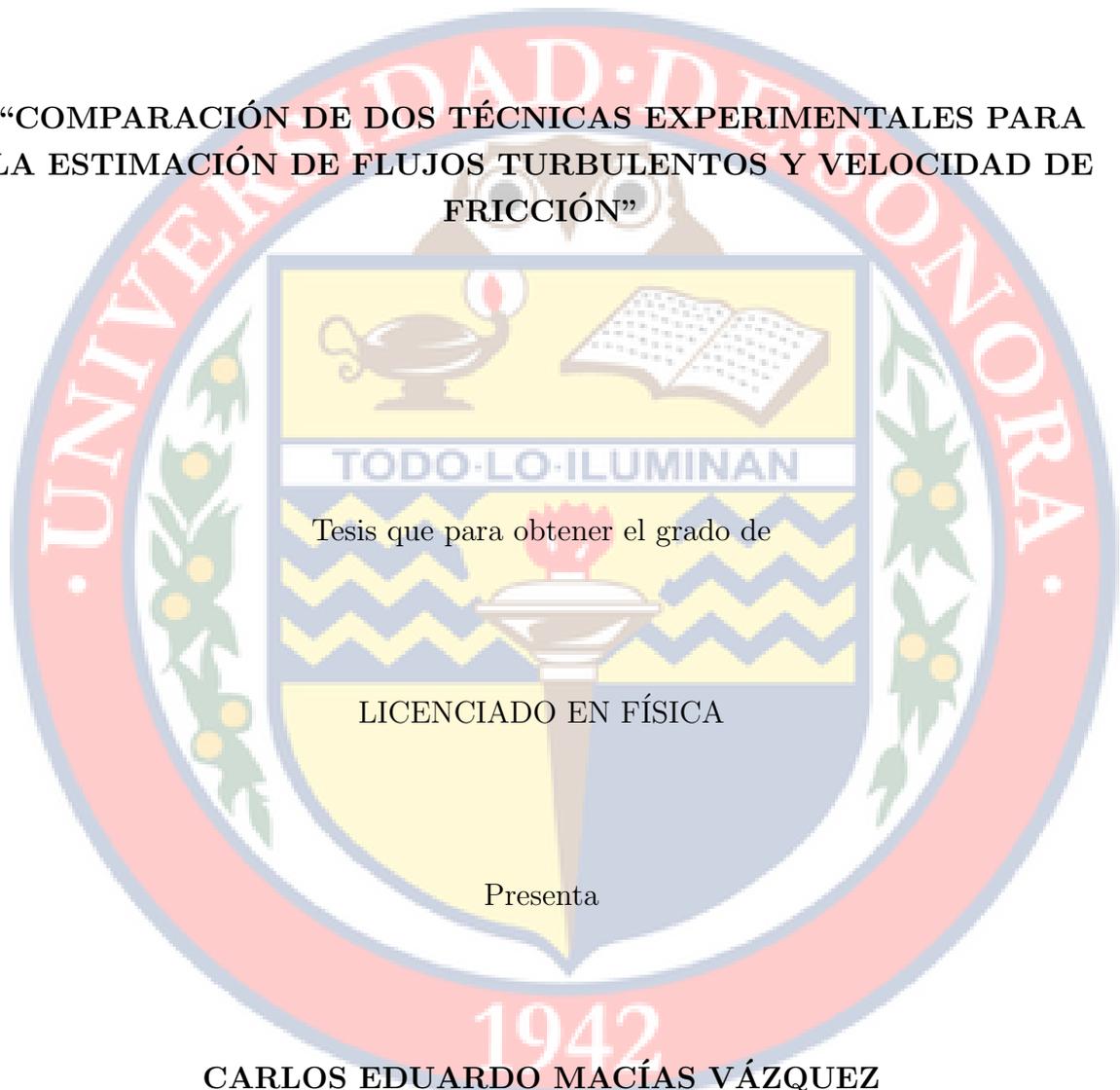


UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**“COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA
LA ESTIMACIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS Y VELOCIDAD DE
FRICCIÓN”**



Tesis que para obtener el grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

Presenta

CARLOS EDUARDO MACÍAS VÁZQUEZ
DIRECCIÓN: CARLOS LIZÁRRAGA CELAYA

Hermosillo, Sonora

Agosto 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Resumen

El intercambio de energía en forma de calor entre la atmósfera y la superficie de la tierra (capa límite adyacente) ha sido estudiado en las últimas décadas, gracias a la implementación de métodos que son capaces de describir el comportamiento de estos flujos de calor sensible H , calor latente $L_v E$, radiación neta R_{net} y calor del suelo G entre otras cantidades físicas. El método de covarianza turbulenta ha sido sin duda un método que describe la interacción de la atmósfera con la superficie de la tierra con una alta precisión, sin embargo, este método es un poco limitado por su corto alcance para estimar flujos y otras cantidades escalares de una determinada región o área de estudio. El método del cintilómetro demuestra que es un método prometedor para la estimación de flujos de calor (H , $L_v E$). El cintilómetro es un dispositivo óptico utilizado para estimar las fluctuaciones del índice de refracción del aire en la atmósfera turbulenta sobre un área relativamente mucho más grande que la del método de covarianza turbulenta. El presente estudio ha estimado flujos de calor sensible y calor latente utilizando ambos métodos en un cultivo de sandía a un costado del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora, un sitio al noroeste de Hermosillo, Sonora. Las estimaciones derivadas del cintilómetro de los flujos de calor sensible H y calor latente $L_v E$ son comparadas con los flujos del método de covarianza turbulenta, de esta manera se considera que cintilometría es una alternativa altamente útil, además de su precisa estimación de flujos de calor, para su uso en estudios sobre el comportamiento de la atmósfera con la superficie de la tierra en una determinada región.

Agradecimientos

Gracias, de corazón, a mis tutores, los doctores Carlos Lizárraga Celaya y Julio César Rodríguez. Gracias por su paciencia, dedicación, motivación, criterio y aliento. Han hecho fácil lo difícil. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda.

Gracias a todas las personas del Departamento de Física de la Universidad de Sonora, por su atención y amabilidad en todo lo referente a mi vida como alumno de licenciatura.

Gracias a las personas que de alguna u otra manera, han sido claves en mi vida profesional y por extensión en la personal: mis socios y amigos del alma, José Alfredo Galaviz Sañudo, Gabriel Alejandro Orozco Casillas, Gerardo Suárez Santamaría, Vladimir Ayala Piña, Alejandro Véjar Delgado, Abraham R. Velazquez Kraff, Roldán González Martínez, Gustavo Javier González Moraga, Mario Arturo Rodríguez Alvarez. A algunos ya no los veo, pero el agradecimiento es el mismo.

Gracias a mi novia Lizbeth Azucena Franco Garcia, la ayuda que me has brindado ha sido sumamente importante, estuviste en muchos momentos y me brindaste el tiempo necesario para realizarme profesionalmente.

Gracias a los amigos que he robado horas de compañía. Nombrar a todos sería muy extenso y podría cometer algún olvido injusto, por ello, ¡gracias amigos por estar ahí! Gracias a The Beatles por los veinte años de compañía y por lo muy presente que han estado en las largas horas de trabajo en esta tesis.

Y por ensima de todo, y con todo mi amor, gracias a los míos por estar incondicionalmente conmigo durante todos estos años, ¡siempre!. Gracias madre mía Lucyna Vázquez Aguilar, José Lucio Vázquez Moreno, Laurel Vázquez Aguilar, Andrea Macías Vázquez, Carlos Tadeo Macías Vázquez, Angeles Macías y a toda mi familia Macías, Magdalena Juárez, Reinaldo Araiza Juárez y toda su familia.

Y gracias a los que vienen y a los que ya no están. Gracias por todo, los quiero con todo mi corazón.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	II
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivo de este trabajo	3
1.3. Estructura de la tesis	4
2. Teoría de Cintilómetros	5
2.1. Método de Covarianza Turbulenta	6
2.2. Método del cintilómetro	14
2.3. Métodos Combinados ⁸	19
2.3.1. Método de varianza de flujo	19
2.3.2. Método de varianza de Bowen	20
2.3.3. Método de parámetro de estructura	21
2.3.4. Método de balance de Energía	22
3. Materiales y Métodos	23
3.1. Arreglo experimental	23
3.2. Procesamiento de datos	25
4. Validación de los métodos combinados con los datos experimentales	29
4.1. u_* y H del cintilómetro	29
4.2. Método de varianza de flujo	31
4.3. Método de varianza de Bowen	31
4.4. Método de parámetro de estructura	32
4.5. Método de balance de energía	33

5. Conclusiones	35
A. Glosario	37
A.1. Glosario	37
B. funciones de similitud Monin-Obukhov de C_T^2 y ε en la capa límite estable	40
B.1. Introducción	40
B.2. Teoría	41
B.3. Funciones de similitud f_ε y f_T para ε y C_T^2	42
Bibliografía	44

Esta tesis la dedico a mi madre Lucyna Vázquez Aguilar, por ser mi fuente, mi mano derecha, la persona que me ha dado mucho, la valentía y la fortaleza para que este logro se hiciera realidad, sin ti madre mía no hubiese podido, gracias por que con tu cariño, tu comprensión, paciencia y tu amor, todas las cosas son posibles, mis sueños son tus sueños, todo lo que tengo te pertenece, te estoy agradecido, ¡te AMO madre mía!

Capítulo 1

Introducción

El uso de cintilómetros, es una técnica común el día de hoy en los estudios de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera, para medir flujos de calor sensible.

El intercambio turbulento de momento, energía y materia (por ejemplo, vapor de agua por evaporación, restos de gases, aerosoles, etc.) es un elemento esencial de la interacción suelo-vegetación-atmósfera. Los flujos turbulentos de calor sensible y latente son una gran influencia en los procesos atmosféricos tales como el crecimiento de la capa límite, el calentamiento y humidificación de la atmósfera inferior, la formación de nubes y, en consecuencia, los patrones de precipitación².

En la predicción numérica del tiempo y los modelos numéricos del clima se describen los flujos turbulentos en una escala de 1-100 km, originalmente, estas relaciones se obtuvieron a partir de mediciones realizadas sobre una superficie de tierra localmente homogénea con el fin de determinar los flujos turbulentos locales de la superficie de la tierra. Las técnicas de covarianza turbulenta son el método de elección hoy, sin embargo, en la escala de varios kilómetros, la superficie de la tierra es a menudo muy heterogénea y el balance de energía local de los flujos turbulentos sobre estos diferentes tipos de superficie subyacente puede diferir considerablemente².

