujo promedio diario en éste estudio fue de $3.5\mu molm^{-2}s^{-1}$ que resulta mayor al flujo de ciudades como Telok Kurao, Singapur con $1.3\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Velasco et al., 2016), Chicago, EUA con un rango de $-16\mu molm^{-2}s^{-1}$ a $25\mu molm^{-2}s^{-1}$, para este caso solo fue menor en horas específicas (Grimmond y King, 2002) sin embargo, fue menor a ciudades como Lódz, Polonia $7.7\mu molm^{-2}s^{-1}$, Basilea, Suiza $12.5\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Vogt et al., 2006), Beijing, China $18.9\mu molm^{-2}s^{-1}$, Montreal, Canada $20\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Bergeron y Strachan, 2011), Londres, Inglaterra $33.3\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Helfter et al., 2011), Florencia, Italia $25\mu molm^{-2}s^{-1}$, Cd. México, México $19.3\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Velasco et al., 2014).

Al realizar el promedio diario de los flujos únicamente para los días entre semana se obtuvo $4.0\mu molm^{-2}s^{-1}$, con una máxima y una mínima de $11.0\mu molm^{-2}s^{-1}$ y $-4.8\mu molm^{-2}s^{-1}$ respectivamente. Aún cuando estos valores promedio son más elevados, continúan siendo mucho menores a otras ciudades como Tokio $4.5\mu molm^{-2}s^{-1}$ a $11.4\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Moriwaki y Kanda,

2004), Pekin $15.9\mu molm^{-2}s^{-1}$ a $31.8\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Liu et al., 2012).

En la Ciudad de México, en la Colonia Escandón, se realizó un estudio de los flujos de dióxido de carbono con una duración de 15 meses (junio 2011-septiembre 2012), los resultados muestran 2 picos, uno empieza a las 6:00 y el otro a las 17:30 horas con flujos promedio de $\sim 31.4\mu molm^{-2}s^{-1}$ (Velasco et al., 2014). En el mismo estudio se reporta que los flujos disminuyen considerablemente en fines de semana, al igual que en Ciudad Universitaria.

Si bien el comportamiento es similar en ambos sitios de estudio (Colonia Escandón y Ciudad Universitaria), la hora de los picos de flujos máximos está desfasada lo que se atribuye a los ritmos de movilidad distintos que tienen ambos lugares, en la Universidad los flujos se ven fuertemente influenciados por las actividades académicas, de ahí el gran decremento en vacaciones y fines de semana, además en Ciudad Universitaria existe una gran cantidad de árboles que si bien, no compensan las fuentes de CO_2 pueden ayudar a mitigar dichos flujos, observando un papel importante de la vegetación en un ambiente urbano como lo es referido por (Velasco et al., 2013).

En cuanto al aporte vegetal se estimó de $7.5\% \pm 32$ de los flujos en el sistema. En caso que nuestro sistema actué como fuente no sería de sorprender, en Velasco et al. (2013) estimó este valor con un 4% en Singapur, pero en Ciudad de México este valor se estimó de -1.4% (Velasco et al., 2014). Gran parte del estudio aquí presentado se desarrollo en otoño e invierno, meses donde algunos árboles pierden parte de su cobertura vegetal, que si bien no son la totalidad de los árboles en Ciudad Universitaria influyeron en el secuestro de carbono, otra causa para que la parte biogénica pudiera actuar como fuente es el tipo de vegetación pues en gran parte de los jardines de Ciudad Universitaria hay plantas ornamentales o con poca biomasa.

Tomando lo anterior en cuenta se puede decir que para el periodo de estudio las bajas emisiones de CO_2 en fines de semana y vacaciones fueron debidas principalmente a una reducción en el número de fuentes y los sumideros vegetales pueden llegar a tomar un papel secundario (hace falta una mayor muestra estadística para probarlo). Los resultados muestran que la parte biogénica pudiera actuar como una fuente en el día ($\sim 7.5 \pm 32\%$ de los flujos), y solo por momentos específicos se comporta como sumidero.

Conclusiones

En este estudio se muestra que los flujos de H_2O no varían considerablemente con respecto al día de la semana sin embargo, dichos flujos son menores en el periodo vacacional, lo que se atribuye a la variabilidad estacional y a alguna actividad humana (patrón de riego).

La técnica de eddy covariance se implementó correctamente teniendo un cierre de balance de energía del 60 %. El desajuste en el cierre del balance de energía se atribuye principalmente a la falta de términos de almacenamiento y flujo antropogénico por lo que la subestimación de los flujos no se considera grande (menor al 20 %).

De acuerdo con la clasificación de ZCL de Stewart y Oke (2012) se caracterizó a Ciudad Universitaria como (5) abierto de mediana altura y a Santo Domingo como (3) compacto de baja altura.

Los footprints varían a lo largo del estudio tanto en forma como en extensión. En promedio tienen un diámetro aproximado de 800m con contribuciones al 90 %. Presentan dos patrones uno diurno con forma similar a un círculo y uno nocturno con una clara inclinación hacia el oeste que denota los flujos de CO_2 provenientes de éste punto cardinal durante la noche.

Los datos muestran que los mayores flujos de CO_2 se presentaron en los días entre semana, mientras que en el periodo vacacional los flujos fueron mucho menores, con promedios de $4\mu mol m^{-2} s^{-1}$ y $0.9\mu mol m^{-2} s^{-1}$ respectivamente, lo que indica una clara influencia antropogénica. En cuanto a los ciclos diarios de los días entre semana tuvieron un promedio de flujos de CO_2 de

$0.4\mu\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ y un patrón con un pico de valores elevados en la mañana y otro en la tarde, y entre estos dos máximos una meseta con valores relativamente constantes. En los días entre semana del periodo vacacional el promedio de flujos de CO_2 fue de $0.1\mu\text{molm}^{-2}\text{d}^{-1}$ y el sistema actuó como sumidero o presentó flujos muy cercanos a cero durante las horas de mayor radiación solar.

Recomendaciones

Tener el equipo de EC conectado a una fuente constante de energía e internet. En caso de no tener internet, como lo fue en este estudio, descargar los datos de la memoria tras un máximo de 15 días de mediciones continuas. Esta medida ayuda a minimizar los errores que pudieran surgir de fallas técnicas y/o errores humanos.