Por lo tanto, se necesitan técnicas para proporcionar flujos de áreas promediadas en

la escala mas grandes de las que puede proporcionar el método de covarianza turbulenta. Diferentes investigaciones han demostrado que los promedios de los valores de mediciones de flujos locales realizados con cintilómetros sobre las principales clases del suelo pueden proporcionar promedios de flujo confiables. En el pasado, las mediciones aéreas a menudo se han utilizado para este propósito, sin embargo son bastante costosos y por lo general limitan los experimentos de campo estudiados².

Durante los últimos 15 años, los cintilómetros han encontrado un buen uso como una técnica relativamente adecuada para la determinación de por lo menos los flujos de calor. Con un correcta puesta en marcha, los cintilómetros pueden funcionar a distancias de varios kilómetros siendo capaces de proporcionar parámetros de turbulencia y flujos en una escala relativamente alta.

1.1. Antecedentes

Debido a la creciente escasez del agua y al papel que desempeña el dióxido de carbono (CO_2) en el clima y el cambio climático, se ha incrementado en las últimas décadas el interés por entender los ciclos del agua y del carbono. Se ha puesto mucho esfuerzo para la evaluación del cambio e intercambio entre la superficie de la tierra y la atmósfera. Se desarrollaron métodos para evaluar los flujos de vapor de agua (evapotranspiración), dióxido de carbono y se establecieron redes para monitorear estos flujos en varias partes del mundo. El interés se centra en la variabilidad del índice de refracción del aire en la atmósfera turbulenta, en la velocidad del viento horizontal, en los flujos de área promediada de vapor de agua y calor².

La técnica de centelleo se basa en la propagación de la radiación electromagnética proveniente del sol y las estrellas sobre la atmósfera de la tierra, la intensidad de la radiación electromagnética al pasar por la atmósfera exhibe fluctuaciones, que son causadas por el índice de refracción del aire. La magnitud de las fluctuaciones se puede

expresar por el parámetro de la estructura del índice de refracción del aire (C_n^2), que es el parámetro básico para los cálculos del cintilómetro².

Cintilometría es un método de estimación de flujo indirecto que sobrepasa algunas limitaciones del método de covarianza turbulenta (eddy covariance). El cintilómetro promedia escalas de campo de metros (100-500 m) a escalas de kilómetros (hasta 10 km), de esta manera los flujos obtenidos representan áreas más grandes que los flujos que se obtienen con el método de covarianza turbulenta².

1.2. Objetivo de este trabajo

El objetivo principal de investigar métodos basados en cintilometría es para la observación del intercambio de calor, evapotranspiración, concentraciones de CO_2 y turbulencia en la capa superficial atmosférica estable, una capa que se define como la parte inferior de la capa límite estable donde los flujos de superficie no cambian significativamente con la altura. El conocimiento del índice de refracción del aire (C_n^2) en la atmósfera es de interés, ya que las fluctuaciones en el índice de refracción del aire afectan el desempeño de los sistemas ópticos y acústicos que se utilizan para la detección, la astronomía y la comunicación.

El índice de refracción del aire (C_n^2) puede estar relacionado con los parámetros de la estructura de temperatura y humedad (C_T^2 y C_q^2 , respectivamente), debido a que las fluctuaciones en n son causadas por la temperatura (T) y humedad (q) en la atmósfera. Los flujos de superficie de área promediada de calor sensible y latente pueden calcularse a partir del parámetro de la estructura de temperatura C_T^2 y el parámetro de la estructura de humedad C_q^2 . Además, el conocimiento del flujo de calor latente también es importante para los estudios de presupuesto para la gestión del agua.

1.3. Estructura de la tesis

La mayor parte de esta tesis fue basada en artículos publicados en revistas internacionales o que están en preparación para su presentación, en especial en el artículo: Measuring H_2O and CO_2 fluxes at field scales with scintillometry: Part I – Introduction and validation of four methods⁸.

En el capítulo 1, se da una pequeña introducción sobre los métodos para estimar flujos de calor y el por qué de su implementación para el estudio de la capa límite atmosférica.

El capítulo 2, describe la teoría de los métodos de covarianza turbulenta y el método de cintilometría, así como la descripción de las cantidades escalares y el papel que juega el índice de refracción del aire C_n^2 , la velocidad de fricción u_* , calor sensible H y calor latente $L_v E$ en cada método respectivamente. La instrumentación con la que se trabajó en campo y una explicación de la teoría de funcionamiento de estos sensores, además de presentar cuatro métodos que combinan cantidades escalares obtenidas de ambos métodos para obtener flujos de calor y saber que tan eficiente son los métodos de estimación de flujos.

El capítulo 3, describe el experimento de campo, es decir, como fue el montaje del equipo tanto para la estación de covarianza turbulenta y la estación del cintilómetro, el sitio donde se llevaron a cabo las mediciones y como se obtuvieron los cálculos para los flujos de calor, así como las complicaciones con las que se presentaron durante el experimento de campo.

En el capítulo cuatro 4, se muestran los cálculos obtenidos en las estaciones de campo realizados con los métodos de Covarianza turbulenta y cintilometría. Mostrando la correlación de los métodos combinados para la estimación de los flujos de calor sensible H y calor latente $L_v E$.

El capítulo 5, da el resumen general y las conclusiones de esta tesis.

El apéndice A y el apéndice B muestran las cantidades escalares utilizadas en esta tesis y la funciones de similitud Monin-Obukhov respectivamente.

Capítulo 2

Teoría de Cintilómetros

Cuando un haz electromagnético se propaga a través de la atmósfera que a su vez es distorsionada por una serie de procesos, estos procesos suprimen de alguna manera la energía del haz y generan una atenuación en la señal. El mecanismo que influye en la propagación del haz, son pequeñas fluctuaciones en el índice de refracción del aire (n) y estas fluctuaciones del índice refracción conducen a fluctuaciones de intensidad, el fenómeno se llama centelleo y es la razón por que las estrellas parpadean en la noche. Las fluctuaciones en el índice de refracción son causadas por la fluctuaciones de la densidad del aire, que a su vez es causada por la temperatura T y las fluctuaciones de humedad q . Un cintilómetro es utilizado para estimar los flujos turbulentos F_x en la superficie de la tierra, calor sensible H y calor latente $L_v E$. El cintilómetro se basa en un marco teórico y complejo que combina la física teórica de turbulencia atmosférica con la teoría de propagación de ondas electromagnéticas



FIGURA 2.1: descripción de los remolinos de diferentes tamaños en la superficie de la atmósfera.¹

2.1. Método de Covarianza Turbulenta

El método de covarianza turbulenta es un conjunto de sensores montados en una torre (estación meteorológica), implementados para la medición de los intercambios de calor, masas, concentraciones de gases y otros flujos en una superficie plana y horizontal homogénea y la atmósfera subyacente.

Un flujo de aire puede ser imaginado como un flujo horizontal de numerosos remolinos (eddy) de diferentes tamaños que giran sobre la superficie de la tierra, cada remolino tiene componentes 3-D, siendo dos de ellos los que describen el movimiento horizontal del viento u y v , así como el movimiento vertical del aire en la dirección w . En la figura 2.1, el flujo de aire está representado por la flecha grande que pasa a través de la torre (estación de covarianza turbulenta), que se compone de remolinos de diferentes tamaños siendo esto el marco para el transporte efectivo de remolinos atmosféricos. Más cerca del suelo existe una probabilidad mayor de remolinos más pequeños que son responsables del transporte de la mayor parte del flujo, esto quiere decir que remolinos más pequeños giren más rápido, por lo tanto, más es el transporte que se realiza por los movimientos de frecuencias más altas del aire. Más lejos del suelo existe

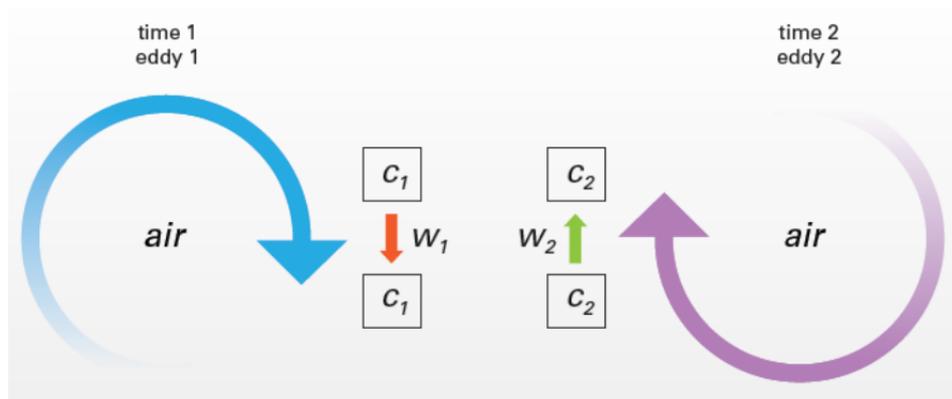


FIGURA 2.2: En un momento dado (tiempo 1), el remolino numero 1 (eddy 1) mueve la parcela de aire C_1 hacia abajo con la velocidad w_1 . En el siguiente momento (tiempo 2) en el mismo punto, el remolino número 2, mueve la parcela de aire C_2 hacia arriba con velocidad w_2 . Cada parcela de aire tiene sus propias características, tales como la concentración de gas, temperatura, humedad, etc.¹

una probabilidad mayor de encontrar remolinos más grandes que son responsables del transportar parte del flujo, es decir, que los remolinos más grandes giran más lento y por lo tanto, el transporte es realizado por los movimientos de frecuencias más bajas del aire. En términos prácticos siempre hay una mezcla de diferentes tamaños de remolinos por lo que una parte del transporte se realiza a unas frecuencias más altas y algunos se realizan en frecuencias inferiores cubriendo toda la gama de frecuencias, de esta manera se realizan grandes movimientos en el orden de horas y los pequeños movimientos en el orden de un décimo de un segundo. Conceptualmente este es el mecanismo de transporte de remolinos atmosféricos, cuando el transporte de flujos de aire es más cerca del suelo este se desplaza a frecuencias más altas, más lejos del suelo el flujo del aire se desplaza a frecuencias más bajas. A continuación en la figura 2.2 se muestra de cerca un remolino en un solo punto en la torre de covarianza turbulenta, si se pueden medir estas características mostradas en el flujo de la velocidad del movimiento vertical del aire, se pueden conocer los flujos verticales ascendentes o descendentes de las concentraciones de vapor de H_2O , CO_2 , temperatura y la humedad. Por ejemplo, si en un momento en que sabemos que tres moléculas de CO_2 subieron y en el siguiente momento sólo dos moléculas de CO_2 bajaron, entonces sabemos que el

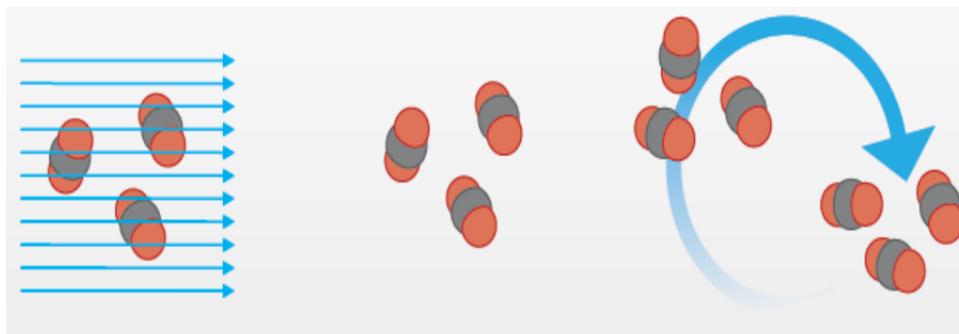


FIGURA 2.3: En el lado izquierdo se observa el flujo promedio de moléculas de gas sobre un área determinada. En el centro se describe un área determinada que no añade moléculas sobre esa área medida y en el lado derecho se tienen movimientos turbulentos que llevan el mismo número de moléculas de arriba hacia abajo.¹

flujo neto durante este tiempo fue hacia arriba e igual a una molécula de CO_2 , siendo este el principio general de las mediciones del método de covarianza turbulenta que es la covarianza entre la concentración de interés y la velocidad vertical del viento.

Otra manera de visualizar el principio físico fundamental detrás de las mediciones de método covarianza turbulenta, es imaginar primero un área que no añade moléculas del gas de interés para el promedio de un flujo, y luego se compara la misma área que añade las moléculas en el flujo, por ejemplo, imaginemos un caudal que lleva un promedio de tres moléculas de CO_2 sobre el área de interés de izquierda a derecha, como se muestra en el la figura 2.3. Puesto que el área en el medio no añade moléculas al flujo, los movimientos de los remolinos en el punto de medición a favor del viento de la derecha llevarían en promedio de tres moléculas hacia arriba y tres moléculas hacia abajo, sin que existiera un flujo neto, por lo tanto, durante un largo período la estación de covarianza turbulenta mediría un flujo de cero desde el área de interés medido.

Ahora imaginemos la misma situación, pero se añaden dos moléculas en el flujo promedio, como se muestra en la figura 2.4 ya que el área en el centro añadió dos moléculas al flujo promediado, los movimientos turbulentos en el punto de medición en la dirección del viento podría llevar en promedio más moléculas a la alza que a la baja. También

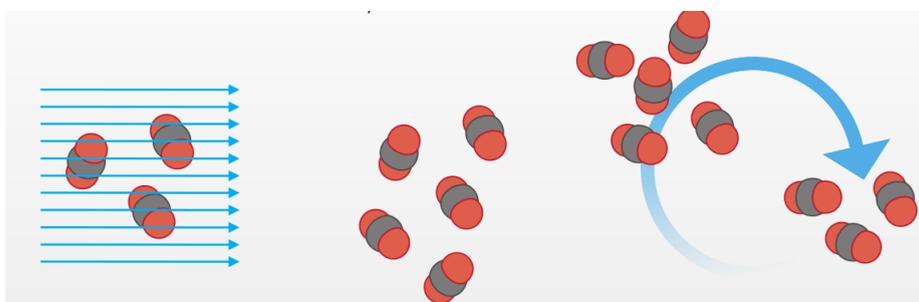


FIGURA 2.4: En el lado izquierdo se observa el flujo promedio de moléculas de gas sobre un área determinada. En el centro se describe un área determinada que añade moléculas sobre esa área medida y en el lado derecho se tienen movimientos turbulentos que llevan diferente número de moléculas de arriba hacia abajo.¹

es importante tener en cuenta que de esta manera se mide el transporte turbulento de CO_2 y se debe de tener en cuenta que la turbulencia este bien desarrollada de tal manera que otros mecanismos de transporte sean insignificamente pequeños. Esto generalmente es el caso durante el día y durante las noches con velocidades de viento por encima de 1.0 m/s. La capacidad del método de covarianza turbulenta para proporcionar mediciones directas de flujos por media hora o cada hora sobre un área de interés que cubre la mayoría de los días y significativas porciones de la noches, es una importante ventaja práctica sobre la medición de flujos turbulentos.

Los sensores mostrados en la figura 2.5 es un ejemplo clásico de lo mínimo con lo que debe de contar una estación de covarianza turbulenta: un anemómetro sónico tridimensional y un analizador de gases. Con este sencillo esquema en mente, ahora se puede cubrir los elementos clave del diseño y funcionamiento de los aparatos que tienen las implicaciones más importantes para las mediciones de flujo del método de covarianza turbulenta.

En primer lugar se cuenta con un anemómetro sónico, que utiliza tres pares de transductores, para medir la velocidad del viento.



FIGURA 2.5: Ejemplo clásico de una estación de covarianza turbulenta.¹

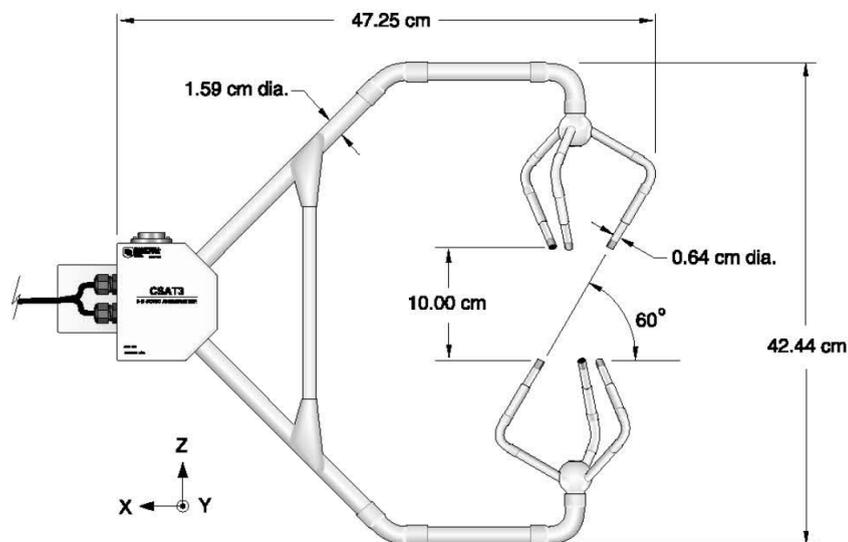


FIGURA 2.6: Descripción de un anemómetro sónico, donde la distancia de los transductores están separados 10 cm verticalmente y 5.8 cm horizontalmente, cada par de transductores forma un ángulo de 60° , el diámetro de cada transductor es de 0.64 cm. El largo de los brazos es de 47.25 cm y la abertura de ellos es de 42.44 cm.⁷

Tres componentes del vector de la velocidad del viento se calculan y la componente vertical de la velocidad del viento (w) se utiliza para el cálculo de la covarianza turbulenta. En la figura 2.6 se muestra el anemómetro sónico y sus medidas en centímetros (cm) para una mejor visualización del instrumento. La Velocidad del sonido se calcula

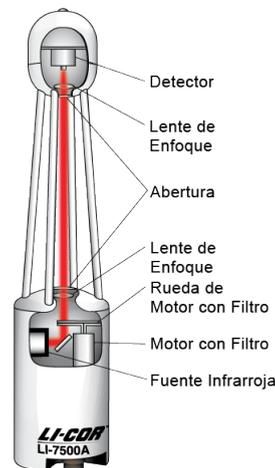


FIGURA 2.7: LI-7500A Analizador de gases de CO_2/H_2O de Canal Abierto.⁶

a partir de la distancia entre los transductores y el tiempo que tarda una señal acústica (onda de ultrasonido) para viajar de un transductor a otro, es decir, a su par. Para ayudar a eliminar los diversos sesgos los transductores con su pareja pueden tomar turnos enviando señales de ultrasonido de manera que cada uno puede actuar como un transmisor y un receptor, la velocidad del viento se calcula a partir de la diferencia en el tiempo que tarda una señal acústica en recorrer el mismo camino en direcciones opuestas o de la diferencia entre la velocidad conocida del sonido en el aire inmóvil y la velocidad del sonido en el aire en movimiento.

En segundo lugar se tiene un analizador de gas de CO_2 y H_2O que se usa para medir y analizar el contenido de gas en el aire. En el método de covarianza turbulenta las fluctuaciones rápidas en la atmósfera y las muestras de concentraciones deben de ser tomadas con una alta resolución a una frecuencia de aproximadamente 10 Hz o más rápido, con el fin de capturar la mayor parte del transporte bajo la mayoría de las condiciones atmosféricas.

Los principios de funcionamiento de un analizador de gases pueden ilustrarse mediante un analizador CO_2/H_2O LI-7500A de canal abierto, mostrado en la figura 2.7.

El LI-7500 analizador de gases de CO_2/H_2O mide las densidades de CO_2 y H_2O

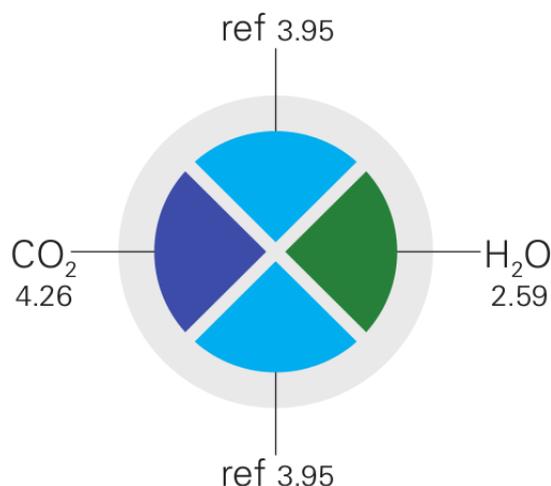


FIGURA 2.8: Filtro dividido en cuatro ventanas con 4.26 para CO_2 , 2.59 para H_2O , y un par de 3.95 para ref. .¹

del aire en un canal de muestreo abierto. La fuente óptica del LI-7500A emite luz infrarroja a través del motor giratorio que contiene el filtro y del canal abierto de muestreo hacia un detector de seleniuro de plomo con temperatura controlada. Parte de la luz infrarroja es absorbida por el dióxido de carbono y el vapor de agua en el canal de muestreo y el índice de absorción con respecto a una referencia se usa para calcular la densidad de los gases⁶.