Colocar el equipo en una zona donde el dosel y las estructuras del entorno sean lo más homogéneas posibles. Los instrumentos deben de estar colocados de 1.5 a 2 veces la altura del dosel, dependiendo del tamaño del mismo, y a una altura no mayor a 100-150 metros.

Realizar mediciones del flujo de calor en el suelo para tener mejores resultados, al no tener estos valores el balance de energía está incompleto. Así mismo, en la medida de lo posible medir la energía en las superficies urbanas (techos, paredes, etc), o tener un aproximado de esos valores para mejorar el balance energético. Y finalmente medir el flujo antropogénico o tener un estimado de ese valor.

Anexo 1

7.1. Eddy Covariance

7.1.1. Eddy covariance	53
7.1.1.1. Footprint o área fuente	55
7.1.1.2. Técnica de Eddy covariance	56
7.1.2. Limitaciones en el método Eddy covariance	57

7.1.1. Eddy covariance

Las relaciones dinámicas que ocurren entre la atmósfera y la superficie terrestre se dan en la capa límite atmosférica (atmospheric boundary layer), la cual tiene un grosor variado debido al ciclo diurno, durante el día gran parte de la radiación es absorbida por la superficie, originando un transporte turbulento por convección, que es el principal responsable del movimiento de las masas de aire (Cushman y Beckers, 2009). El flujo de las masas de aire lleva consigo numerosos “eddies” generados por la turbulencia, los cuales sirven de transporte para partículas de agua, CO_2 y otros gases de efecto invernadero, el método de “eddy covariance” consiste en seguir el movimiento de esas partículas en función del tiempo (figura 7.1), es decir, en un mismo punto de referencia, el eddy 1 mueve una parcela de aire hacia abajo con una concentración C_1 y velocidad W_1 , después el eddy 2 mueve una parcela de aire hacia arriba con concentración C_2 y velocidad W_2 , de modo que si se conoce

la velocidad, humedad, temperatura y concentración de cada parcela se puede determinar el flujo (Burba y Anderson, 2010). Además del transporte de masa en la capa límite, la energía también es transportada, por lo que hay transferencia de calor y calor latente entre la atmósfera y la superficie, que de igual modo pueden ser medidos por la técnica de eddy covariance (Ruiz, 2011).



Figura 7.1: Esquema ilustrativo de la torre de flujos, los edies y el viento. Obtenido de (Burba, 2013).

Matemáticamente el EC se basa en el principio de que la velocidad vertical del flujo puede ser representada como la covarianza de la velocidad vertical y concentración de la especie de interés (Burba, 2013). Los flujos de CO_2 , vapor de agua y calor son determinados por la medida de la covarianza entre las fluctuaciones en la velocidad vertical y la concentración de interés.

Cuando se habla del flujo de carbono es conveniente saber que si el flujo neto es positivo entonces el ecosistema es una fuente, y en caso contrario el ecosistema funciona como un sumidero (Vargas et al., 2013), es decir, los valores negativos de la covarianza en el intercambio neto de CO_2 representan una pérdida de CO_2 por parte de la atmósfera y una ganancia por parte de la superficie terrestre (Baldocchi, 2008).

7.1.1.1. Footprint o área fuente

El footprint es el área a barlovento del sensor desde donde se originan los flujos medidos por el instrumento y refleja la influencia de la superficie sobre la medición del flujo turbulento. La altura de la torre, junto con la rugosidad de la superficie, la estructura del dosel, la velocidad y dirección del viento, y la estabilidad atmosférica determinan el footprint del flujo medido (Velasco et al., 2009). Además las mayores contribuciones del footprint no se encuentran en el área cercana a la torre ni demasiado lejos de ella (figura 7.2) (Burba y Anderson, 2010).

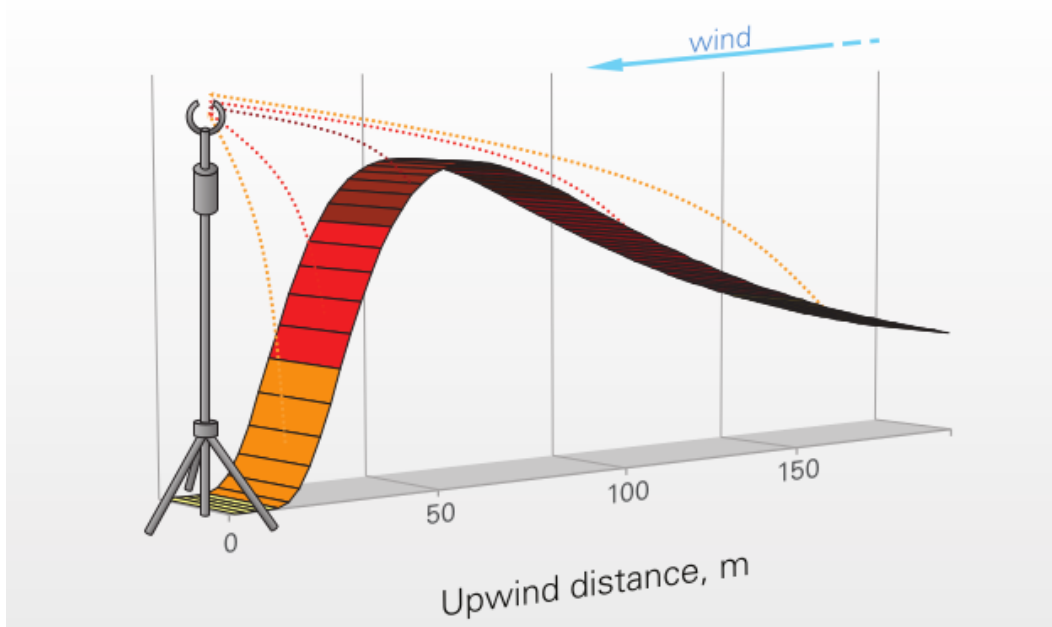


Figura 7.2: Esquema representativo del área del footprint, las mayores contribuciones del footprint se encuentran debajo de las zonas de color rojo oscuro. Obtenido de (Burba y Anderson, 2010).