La luz cercana al infrarrojo se transmite desde la fuente óptica hasta llegar al detector, pero primero pasa por un motor giratorio que contiene un filtro que se utiliza para medir CO_2 y vapor de H_2O . El motor giratorio cuenta con un filtro, este filtro está equipado con cuatro ventanas, cuando el motor gira el filtro gira también ya que se encuentra unido al motor, la luz infrarroja pasa a través de la ventana destinada para medir el CO_2 y sólo permite el paso de la luz en la banda de 4.26 micras (μm) pase a través de él, esta banda puede ser vista como líneas azules en la figura 2.8. En este instante la luz transmitida en la banda de absorción de CO_2 es medida.

En el siguiente instante de rotación, la luz infrarroja pasa por la ventana de referencia, esta banda se puede ver en la figura 2.8 de color azul cielo, siendo esta una banda

de referencia, es decir, este filtro de referencia no absorbe CO_2 ni vapor de H_2O , de igual manera ocurre cuando el haz infrarrojo pasa a través de la ventana de H_2O permitiendo sólo el paso de la luz en la banda de color verde mostrada en la figura 2.8 de 2.59 micras. El método de Covarianza Turbulenta es usado para medir flujos turbulentos, usando un anemómetro sónico se mide la velocidad del viento (que es medida en tres direcciones u , v y w), así como la temperatura T . Además, de que un analizador de gases mide la humedad específica q , concentración de CO_2 , considerando los flujos de calor sensible H , calor latente $L_v E$, CO_2 y F_{CO_2} .

Para los flujos de las cantidades x , en el marco de la covarianza turbulenta se definen:

$$F_x = \overline{\rho w' x'} = \bar{\rho} \text{cov}(w, x) \quad (2.1)$$

donde F_x es el flujo de la cantidad x ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), ρ la densidad del aire ($kg\ m^{-3}$), w es la parte turbulenta de la velocidad vertical del viento ($m\ s^{-1}$) y x es la parte turbulenta de la cantidad escalar x . Además la cantidad x representa $C_p T$ ($J\ kg^{-1}$), $L_v q$ ($J\ kg^{-1}$), donde C_p es la capacidad calorífica del aire a presión constante ($J\ kg^{-1}\ K$) y L_v el calor latente de vaporización ($J\ kg^{-1}$) tomando en cuenta su dependencia con la temperatura.

El tiempo promedio para hacer mediciones en el método de covarianza turbulenta debe de ser lo suficiente grande para medir los remolinos turbulentos más grandes y suficientemente corto para excluir movimientos no turbulentos.

Por último, suponiendo que la velocidad vertical del viento promedio y el flujo turbulento de una variable puede ser descrito únicamente en términos de la covarianza de la variable con la velocidad vertical del viento, esto puede ser usado para describir los flujos turbulentos de momento (τ), el calor sensible (H), y el calor latente ($L_v E$) como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$H = \rho_{air} C_p \overline{w' T'} \quad (2.2)$$

$$L_v E = \rho_{air} \lambda \overline{w' q'} \quad (2.3)$$

$$\tau = -\rho_{air}\overline{w'x'} \quad (2.4)$$

En estas ecuaciones $\overline{w'x'}$ es la covarianza de la velocidad vertical del viento (w) con la variable correspondiente en x , la temperatura del aire (T, K), la humedad específica (q) o la velocidad del viento horizontal (u, ms^{-1}). En este caso u es la velocidad del viento a lo largo de la dirección media, de manera que el otro componente horizontal del viento (v) tiene una media de cero. Es notable que la velocidad de fricción (u_*, ms^{-1}) se puede definir en términos del de flujo del momento (τ)

$$u_* = \left(\frac{\tau}{\rho_{air}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

2.2. Método del cintilómetro

El cintilómetro de gran apertura (SCINTEC BLS450), que fue utilizado en este experimento detecta turbulencia atmosférica y mide flujos de calor en un rango de longitud entre 250 m y 6000 m de trayecto. El cintilómetro funciona haciendo uso de un transmisor óptico y un receptor óptico, el transmisor emite un haz electromagnético sobre la atmósfera (capa límite adyacente) y este haz es distorsionado, haciendo que su velocidad cambie cuando pasa de un medio (a través del aire) a otro medio (vapor de agua) conociendo este fenómeno como refracción y se denomina índice de refracción al cociente de la velocidad de la luz en el vacío sobre la velocidad de la luz en el medio, se simboliza con la letra n y se trata de una cantidad adimensional. Cuyo índice se calcula:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.6)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad en el medio cuyo índice se calcula dependiendo en el medio que se propaga (agua, vidrio, aire etc.).

El principio de funcionamiento se basa en la modulación de la luz por las fluctuaciones del índice de refracción atmosférica en el aire. En comparación con las mediciones de

turbulencia convencionales con otros sensores, los cintilómetros reúnen espacialmente resultados representativos con menor dispersión estadística y los tiempos promedio más cortos, además de que permiten el acceso a terrenos como el bosque o el agua sin necesidad de instalar sensores insitu. A diferencia de otros grandes cintilómetros de gran apertura, el BLS450 Serie SCINTEC utiliza matrices de LED que producen ángulos de emisión ancha. El ángulo de la emisión ancha prácticamente elimina la necesidad de alinear el transmisor con el receptor para proporcionar resultados de mediciones más precisos, además se facilita el uso en torres que a menudo son propensas a la vibración.

Un cintilómetro es un instrumento que mide la cantidad de centelleos que se pueden expresar como el parámetro de estructura del aire C_n^2 . Para un cintilómetro de gran apertura la varianza de las fluctuaciones de intensidad media y el parámetro de estructura es la siguiente:

$$C_n^2 = 1.12\sigma_{lnI}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (2.7)$$

Donde D es el diámetro de la abertura del cintilómetro, L la distancia entre el transmisor y el receptor (es decir, la longitud de la trayectoria). La figura 2.9 muestra un ejemplo del ciclo diurno del parámetro de la estructura del índice de refracción del aire derivado del cintilómetro para un día soleado y los valores típicos de C_n^2 se encuentran registrados entre 10^{-12} y 10^{-17} . Las fluctuaciones en el índice de refracción del aire son causadas por las fluctuaciones de temperatura y humedad, por lo tanto, el parámetro de estructura del índice de refracción del aire se relaciona con los parámetros de estructura de la temperatura C_T^2 y humedad C_q^2 .

$$C_n^2 = \frac{A_T}{T^2} C_T^2 + \frac{2A_T A_q}{T\bar{q}} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 \quad (2.8)$$

Aquí A_T y A_q son cantidades que representan la contribución relativa de cada término de C_n^2 y ellos son una función de la longitud de onda, así como también lo es la temperatura media del aire, humedad relativa media y la presión media del aire. En

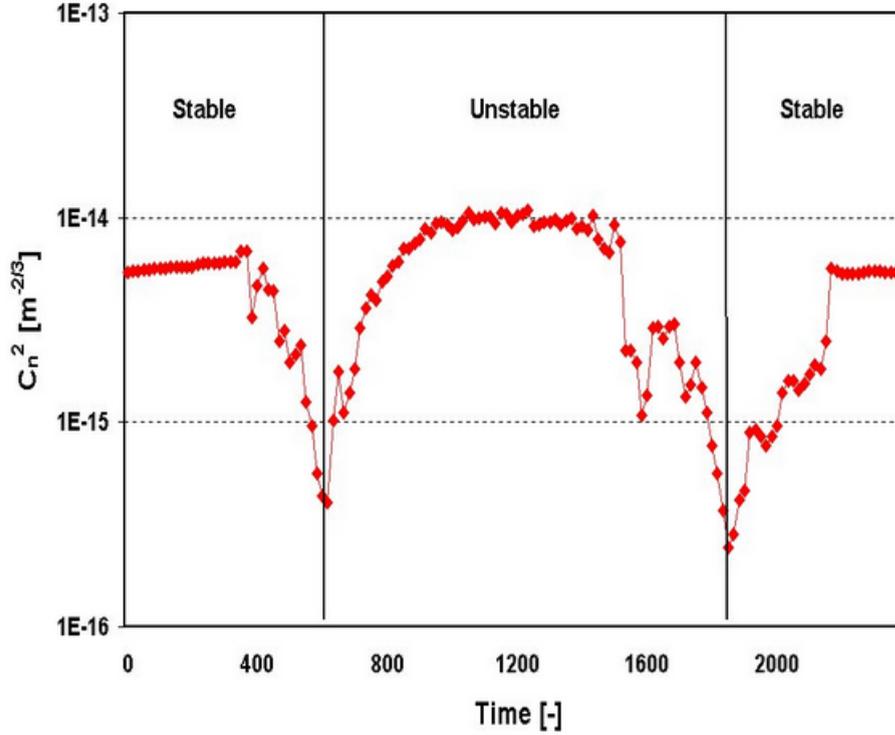


FIGURA 2.9: El comportamiento diurno típico de C_n^2 medido con un cintilómetro

el caso de que el cintilómetro utiliza una longitud de onda cercana al infrarrojo (880 nm) la contribución de los términos de humedad son muy pequeñas. Esto significa que la última ecuación se puede simplificar como sigue:

$$C_n^2 \approx \frac{A_T}{T^2} C_T^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^2 \quad (2.9)$$

donde β es la relación de Bowen, la relación de Bowen se define como la relación entre el calor sensible H y flujo de calor latente $L_v E$, es decir $\beta = H/L_v E$ y A_T es expresada como:

$$A_T = -0.78 \times 10^6 \frac{P}{T} \quad (2.10)$$

Cuando las condiciones de la superficie están secas H es mayor que $L_v E$, resultando para esto altos valores de β (> 3) y esto significa que el término de corrección en la última ecuación es pequeño. Sobre superficies mojadas β es pequeño (< 0.5), lo que

significa que una cantidad significativa de centelleos son causadas por las fluctuaciones de humedad, lo que resulta una gran corrección. Una vez conocido el parámetro de la estructura de la temperatura, el flujo de calor sensible H se puede derivar de:

$$\frac{C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3}}{T_*^2} = f \left(\frac{Z_{LAS} - d}{L_{MO}} \right) \quad (2.11)$$

que se basa en la teoría de similitud Monin-Obukhov (MOST). Esta teoría es explicada en el apéndice A. Aquí Z_{LAS} es la altura del scintilómetro encima de la superficie, d es la altura de desplazamiento cero y T_* es la escala de temperatura que se define como:

$$T_* = \frac{-H}{\rho C_P u_*} \quad (2.12)$$

y L_{MO} es la longitud Obukhov que esta expresada de la siguiente manera:

$$L_{MO} = \frac{u_* T}{g K_v T_*} \quad (2.13)$$

donde ρ es la densidad del aire (1.2kgm^{-3}), C_P es el calor específico del aire ($1005 \text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$), K_v la constante de von Karman (0.40), g la aceleración de la gravedad (9.81ms^{-2}) y u_* la velocidad de fricción. De la ecuación 2.10 podemos definir f que es una función que se usa cuando la atmósfera presenta condiciones inestables (durante el día $L_{MO} < 0$) y se define como:

$$\frac{C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3}}{T_*^2} = 4.9 \left(1 - 6.1 \frac{Z_{LAS} - d}{L_{MO}} \right)^{-2/3} \quad (2.14)$$

y para condiciones cuando la atmósfera es estable (durante la noche $L_{MO} > 0$)

$$\frac{C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3}}{T_*^2} = 4.9 \left(1 + 2.2 \left(\frac{Z_{LAS} - d}{L_{MO}} \right)^{-2/3} \right) \quad (2.15)$$

Con el fin de derivar el flujo de calor sensible H de C_T^2 la velocidad de fricción u_* debe

ser conocida y puede ser derivada de las mediciones de la velocidad del viento de la siguiente manera:

$$u_* = \frac{k_v u}{\ln\left(\frac{Z_u - d}{Z_0}\right) - \psi\left(\frac{Z_u - d}{L_{MO}}\right) + \psi\left(\frac{Z_0}{L_{MO}}\right)}$$

(2.16) donde u es la velocidad del viento a una altura Z_u y Z_0 es la longitud de la rugosidad y ψ la función de estabilidad integrada para el impulso que se define de la siguiente manera para condiciones inestables (durante el día)

$$\psi_m\left(\frac{Z}{L_{MO}}\right) = 2 \ln\left[\frac{1+x}{2}\right] + \ln\left[\frac{1+x^2}{2}\right] - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

donde el valor de x esta dado como:

$$x = \left(1 - 16 \frac{Z}{L_{MO}}\right)^{1/4} \quad (2.18)$$

y para condiciones estables (durante la noche)

$$\psi_m\left(\frac{Z}{L_{MO}}\right) = -5 \frac{Z}{L_{MO}} \quad (2.19)$$

A partir de las mediciones de C_n^2 que fueron obtenidas del cintilómetro y algunos datos adicionales como temperatura T , velocidad del viento u , presión P y Z_0 , con todas estas cantidades escalares el flujo de calor sensible ya puede ser calculado. Para condiciones más diurnas (inestables) y cuando Z_{LAS} es relativamente alta, la contribución de la velocidad de fricción es relativamente pequeña, para estas condiciones, el método para calcular H esta dado como⁹:

$$H = \rho C_P 0.48 (Z_{LAS} - d) \left(\frac{g}{T}\right)^{1/2} (C_T^2)^{3/2} \quad (2.20)$$

El cintilómetro proporciona mediciones que mejoran las mediciones del método de covarianza turbulenta, no sólo en la relación con la representatividad espacial, también lo es con la estacionalidad, es decir, puede ser usado en cualquier época del año.²³

2.3. Métodos Combinados⁸

El cintilómetro BLS450 proporciona (mediante cálculos realizados) u_* y H , pero no proporciona $L_v E$, mientras que el método de covarianza turbulenta proporciona las tres cantidades escalares mencionadas, por lo tanto, se combinarán las mediciones realizadas por el método de cintilometría con las mediciones realizadas por el método de covarianza turbulenta con el fin de obtener $L_v E$ para el método del cintilómetro, para posteriormente hacer una correlación de las mediciones calculadas (flujos de u_* , H y $L_v E$) de ambos métodos, probando así, que el método de cintilometría es tan eficiente como lo es el método de covarianza turbulenta, recordado que el cintilómetro toma mediciones de áreas más grandes en comparación con las mediciones del método de covarianza turbulenta.

Los cuatro métodos para obtener el flujo de $L_v E$ se discuten a continuación, donde los métodos combinados son como su mismo nombre lo dice, una combinación de cantidades escalares de el método de covarianza turbulenta y método del cintilómetro y son conocidos como: método varianza de flujo, método de varianza de Bowen, método de parámetro de estructura y método de balance de Energía.

2.3.1. Método de varianza de flujo

El método de varianza de flujo utiliza la desviación estándar de humedad σ_q , para estimar $L_v E$. En el marco para la función de similitud (MOST) la escala para la humedad específica y las concentraciones q_{*x} se derivan usando:

$$\frac{\sigma_x}{q_{*x}} = f_{xx} \left(\frac{Z_{eff}}{L_0} \right) \quad (2.21)$$

donde $f_{xx}(Z_{eff}/L_0)$ es una función MOST. Tomando en cuenta que Z_{eff} es la altura efectiva del higrómetro de respuesta rápida.

En el método de varianza de flujo, $L_v E$ se obtiene utilizando:

$$F_x = -\rho u_* q_{*x} = -\rho \frac{u_*}{f_{xx} (Z_{eff}/L_0)} \sigma_x = -\rho K_{x,std} \sigma_x \quad (2.22)$$

donde $K_{x,std}$ es la eficiencia de transporte de turbulencia del método de varianza de flujo. L_0 , u_* y por lo tanto $K_{x,std}$ se obtienen del cintilómetro y σ_q se obtenida de las mediciones de las cantidades escalares del método de covarianza turbulenta.

2.3.2. Método de varianza de Bowen

El método de varianza de Bowen utiliza las mediciones de temperatura y humedad para estimar la relación de Bowen, utilizando la el flujo de calor sensible H del cintilómetro para obtener $L_v E$, por lo tanto, la relación de Bowen, β se define como la relación entre H y $L_v E$ y puede escribirse en términos de las desviaciones estándar de la temperatura σ_T y la humedad σ_q

$$\beta \equiv \frac{H}{L_v E} \equiv \frac{r_{wT} C_p \sigma_T}{r_{wq} L_v \sigma_q}, \quad (2.23)$$

donde r_{wT} es el coeficiente de correlación entre la velocidad vertical y la temperatura y r_{wq} es el coeficiente de correlación entre la velocidad vertical y la humedad. La relación r_{wT}/r_{wq} es conocida como la eficiencia efectiva de transporte, λ_{Tq} representa la disimilitud de la temperatura y/o humedad. Para la similitud perfecta de la función MOST (Monin-Obukhov similarity theory) del calor y la humedad son idénticos y $\lambda_{Tq} = 1$, sin embargo, por lo general λ_{Tq} se aproxima a r_{Tq} para β grandes (> 1) y $1/r_{Tq}$ para β pequeñas (< 0.1), MOST tiene requerimientos que pueden ser violados para una variable pero no necesariamente para la otra. El método de varianza de Bowen, requiere simultáneas similitudes de calor y humedad.

Tomando en cuenta que todas estas parametrizaciones son empíricas. En el método

de varianza de Bowen, $L_v E$ se obtienen usando:

$$F_x = \frac{\rho}{\lambda_T x} \frac{H}{\rho c_p} \frac{\sigma_x}{\sigma_T} = \rho K_{x,Bowen} \sigma_x \quad (2.24)$$

H es obtenida del cintilómetro r_{Tq} , σ_T y σ_q son obtenidos de las mediciones de las cantidades escalares del método de covarianza turbulenta.

2.3.3. Método de parámetro de estructura

El método de parámetro de estructura usa el parámetro de estructura de la humedad C_q^2 , para estimar $L_v E$. El parámetro de estructura es definido como:

$$C_x^2 = \frac{D_x^2}{r^{2/3}} = \frac{\overline{[x(y) - x(y+r)]^2}}{r^{2/3}}, \quad (2.25)$$

donde la barra denota el promedio temporal t_{pro} , D_x^2 es la función de estructura de una función x , $\Delta x = x(y) - x(y+r)$ es la diferencia de concentración de la cantidad x entre y y $y+r$ (r es la distancia que debe estar en el sub-rango inercial del espectro de turbulencia). Suponiendo turbulencia congelada, el parámetro de estructura es derivado de una serie de tiempo de un sensor reemplazando r por $U\Delta t$ con U la velocidad del viento promediada y Δt la diferencia entre las dos mediciones.

En el marco de trabajo para MOST, q_{*x} es derivado usando:

$$\frac{C_x^2 Z_{eff}^{2/3}}{q_{*x}^2} = f_x \left(\frac{Z_{eff}}{L_0} \right), \quad (2.26)$$

donde $f_x(Z_{eff}/L_0)$ es una función MOST. Tomando en cuenta que Z_{eff} es la altura efectiva del cintilómetro.

En el método de parámetro de estructura $L_v E$ obtenido usando:

$$F_x = -\rho u_* q_{*x} = -\rho Z_{eff}^{1/3} \frac{u_*}{\sqrt{f_x(Z_{eff}/L_0)}} \sqrt{C_x^2} = -\rho K_{x,strapar} \sqrt{C_x^2}, \quad (2.27)$$

donde $K_{x,stripar}$ es la eficiencia del transporte turbulento del método de parámetro de estructura. L_0 y u_* , y así $K_{x,stripar}$ son obtenidos de las mediciones de la turbulencia de las cantidades escalares.