Principios matemáticos del Eddy Covariance

Descomposición de Reynolds En el eddy covariance nos ayuda a distinguir estadísticamente las variaciones más lentas del flujo de aquellas fluctua-

ciones más rápidas, por ello es útil conocer las reglas del promedio de Reynolds (ecuación (7.1)):

$$\bar{A}' = 0 \quad \bar{\bar{A}} = \bar{A} \quad \frac{d\bar{A}}{dt} = \frac{d\bar{A}}{dt} \quad \overline{(\bar{A}B)} = \bar{A}\bar{B} \quad \overline{AB} = \bar{A}\bar{B} + \overline{A'B'} \quad (7.1)$$

donde : A' es la perturbación con respecto a la media, \bar{A} es el promedio y A es una variable cualquiera.

Covarianza Cuando dos variables aleatorias X y Y no son independientes, con frecuencia es de interés valorar que tan fuertemente relacionadas entre sí se encuentran. Es decir, como son las desviaciones de las dos variables con respecto a sus valores medios, la covarianza es el producto esperado de las desviaciones. (Devore, 2010).

Para más de una serie de promedios de perturbaciones se tiene ecuación (7.2), ecuación (7.3), ecuación (7.4), que son la misma pero expresada de forma diferente:

$$Cov(A, B) \equiv \overline{A'B'} \quad (7.2)$$

$$Cov(A, B) \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (A'_i B'_i) \quad (7.3)$$

$$Cov(A, B) \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B}) \quad (7.4)$$

7.1.1.2. Técnica de Eddy covariance

En el Eddy covariance se miden 2 o mas propiedades de los flujos simultáneamente, y suelen ser a alta frecuencia.

El promedio de las fluctuaciones conjuntas $\overline{w's'}$ o covarianza representa el flujo neto de material (F) intercambiado verticalmente entre la atmósfera y la superficie a una altura dada, es decir ecuación (7.5):

$$F(h) = \overline{w's'} \quad (7.5)$$

Donde: s es la magnitud de una propiedad, w la velocidad vertical del viento, F el flujo neto y h la altura.

Tomando en cuenta la ecuación (7.5), al asignarle a s una propiedad específica, se tendría para el flujo lo siguiente:

- Temperatura: calor sensible, $H \sim \overline{w'T'}$.
- $[H_2O_v]q$ evapotranspiración; calor latente $LE \sim \overline{w'q'}$.
- $[CO_2]$: intercambio neto de CO_2 (NEE), $F_c \sim \overline{w'c'}$.
- $[CH_4]$: intercambio neto de metano.

7.1.2. Limitaciones en el método Eddy covariance

Terreno plano y homogéneo En principio el EC produce una medición directa del flujo entre la vegetación y la atmósfera, pero para que la premisa anterior sea cierta el terreno debe de ser plano, la cobertura vegetal debe ser uniforme y extendida, las condiciones atmosféricas deben ser estables y los sensores y el sistema data-logging deben ser capaces de registrar el eddy más pequeño (Baldocchi, 2003). No obstante muy pocos sitios cumplen con estas características, por ello en los últimos años se han desarrollado esfuerzos para poder hacer frente a este error. Una de las alternativas es la rotación de coordenadas, puesto que en condiciones normales se necesita conocer las fluctuaciones de la componente del viento perpendicular a la superficie, pero si la superficie esta inclinada la componente W medida por el anemómetro sónico no será normal a la superficie y por lo tanto es necesario realizar una rotación para trabajar con el sistema de coordenadas (figura 7.3), a esto se le conoce como doble rotación. La rotación de las coordenadas corregirá las distorsiones derivadas de la alineación imperfecta del equipo con las líneas de contorno del viento. En la primera rotación se anula \bar{v} , mientras que en la segunda rotación se anula \bar{w} , de este modo se obtiene una alineación que corregirá los errores.

Otro método para corregir la inclinación debida al terreno es el ajuste planar, con este método se asume que $\bar{w} = 0$ con muchos periodos de medición, consiste en calcular una regresión lineal de $\bar{w} = 0$ con respecto de $\bar{u} = 0$ y $\bar{v} = 0$ sobre periodos relativamente largos (semanas a meses), la regresión lineal producirá un plano, con los valores de la regresión lineal se calcula una matriz de rotación que hace que el eje z sea perpendicular al plano encontrado.

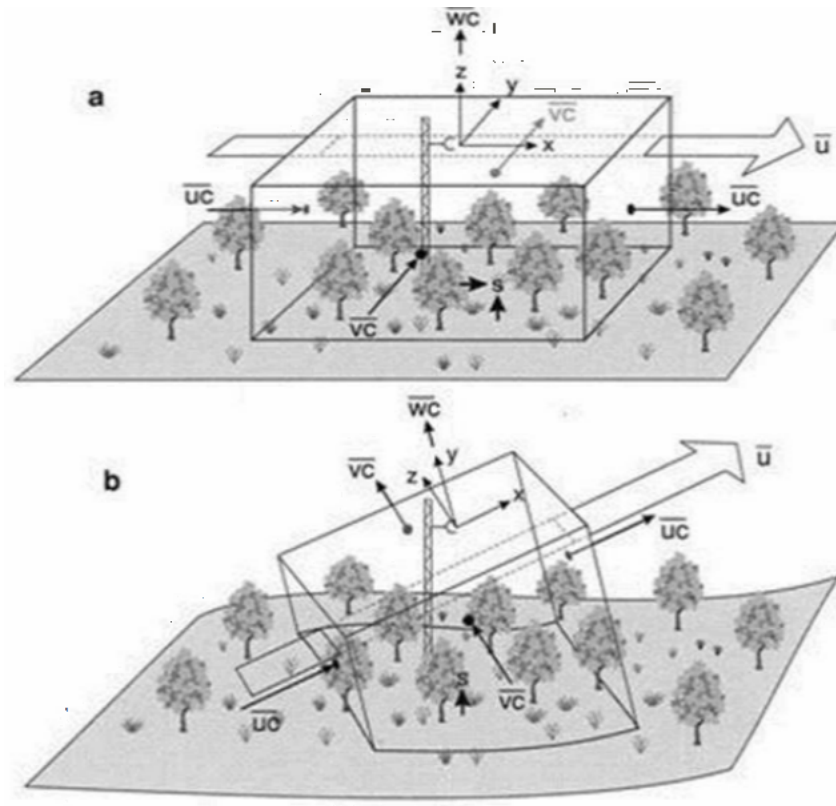


Figura 7.3: Esquema de la rotación de ejes. En la figura de arriba se muestra un terreno plano donde no es necesario rotar, mientras que en la de abajo es un terreno más complejo donde si es necesario realizar una rotación de ejes. Obtenido de (Finnigan et al., 2003)

Correcciones espectrales Este tipo de corrección surge por la frecuencia de respuesta con que se toman los datos en el muestreo. Las principales causas son: la separación entre los sensores y el tiempo de respuesta (Burba, 2013), entre mayor sea la frecuencia con que se toman los datos este error se reduce. Para este tipo de correcciones se compara el coespectro medido con un coespectro ideal el cual se calcula con una serie de ecuaciones para casos ideales, o bien empíricamente se considera el coespectro del calor sensible ($w'T'$) como el ideal, contra el cual se evalúan las pérdidas en el coespectro para el flujo de CO_2 y vapor de agua figura 7.4.