2.3.4. Método de balance de Energía

El método de balance de energía usa el balance de energía para estimar $L_v E$ y ha sido aplicado con éxito en combinación con el cintilómetro. El método supone que toda la radiación neta, Q_{net} , es transferida dentro de los flujos de calor sensible, calor latente y calor del suelo G :

$$Q_{net} = H + L_v E + G, \quad (2.28)$$

en el método de balance de energía H es obtenida del cintilómetro, Q_{net} y G son mediciones adicionales. Tomando en cuenta que al contrario de otros métodos combinados, las mediciones adicionales del método de balance de energía son no turbulentos y que el método solo tiene rendimientos para $L_v E$.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

3.1. Arreglo experimental

Los datos utilizados en este estudio se reunieron en el proyecto "Evapotranspiración sandía costa de Hermosillo 2015". Este estudio se centra en los procesos de intercambio de energía en forma de calor entre el suelo, la vegetación y la capa límite atmosférica adyacente.

Las mediciones se tomaron en un campo de sandía cerca de Hermosillo Sonora, México ($29^{\circ}00'20.5''\text{N}$ $111^{\circ}08'32.6''\text{W}$) entre el 6 de marzo y el 12 de junio del 2015, las dimensiones del campo fueron de 394.12 m por 653.01 m, tomando en cuenta que conforme la vegetación en el cultivo incrementará su tamaño (altura) el intercambio de energía sería diferente en los primeros días, que en los últimos. El flujo de calor sensible H fue calculado con un cintilómetro de gran apertura BLS450, que consta de un transmisor que emite una onda electromagnética y un receptor, ambos colocados en dos esquinas del campo de sandía, haciendo que la trayectoria del haz fuera desplazada diagonalmente sobre el cultivo, como se muestra en la figura 3.1.

En el centro del campo se instaló un sistema de covarianza turbulenta. El sistema consistía en un anemómetro sónico CSAT3 (Campbell scientific, Logan, USA), un sensor



FIGURA 3.1: Cultivo de sandía a un costado del D.A.G (Departamento de Agricultura y Ganadería) de la Universidad de Sonora.

de H_2O/CO_2 LiCor7500 (LiCor, Lincol, USA) y registradores de datos (dataloger) CR200, CR1000 y CR5000 mostrados en la figura 3.3. El cintilómetro se instaló a una altura de 2.45 m sobre el nivel del suelo. Su trayectoria fue dirigida de norte a este, con una longitud del del emisor al receptor de 764 m.

Durante el periodo de medición la temperatura promedio fue de alrededor $22.4^{\circ}C$, con mínimos y máximos por lo general entre $12.98^{\circ}C$ y $38.96^{\circ}C$.



FIGURA 3.2: Trayectoria en la que fue montado el cintilómetro.

3.2. Procesamiento de datos

La recolección de la información que contienen la base de datos crudos, fueron tomados directamente de la estación de covarianza turbulenta con ayuda del software "Logger-Net4.0", promediado cada 30 minutos, para posteriormente ser procesados utilizando un paquete de software Eddypro 5.2.1. El programa Eddypro hace los cálculos correspondientes en la base de datos para obtener las distintas cantidades escalares entre ellas el flujo de calor latente ($L_v E$), flujo de calor sensible (H), temperatura del aire (T_{air}), velocidad del viento (V_{win}), radiación (R), flujo de CO_2 entre otras cantidades. Las mediciones del cintilómetro BLS450 fueron obtenidas con el software BLSrun 1.42, que es proporcionado por la compañía Scintec. La base de datos muestra las cantidades escalares de cada día en un archivo con formato ".mdn", que al final del



FIGURA 3.3: Estación de covarianza turbulenta, montada en el centro de la trayectoria del cintilómetro

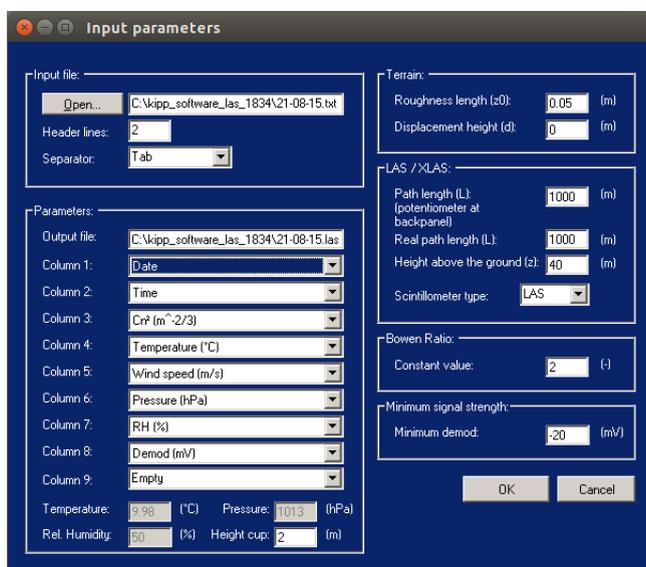


FIGURA 3.4: El software WinLas despliega una ventana que muestra los parámetros y datos requeridos para el procesamiento de datos

experimento todos estos archivos que contienen la información diaria, fueron juntados en un solo documento dando un formato ".txt". En este nuevo documento se muestra el índice de refracción del aire (C_n^2) con sus horas y días julianos correspondientes en cada muestreo del día que durante el experimento.

Para calcular el calor sensible H del cintilómetro, fue necesario hacer uso del software "WinLas", que pide un archivo de entrada que contenga los parámetros de cantidades escalares tomadas tanto de las mediciones del cintilómetro como del método de covarianza turbulenta, como alturas, presión, temperatura, etc. En este archivo es donde se combinaron cantidades escalares que fueron obtenidos de la estación de covarianza turbulenta y el C_n^2 obtenido de los cálculos realizados del cintilómetro, uniéndolos en un archivo ".txt", como se muestra en al figura 3.5.

Los cálculos de flujos con técnicas de cintilómetro son más sencillos que los de covarianza turbulenta en el sentido que no son adicionales, debatibles, de correcciones necesarias como rotación de ejes, correcciones del tamaños de los remolinos muestreados.

Doy [-]	Time [UTC]	Cn2 [m ^{-2/3}]	T [C]	Demod [mV]	PUCn2 [-]	u [m/s]
11	0	4.1020E-16	12.21	-201.9	-6999	0.641
11	10	6.2373E-16	11.81	-206.1	0.69079	0.598
11	20	6.6527E-16	11.78	-207.4	0.68223	0.46
11	30	4.1210E-16	12.12	-203.5	0.4204	0.451
11	40	3.0339E-16	12.09	-202.7	0.30727	0.525
11	50	3.8548E-16	11.89	-204	0.38883	0.462
11	100	4.4771E-16	11.94	-205.3	0.45393	0.428
11	110	4.5290E-16	12.32	-206.6	0.45752	0.643
11	120	2.5293E-16	11.61	-205.9	0.2674	0.646
11	130	1.2134E-16	11.72	-206	0.12475	0.405
11	140	1.5066E-16	11.69	-207.6	0.15895	0.559
11	150	2.1979E-16	11.65	-207.9	0.22871	0.773
11	200	4.2658E-16	11.13	-208.7	0.44811	0.618
11	210	7.8163E-16	10.78	-210	0.81316	0.535
11	220	3.8548E-16	10.96	-212.1	0.41323	0.721
11	230	5.3456E-16	11.01	-214.1	0.58379	0.678
11	240	7.2444E-16	10.47	-214.5	0.75748	0.453
11	250	9.7724E-16	10.53	-212.7	0.99169	0.92
11	300	6.4565E-16	10.35	-208.9	0.66497	1.575
11	310	3.6728E-16	10.28	-206.8	0.38354	0.811
11	320	2.6915E-16	10.74	-204.2	0.27361	0.956
11	330	3.7411E-16	10.72	-203.8	0.42761	0.518
11	340	3.5156E-16	10.92	-206.4	0.38075	0.372
11	350	3.6392E-16	11.49	-206.6	0.38706	0.54
11	400	2.8708E-16	11.32	-209.4	0.29171	0.494
11	410	3.1333E-16	11.3	-204.7	0.33055	0.989
11	420	4.0644E-16	11.25	-197	0.42769	0.431
11	430	3.5156E-16	12.42	-185.4	0.36355	0.809
11	440	3.0269E-16	12.36	-176.7	0.31033	1.043
11	450	4.5394E-16	12.84	-176.6	0.46937	0.948
11	500	3.1117E-16	13.61	-171.9	0.33164	1.568
11	510	6.8234E-16	13.99	-146.6	0.71477	2.467
11	520	3.2734E-16	14.29	-137	0.35861	2.451
11	530	3.6898E-16	14.77	-124.8	0.40205	1.938
11	540	5.9979E-16	14.93	-112.4	0.62051	2.236
11	550	9.1833E-16	14.99	-105.8	0.95792	2.561
11	600	9.9312E-16	14.96	-102.4	1.0178	2.341
11	610	7.1779E-16	15.09	-85	0.74559	1.869
11	620	1.6827E-15	15.55	-46.46	1.8633	2.353
11	630	2.4434E-14	15.91	-11.13	446.41	3.97
11	640	3.5481E-15	16.07	-15.21	15.556	4.136
11	650	1.5101E-12	15.85	-1.806	1590.7	4.102
11	700	1.5596E-12	15.97	-1.823	1563.8	3.055
11	710	8.0353E-13	16.16	-2.028	877.43	3.527
11	720	1.0069E-13	16.48	-3.004	130.33	2.815
11	730	4.3451E-15	16.54	-25.71	8.9348	3.117
11	740	1.3772E-14	16.72	-6.99	13.809	2.674
11	750	1.4894E-14	17.18	-6.582	14.989	2.553

FIGURA 3.5: Se muestra el archivo con las cantidades escalares necesarias para hacer una corrida en el software WinLas.

Capítulo 4

Validación de los métodos combinados con los datos experimentales

4.1. u_* y H del cintilómetro

En esta sección se discute la validación de los resultados en los métodos combinados evaluados en un intervalo de 30 minutos. Empezando el análisis de los datos de salida del cintilómetro, aplicándolos para calcular los flujos de calor latente $L_v E$ de cada método. En la figura 4.1 se muestra la comparación de salida del cintilómetro y del método de covarianza turbulenta, ambos para u_* con un coeficiente de correlación de $r = 0.5895$. De igual manera se comparan los datos para H con un coeficiente de correlación de $r = 0.6333$, mostrado en la figura 4.2. De igual manera se calculó el error en ambos métodos, que es una medida de la variación de los valores previstos alrededor de los valores medidos, también conocido como la raíz de la suma de los cuadrados (root mean square error, RMSE). Teniendo así un error de $RMSE = 0.168$ para u^* y $RMSE = 316$ para H .