Una forma relativamente rápida de obtener esta corrección es obteniendo las transformadas rápidas de Fourier de los datos, posteriormente estos datos obtenidos en los muestreos comparan con una curva de datos ideales, el espectro corresponde a la sumatoria bajo la curva, se realiza una regresión lineal mediante la cual se obtienen coeficientes que ayudan a saber el factor de corrección a aplicar al set de datos.

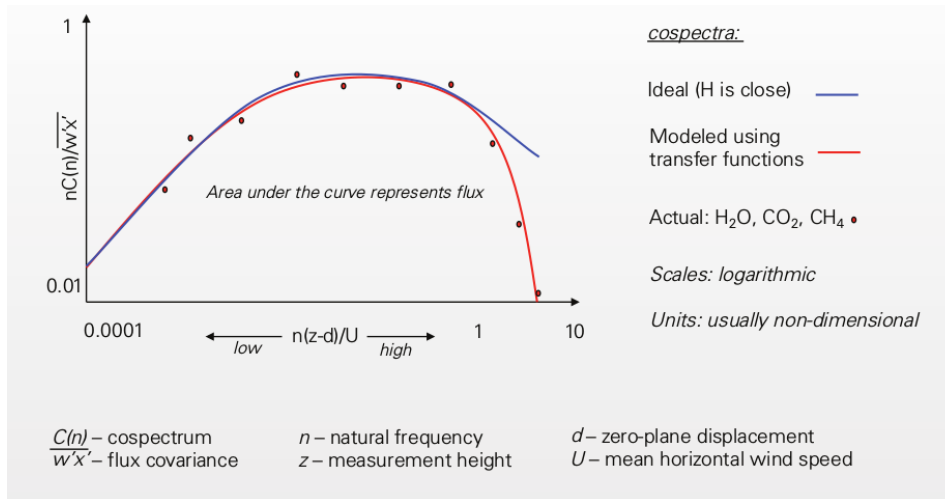


Figura 7.4: Corrección espectral. Obtenido de (Burba, 2013).

Corrección Webb Pearman Leuning Los términos Webb-Pearman-Leuning son compensaciones para los efectos de las fluctuaciones de temperatura (expansión térmica) y vapor de agua (dilución) sobre las medidas de fluctuaciones en la densidad del CO_2 , H_2O y otros gases ecuación (7.6). Como resultado del calentamiento, el instrumento mide flujo debido a la expansión volumétrica.

“Una manera simple de visualizar este proceso es imaginar una superficie que tiene un flujo actual de cero y es cubierta por aire cálido de una concentración constante. Como resultado del calentamiento un instrumento deberá medir un flujo debido a la expansión volumétrica”(Burba, 2013).

Después de que el CO_2 ascienda su expansión térmica decrecerá y en consecuencia diluirá las corrientes ascendentes. Como resultado la densidad de CO_2 será menor después de descender. Este proceso de alta frecuencia de baja

densidad al ascender y alta densidad al descender crea una falsa apariencia de captura de CO_2 , cuando en realidad no es el CO_2 actual debido a la superficie caliente, húmeda o las dos. Por lo tanto las expansiones y contracciones térmicas y de presión, y la dilución en agua del gas de interés deben de ser corregidas (Burba, 2013).

$$Fc = \overline{\rho_d w' S'} = \overline{w' q'_c} + \mu \frac{E}{\rho_d} \frac{\overline{q_c}}{1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d}} + \frac{H}{\rho C_p T_a} \overline{q} - \left(1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d}\right) \frac{\overline{w' P'}}{\overline{P}} \overline{q_c} \quad (7.6)$$

donde: Fc es la corrección final del flujo, S es una fuente cualquiera, E la evapotranspiración, H calor sensible, P presión del aire, q_c promedio de densidad de CO_2 , ρ_d densidad de aire seco, ρ_v densidad del vapor de agua, ρ densidad del aire, C_p calor específico del aire, T_a temperatura ambiente en K y μ la razón mol (masa de aire en agua) con un valor $\mu = 1.6077$.

En la ecuación ecuación (7.6) en la última igualdad el segundo y tercer término corresponden a los términos WPL, el último término es una corrección para la presión debido a la expansión térmica pero suele ser despreciada.

Ángulo de ataque Por razones de logística pareciera que colocar la torre de flujos en lugares altos y sobre plataformas en zonas urbanas o semiurbanas, es una buena idea, no obstante eso no es del todo cierto, pues puede haber datos alterados por los edificios o árboles, más específicamente en el ángulo de ataque y la dirección del viento. No llega el mismo aire a distintas alturas a pesar de ser una misma torre, ese aire se ve alterado en el ángulo de incidencia al llegar a los sistemas de medición (anemómetro sónico) (Christen et al., 2007).

Otras correcciones a tomar en cuenta

- Malas condiciones meteorológicas: si las condiciones al momento del muestreo no son buenas se eliminan esos datos, esto incluye: lluvias fuertes, niebla, humo, etc.
- Picos electrónicos: En ocasiones se presentan valores anormalmente elevados, para corregirlos se suele ocupar el sesgo o la kurtosis, estos valores pueden provenir de fuentes no relacionadas con el estudio.

Anexo 2

En este anexo se presenta la variación temporal de los vientos y de los footprints a lo largo de todo el estudio. Los periodos fueron agrupados conforme a las similitudes en el patrón del viento.

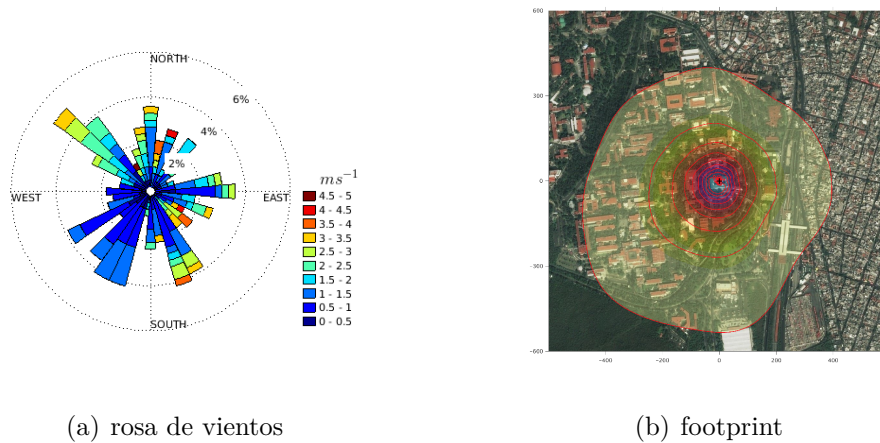
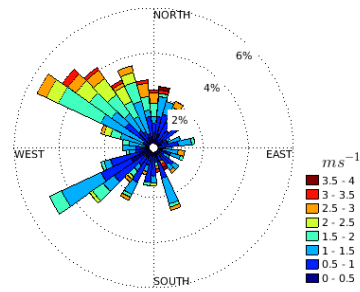
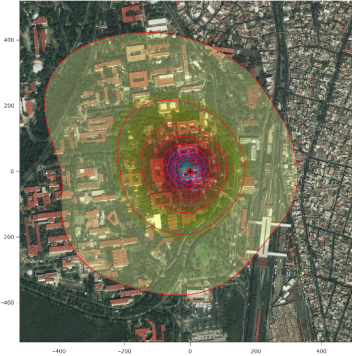


Figura 8.1: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 22-oct-2018 a 28-oct-2018 (día 295-301)

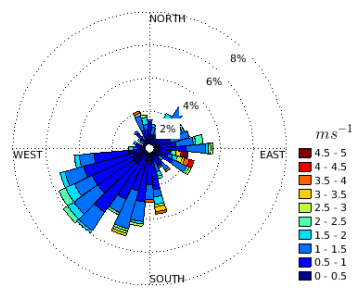


(a) rosa de vientos

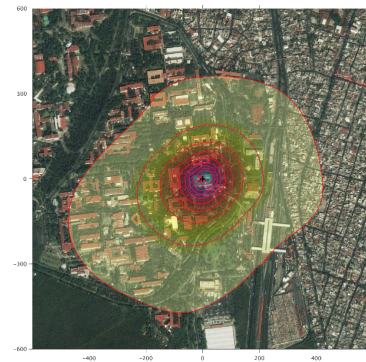


(b) footprint

Figura 8.2: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 22-oct-2018 a 28-oct-2018 (día 295-301)

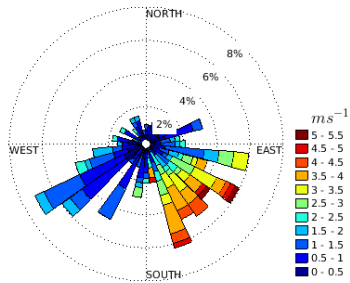


(a) rosa de vientos

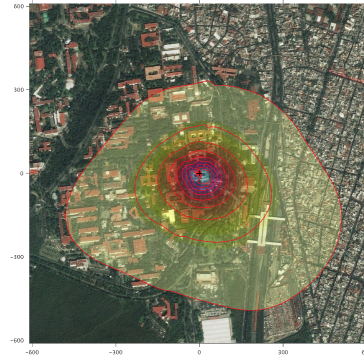


(b) footprint

Figura 8.3: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 12-nov-2018 a 25-nov-2018 (día 316-329)

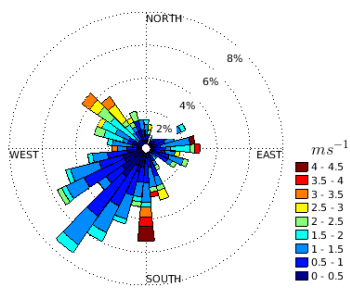


(a) rosa de vientos

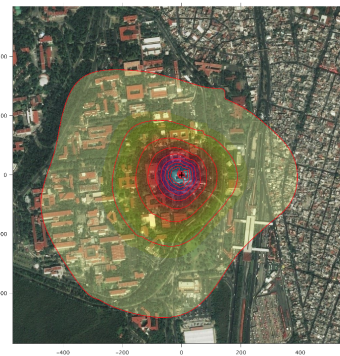


(b) footprint

Figura 8.4: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 26-nov-2018 a 2-dic-2018 (día 330-336)

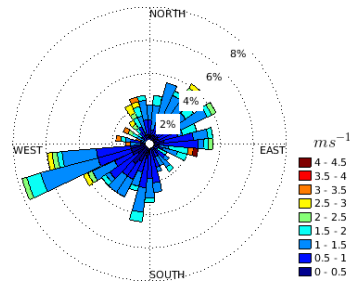


(a) rosa de vientos

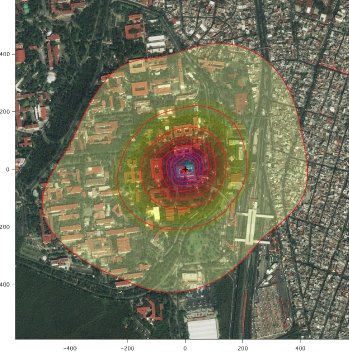


(b) footprint

Figura 8.5: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 3-dic-2018 a 9-dic-2018 (día 337-343)