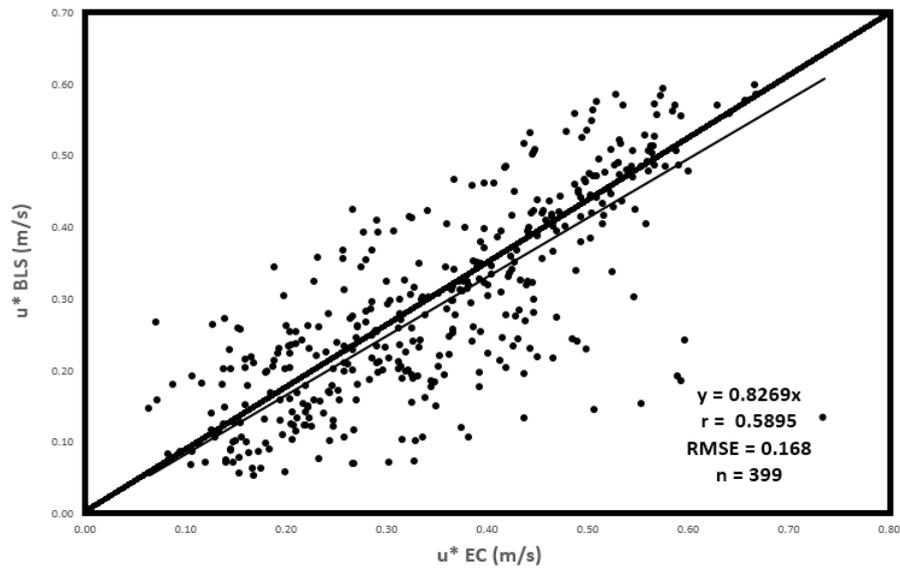


FIGURA 4.1: Comparación entre las mediciones del cintilómetro y las mediciones del método de covarianza turbulenta para la velocidad de fricción u_*

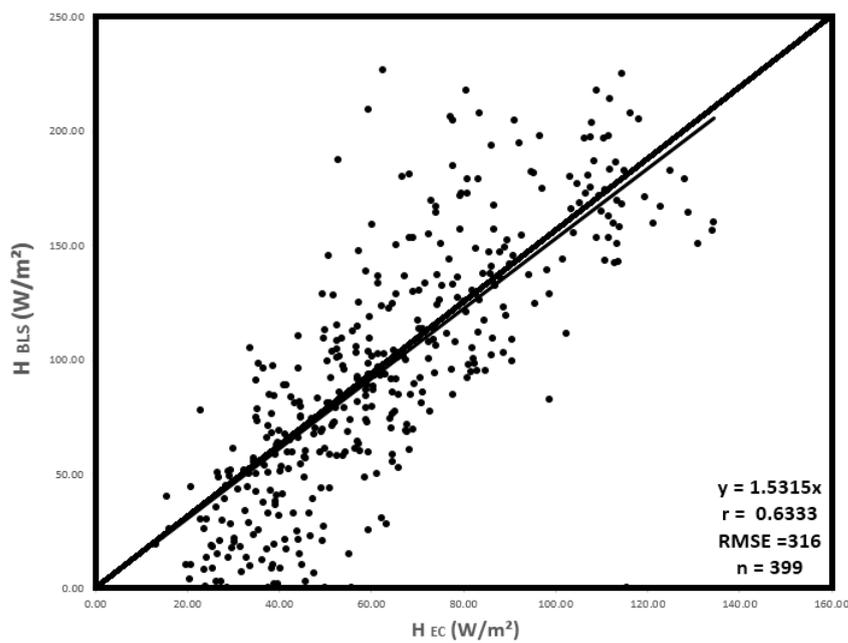


FIGURA 4.2: Comparación entre las mediciones del cintilómetro y las mediciones del método de covarianza turbulenta para el flujo de calor sensible H

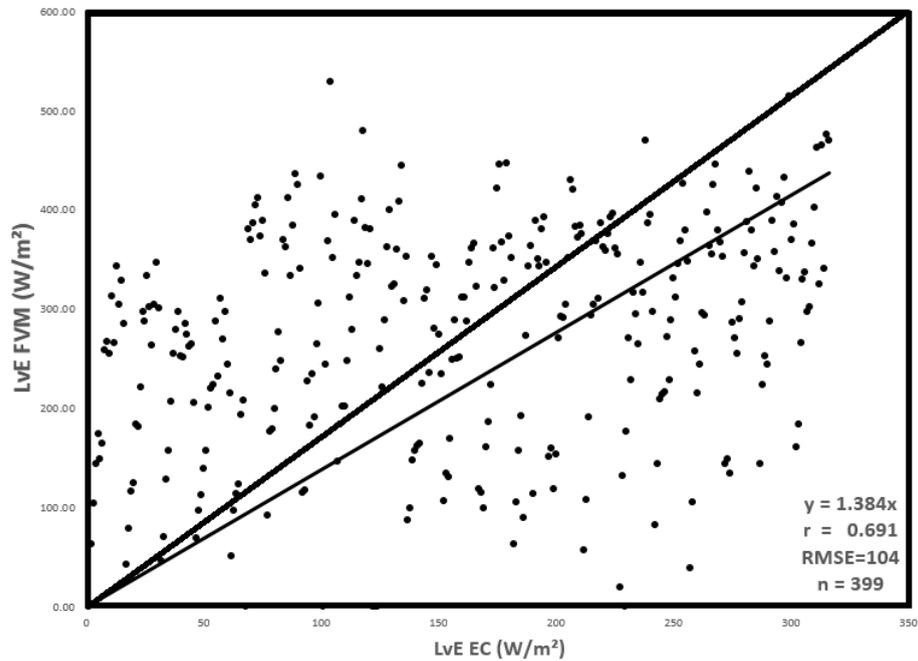


FIGURA 4.3: comparación entre el método de covarianza turbulenta y los método de varianzade flujo

4.2. Método de varianza de flujo

El primer método considerado es el método de varianza de flujo, en este método el calculo para $L_v E$ se obtuvo una dispersión alta de $r = 0.691$ con un erro de $RMSE = 104$. Los resultados para $L_v E$ se muestran al en la figura 4.3 y fueron calculados a lo largo del día (de 8:00am a 5:00pm).

4.3. Método de varianza de Bowen

El segundo método que se analiza es el método de varianza de Bowen. El calculo realizado para obtener el flujo de $L_v E$ en este método fue un poco mas elaborado que en el método de varianza de flujo, ya que fueron utilizadas un numero mayor de cantidades escalares. Encontrando una dispersión alta para $L_v E$ de $r = 0.513$ y un

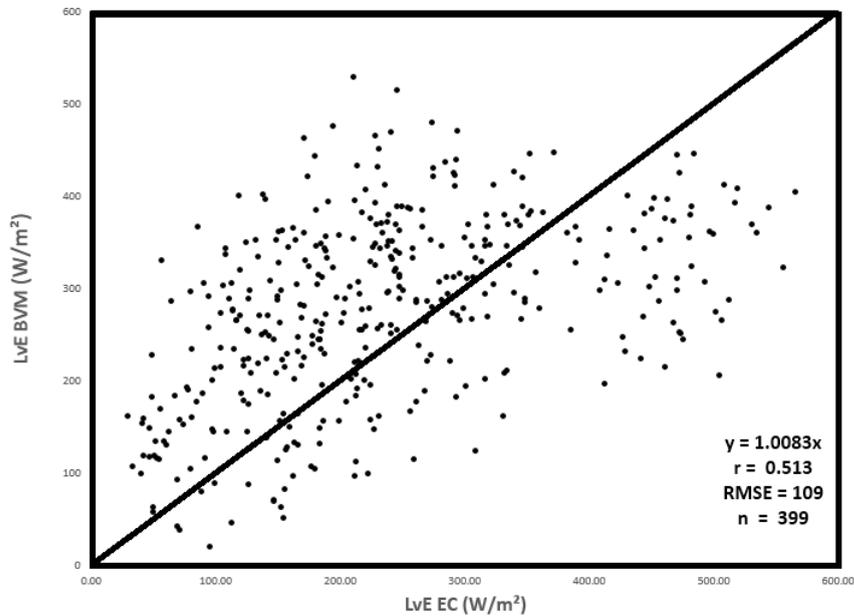


FIGURA 4.4: comparación entre el método de covarianza turbulenta y los método de varianzade de Bowen

error de $RMSE = 109$ no mejor que el método de varianza de flujo. El flujo en este método fue calculado usando la base de datos durante el día (de 8:00am a 5:00pm) como se muestra en la figura 4.4, para la base de datos durante la noche (análisis no mostrado) no se tuvo una buena correlación para este método.

4.4. Método de parámetro de estructura

El tercer método que es considerado en este estudio para estimar el flujo de $L_v E$ es el método de parámetro de estructura. La dispersión es alta $r = 0.663$ con $RMSE = 110$, mejorando un poco la dispersión que en el método de varianza de Bowen, mostrado en la figura 4.5, pero no mejor que en el método de varianza de flujo.