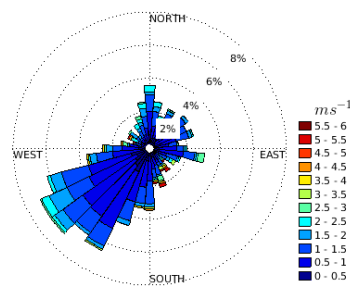


(a) rosa de vientos

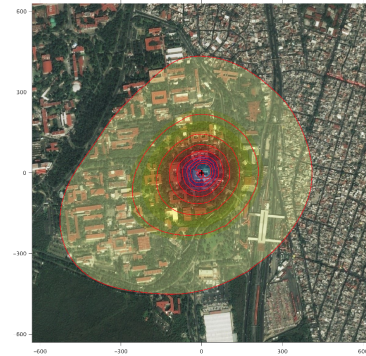


(b) footprint

Figura 8.6: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 10-dic-2018 a 16-dic-2018 (día 344-350)

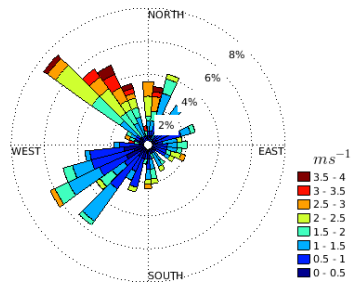


(a) rosa de vientos

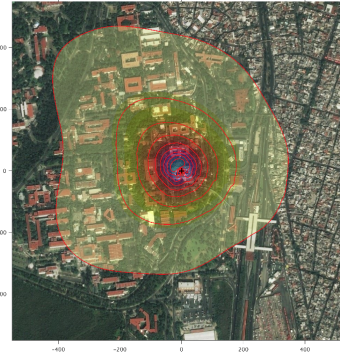


(b) footprint

Figura 8.7: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 17-dic-2018 a 6-ene-2019 (día 351-6)

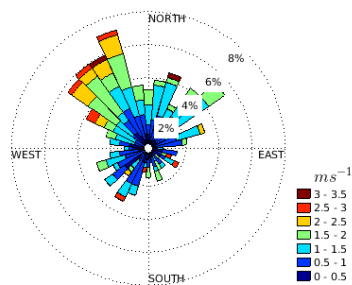


(a) rosa de vientos

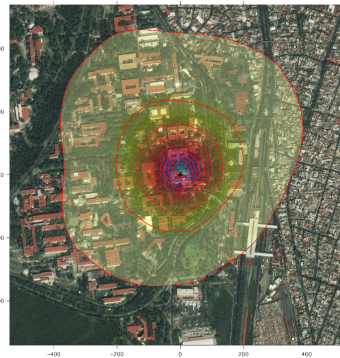


(b) footprint

Figura 8.8: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 7-ene-2019 a 13-ene-2019 (día 7-13)

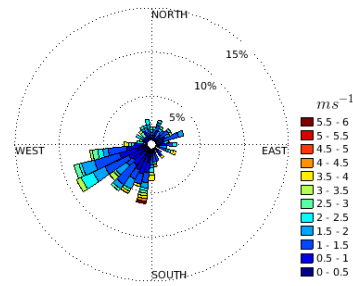


(a) rosa de vientos

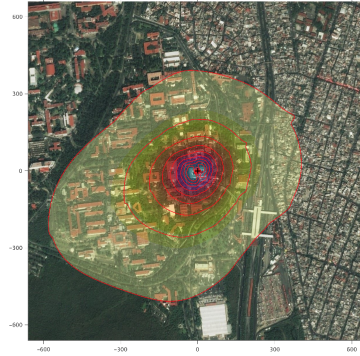


(b) footprint

Figura 8.9: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 14-ene-2019 a 20-ene-2019 (día 14-20)

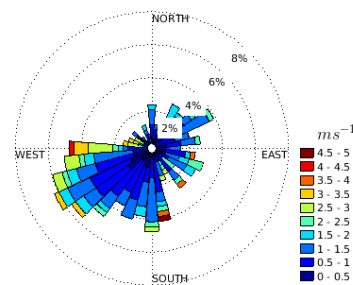


(a) rosa de vientos

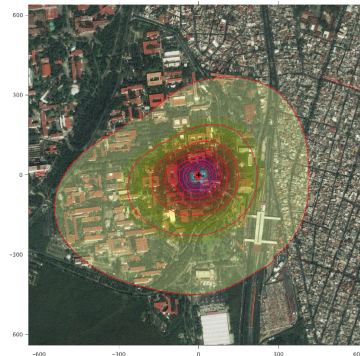


(b) footprint

Figura 8.10: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 21-ene-2019 a 27-ene-2019 (día 21-27)

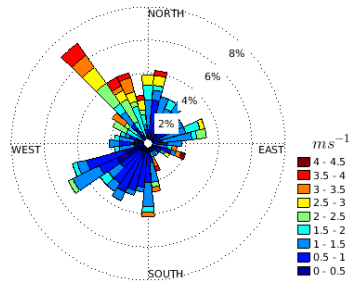


(a) rosa de vientos

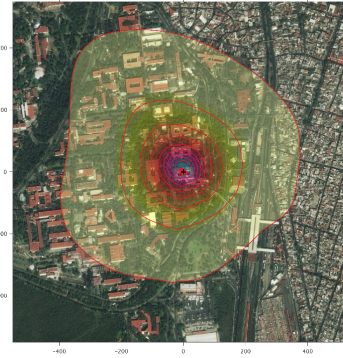


(b) footprint

Figura 8.11: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 28-ene-2019 a 4-feb-2019 (día 28-34)

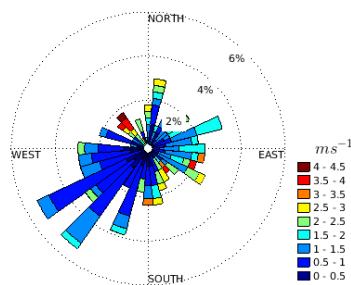


(a) rosa de vientos

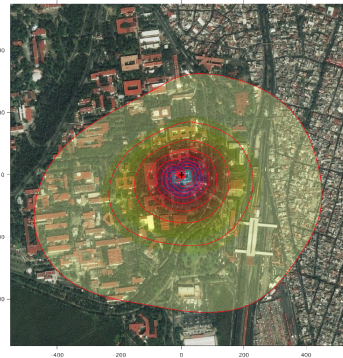


(b) footprint

Figura 8.12: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 5-feb-2019 a 10-feb-2019 (día 35-41)

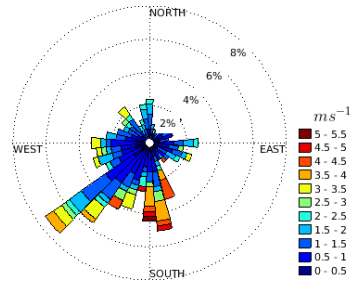


(a) rosa de vientos

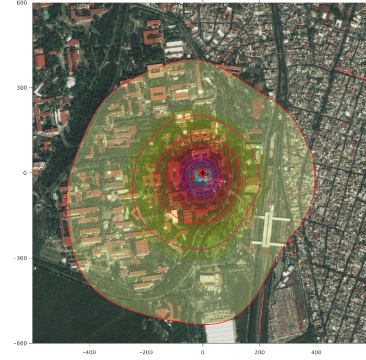


(b) footprint

Figura 8.13: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 11-feb-2019 a 17-feb-2019 (día 42-48)

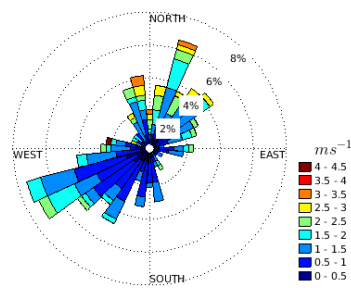


(a) rosa de vientos

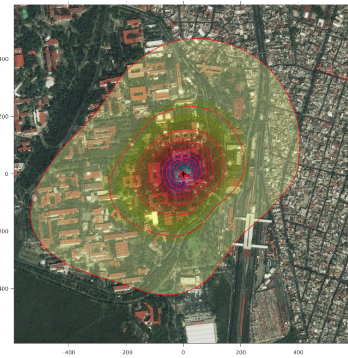


(b) footprint

Figura 8.14: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 18-feb-2019 a 24-feb-2019 (día 49-55)

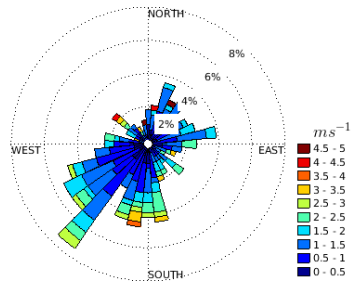


(a) rosa de vientos

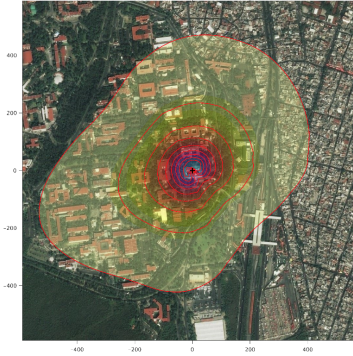


(b) footprint

Figura 8.15: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 25-feb-2019 a 3-mar-2019 (día 56-62)

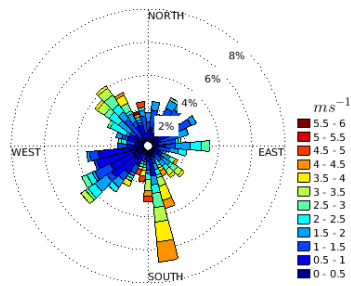


(a) rosa de vientos

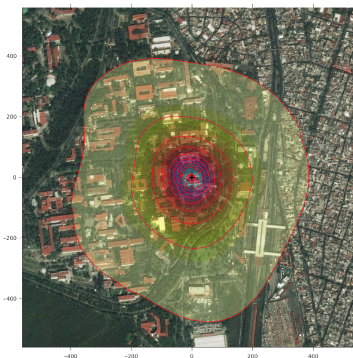


(b) footprint

Figura 8.16: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 4-mar-2019 a 10-mar-2019 (día 63-69)



(a) rosa de vientos



(b) footprint

Figura 8.17: Rosa de vientos y footprint correspondientes al periodo 11-mar-2019 a 23-mar-2018 (día 70-82)

Referencias

- Aubinet, M., Vesala, T., y Papale, D. (2012). *Eddy Covariance. A practical guide to measurement and data analysis*. Springer.
- Baldocchi, D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9:479–492.
- Baldocchi, D. (2008). Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurements systems. *Australian Journal of Botany*, 56:1–26.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthon, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., y Law, B. e. a. (2001). Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82:2415–2434.
- Balogun, A., Adegoke, J., Vezhapparambu, S., Mauder, M., McFadden, J., y Gallo, K. (2009). Surface energy balance measurements above an exurban residential neighborhood of Kansas City, Missouri. *Boundary Layer Meteorol*, 133:299–321.
- Barlow, J. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban climate*, 10:216–240.
- Bergeron, O. y Strachan, I. (2011). CO_2 sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid latitude city. *Atmospheric Environment*, 45(8):1564–1573.

- Bergeron, O. y Strachan, I. (2012). Wintertime radiation and energy budget along an urbanization gradient in montreal, canada. *International Journal of Climatology*, 32:137–152.
- Burba, G. (2013). *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications*. Lewis Publishers.
- Burba, G. y Anderson, D. (2010). *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements, principles and workflow examples for scientific and industrial applications*. LI-COR biosciences.
- Burri, S., Frey, C., Parlow, E., y Vogt, R. (2009). CO_2 fluxes and concentration over an urban surface in Cairo, Egypt. Technical report, 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japon.
- Christen, A., Coops, N., Crawford, B., Liss, K., Oke, K., y Toke, R. (2009). The role of the soils and laws in urban-atmosphere exchange of carbon-dioxide. Technical report, 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japon.
- Christen, A., Van Gorsel, E., y Vogt, R. (2007). Coherent structures in urban roughness sublayer turbulence. *International Journal of Climatology*, 27:1955–1968.
- Christen, A. y Vogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central european city. *International Journal of Climatology*, 24:1395–1421.
- Coutts, A., Beringer, J., y Nigel, J. (2007). Characteristics influencing the variability of urban CO_2 fluxes in Melbourne, Australia. *Atmospheric Environment*, 41:51–62.
- Crawford, B., Grimmond, C., y Christen, A. (2011). Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment*, 45(4):896–905.
- Cushman, B. y Beckers, J. (2009). *Geophysical fluid dynamics and numerical aspects*. Academic Press.
- Devore, J. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Cengage Learning.

- Feigenwinter, C., Vogt, R., Parlow, E., Lindberg, F., Marconcini, M., Frate, F., y Chrysoulakis, N. (2018). Spatial distribution of sensible and latent heat flux in the city of basel (switzerland). *Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, 11:2717–2723.
- Finnigan, J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R., y H., C. (2003). A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. part i:averaging and coordinate rotation. *Boundary Layer Meteorology*, 107:1–48.
- Grimmond, C. y King, T. (2002). Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 116:s243–s254.
- Grimmond, C. y Oke, T. (1999). Heat storage in urban areas: Local scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*, 38:922–940.
- Grimmond, C. y Oke, T. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (lumps). *Journal of Applied Meteorology*, 41:792–810.
- Grimmond, C., Salmond, J., Oke, R., Offerle, B., y Lemonsu, A. (2004). Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *Journal of geophysical research*, 109:D24101–D24101.
- Helfter, C., Famulari, D., Philips, G., Barlow, J., Wood, C., Grimmond, C., y Nemitz, E. (2011). Control of carbon dioxide concentrations and fluxes above central London. *Atmospheric chemistry and physics*, 11:1913–1928.
- IPCC (2015). Climate change 2014 synthesis report. Technical report, WMO, UNEP, Geneva, Switzerland.
- Klaus, W. y Kuttler, W. (2010). Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, 44:2722–2730.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M., y Schmid, H. (2015). A simple two-dimensional parameterisation for flux footprint prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8:3695–3713.

- Kowalski, A. y Serrano, P. (2007). On the relationship between the eddy covariance, the turbulent flux, and surface exchange for a trace gas such as CO_2 . *Boundary Layer Meteorology*, 124:129–141.
- Lemonsu, A., Belair, S., Mailhot, J., Benjamin, M., y Chagnon, F. (2008). Overview and first results of the montreal urban snow experiment 2005. *Appl. Meteorol. Climatol*, 47:59–75.
- Leuning, R., Gorsel, A., Massman, W., y Isaac, P. (2012). Reflections on the surface energy imbalance problem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156:65–74.
- Liu, H., Feng, W., Jarvi, L., y Vesala, T. (2012). Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO_2 flux over an urban area in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12:7881–7892.
- Markwitz, C. y Siebicke, L. (2019). Low cost eddy covariance: a case study of evapotranspiration over agroforestry in germany. *Atmospheric measurement techniques*, 12:4677–4696.
- Matese, A., Gioli, B., Vaccari, F., Zaldei, A., y Miglietta, F. (2009). Carbon dioxide emissions of the city center of firenze, italy: Measurement, evaluation, and source partitioning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48:1940–1947.
- Moriwaki, R. y Kanda, M. (2004). Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *Journal of applied meteorology*, 43:1700–1710.
- Nordbo, A., Järvi, L., y Vesala, T. (2012). Revised eddy covariance flux calculation methodologies effect on urban energy balance. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64.
- Offerle, B., Grimmond, C., y Fortuniak, k. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central european city centre. *International journal of climatology*, 25:1405–1419.
- Oke, I. D. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observatios at urban sites. Technical report, IOM Rep.81, WMO/TD.

- Oke, T., Mills, G., Christen, A., y Vogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Oncley, S., Foken, T., Vogt, R., Kohsiek, W., Debruin, H., Bernhofer, C., Christen, A., VanGorsel, E., Grantz, D., y et al (2007). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central european city centre. *International journal of climatology*, 123:1–28.
- Pawlak, W., Fortuniak, K., y Siedlecki, M. (2011). Carbon dioxide flux in the centre of Łódź, poland – analysis of a 2-year eddy covariance measurement data set. *Royal Meteorological Society*, 31:232–243.
- Ruiz, R. (2011). *Intercambios de CO₂ y vapor de agua en ecosistemas de alta montaña de matorral mediterraneo*. PhD thesis, Universidad de Granada.
- Soeggard, H. y Moller-Jensen, L. (2003). Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements. *Remote Sensing of Environment*, 87:283–294.
- Song, T. y Wang, Y. (2012). Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. *Atmospheric research*, 148:139–149.
- Stewart, I. D. y Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Technical report, American meteorological society.
- Stull, R. (1988). *An Introduction to Boundaty Layer Meteorology*. Department of meteorology. University of Wisconsin Madison USA.
- Templeton, N., Vivoni, E., Wang, Z., y Schreiner-McGraw, A. (2018). Quantifying water and energy fluxes over different urban land covers in Phoenix, Arizona. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123:2111–2128.
- Vargas, R., Yépez, E., Andrade, J., Ángeles, G., Arredondo, T., Castellanos, A., Delgado, J., Garatuza, J., González, E., Oechel, W., Rodríguez, J., Sánchez, A., Velasco, E., Vivoni, E., y Watts, C. (2013). Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in mexican ecosystems: the mexflux network. *Atmósfera*, 26(3):325–336.
- Velasco, E., Perrusquia, R., Jiménez, E., Hernández, F., Camacho, P. Rodríguez, P., Retama, A., y Molina, L. (2014). Sources and skins of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico city. *Atmospheric Enviromental*, 97.

- Velasco, E., Pressley, S., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Westberg, H., Ramos, R., y Lamb, B. (2005). Measurements of CO_2 fluxes from the Mexico city urban landscape. *Atmospheric environment*, 39(38):7433–7446.
- Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Jobson, B., Westberg, H., Ramos, R., Hernandez, F., Molina, C., y Lamb, B. (2009). Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico city. *Atmospheric chemistry and physics*, 9:7325–7342.
- Velasco, E. y Roth, M. (2010). Cities as net sources of CO_2 : Review of atmospheric CO_2 exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography compass*, 4(9):1238–1259.
- Velasco, E., Roth, M., Norford, L., y Molina, L. (2016). Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape and urban planning*, 148:99–107.
- Velasco, E., Roth, M., Tan, S., Quak, M., Nabarro, S., y Norford, L. (2013). The role of vegetation in the CO_2 flux from a tropical urban neighbourhood. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(20):10185–10202.
- Vickers, D. y Mahrt, L. (1997). Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14:512–526.
- Vogt, R., Christen, A., Rotach, M., Roth, M., y Satyanarayana, A. (2006). Temporal dynamics of CO_2 fluxes and profiles over a central european city. *Theoretical and Applied Climatology*, 84:117–126.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., y Verma, S. (2002). Energy balance closure at fluxnet sites. *Agricultural and forest meteorology*, 113:223–243.