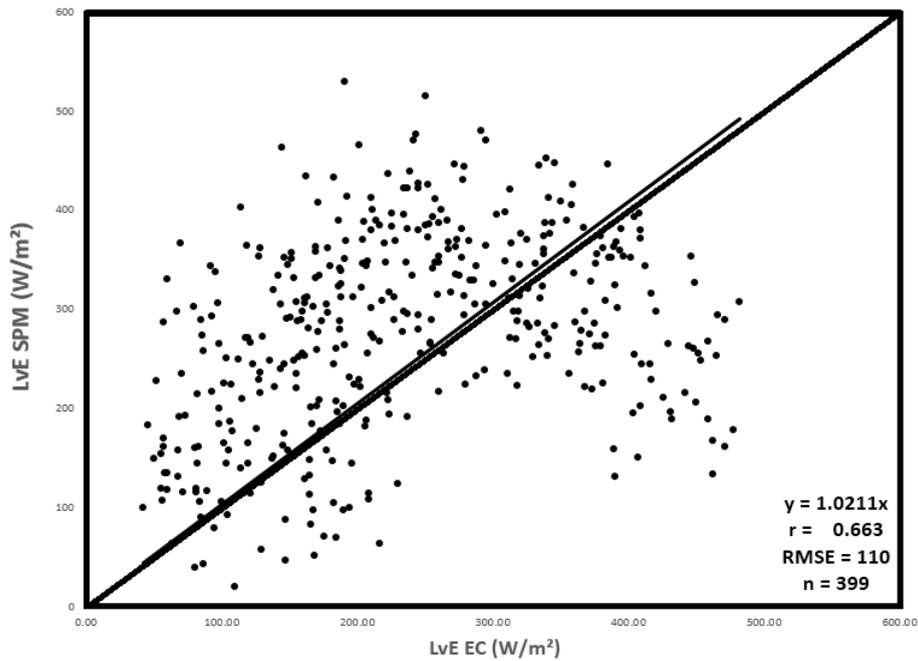


FIGURA 4.5: comparación entre el método de covarianza turbulenta y los método de parámetro de estructura

4.5. Método de balance de energía

El cuarto y último método que se considera es el método de balance de energía. Este método no mejoro a los tres métodos anteriores mencionados en este capítulo, con una dispersión baja de $r = 0.4999$ con un erro de $RMSE = 134$. Para este método solo los datos que se utilizaron fueron durante el día (8:00am-5:00pm). Los valores de la mañana de L_vE para este método de balance de energía, mostrados en al figura 4.6 son por lo general más altos que los valores de la tarde para un valor dado de L_vE . Para los datos durante las 24 horas del día, la dispersión es baja $r = 0.91$.

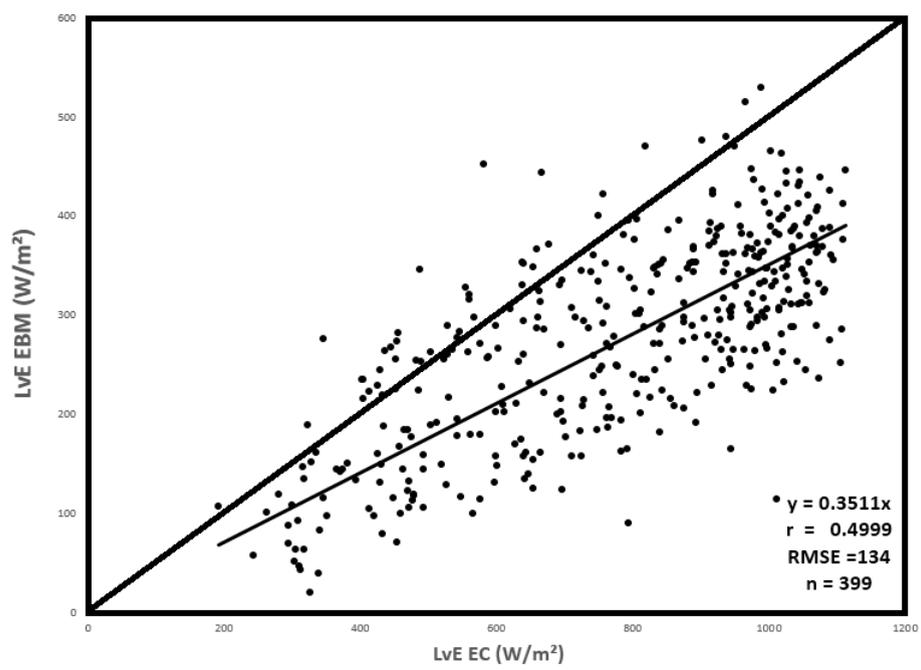


FIGURA 4.6: comparación entre el método de covarianza turbulenta y los método balance de energía

Capítulo 5

Conclusiones

El propósito de esta investigación fue identificar si el cintilómetro podría ser utilizado para monitorear el consumo de agua en condiciones ambientales difíciles (vegetación, método de riego que tiene un patrón irregular, y características variables del suelo). Se realizó un experimento sobre el cultivo de sandía, que se encuentra en el noroeste de Hermosillo, Sonora (México). Una estación de covarianza turbulenta (mediciones a escala local) y un cintilómetro BLS450 (mediciones a gran escala) fueron instalados por encima del cultivo.

Se ha demostrado que el método del cintilómetro es una técnica poderosa y precisa para calcular flujos de calor de alto nivel en la atmósfera de la tierra, en una determinada área de estudio, en esta ocasión en un cultivo agrícola de sandía. Dentro de las incertidumbres experimentales, se encontró una buena correlación entre los flujos de calor sensible H y latente $L_v E$ que determina el cintilómetro BLS450.

Los flujos de calor sensible del cintilómetro acordaron razonablemente bien con los derivados de la estación de covarianza turbulenta durante condiciones homogéneas (condiciones secas, húmedas y días de lluvia). Este resultado confirma que el cintilómetro BLS funciona bien, para estimar flujos turbulentos, durante los eventos de riego la comparación mostró una gran dispersión entre los dos métodos debido a la gran diferencia en el área de las fuentes del cintilómetro BLS y covarianza turbulenta

creado por el riego.

En consecuencia, la comparación entre los flujos de calor latente $L_v E$ y calor sensible H derivados del cintilómetro y por la estación de covarianza turbulenta, produce un acuerdo aceptable comparado con la teoría de flujos turbulentos de calor y con otros estudios realizados y de igual manera para los cuatro métodos combinados². Se concluye que el uso de estimación de energía (en forma de calor) disponible que se puede derivar de los distintos métodos usados en este experimento, acuerdan que el cintilómetro es una herramienta potencialmente útil para obtener flujos de calor latente y sensible en gran escala incluso sobre superficies complejas. Por lo tanto, este dispositivo ofrece un gran potencial para la aplicación práctica de los métodos para estudios de balance energía.³

Apéndice A

Glosario

A.1. Glosario

Balance de Energía.

Calor Latente $L_v E$.

Calor Sensible H .

Covarianza turbulenta (Eddy covariance EC).

Razón de Bowen β .

Calor del suelo G .

Radiación neta R_n .

Índice de refracción del aire C_n^2 .

Parámetro de estructura de temperatura C_T^2 .

Calor específico a presión constante C_p .

Aceleración debido a la gravedad g .

Longitud Obukhov L .

presión del aire p .

humedad específica q .

coeficiente de correlación r .

Humedad raltiva HR .

tiempo t .

Temperatura T

Velocidad del viento u .

velocidad de fricción u_* .

Componente longitudinal de la velocidad del viento u .

Componente lateral de la velocidad del viento v .

Componente vertical de la velocidad del viento w .

Dirección horizontal (longitud) x .

Dirección horizontal (longitud, perpendicular para x) y .

medición de la altura z .

Altura efectiva Z_{eff} .

Diferencia de temperatura ΔT .

Diferencia de velocidad del viento Δu .

diferencia de altura Δz .

Disipación de energía ε .

Altura sin dimensiones (Z/L) ζ .

Constante de Von Kármán k .

Densidad del aire ρ .

Desviación estándar de humedad σ_q .

Desviación estándar de temperatura σ_T .

Apéndice B

funciones de similitud

Monin-Obukhov de C_T^2 y ε en la capa límite estable

B.1. Introducción

Las estaciones meteorológicas que contienen cintilómetros han demostrado ser un buen método alternativo para obtener los flujos de calor y momento en la capa límite estable atmosférica. La principal ventaja sobre el método de covarianza turbulenta tradicional es que los flujos turbulentos se pueden obtener en intervalos cortos (en 1 hora y menos) cerca de la superficie.

Las variables turbulentas básicas que se miden con un cintilómetro son la disipación de la turbulencia de la energía cinética, ε , y el parámetro de la estructura de la temperatura C_T^2 y para determinar los flujos turbulentos, se hace uso de las relaciones universales entre ε adimensional y C_T^2 y la altura adimensional $\zeta = z/L$, donde z indica la altura y L la longitud Monin-Obukhov, donde estas funciones existen en virtud de la teoría de la similitud Monin-Obukhov.

Suponiendo un equilibrio productivo de la turbulencia de energía cinética y la variación de la temperatura (T-varianza), las funciones Monin-Obukhov ε y C_T^2 están relacionadas con las funciones de la mayor parte de la velocidad adimensional horizontal del viento y posibles gradientes de temperatura, ϕ_m y ϕ_h respectivamente.

B.2. Teoría

Según la funciones de similitud Monin-Obukhov las siguientes relaciones definen las relaciones de escala de ε y C_T^2 en la capa superficial atmosférica:

$$\frac{kZ\varepsilon}{u_*^3} = f_\varepsilon(\zeta) \quad (\text{B.1})$$

y

$$\frac{C_T^2 Z^{2/3}}{\theta_*^2} = f_T(\zeta) \quad (\text{B.2})$$

donde z es la medición de la altura, la constante de von Kármán (0.4), θ_* la escala de temperatura, u_* la velocidad de fricción, $\zeta Z/L$ es un parámetro de la altura adimensional con $L = Tu_*^2/g\theta_*$ conocida como longitud de Monin-Obukhov y f_ε y f_T son funciones Monin-Obukhov, en esta caso para condiciones estables, es decir, $L > 0$.

En consecuencia, la turbulencia de energía cinética producida localmente por la flotabilidad y la turbulencia mecánica también se disipa de forma local, esto se refiere a menudo como la "hipótesis de disipación local". La turbulencia de energía cinética simplificada en forma no-dimensional se relaciona directamente con f_ε a la gradiente dimensional ϕ_m de la velocidad del viento horizontal media, u :

$$f_\varepsilon = \phi_m - \zeta, \quad (\text{B.3})$$

donde ϕ_m , es definida como $\phi_m \equiv (kZ/u_*)\partial\bar{u}/\partial z$ representa la producción mecánica de energía cinética turbulenta, ζ representa la producción de energía cinética turbulenta de flotabilidad o destrucción dependiendo del signo de ζ y f_ε es la dimensional razón de disipación. Un similar argumento para la T-varianza conduce a la ecuación:

$$f_T = \frac{3}{k^{2/3}} \frac{\phi_h}{f_\varepsilon^{1/3}} \quad (\text{B.4})$$

donde ϕ_h , el gradiente de temperatura θ , es definido como $\phi_h \equiv (kZ/\theta_*)\partial\bar{\theta}/\partial z$.

B.3. Funciones de similitud f_ε y f_T para ε y C_T^2 .

Considerando que f_ε esta dado como:

$$f_\varepsilon(\zeta) = [1 + 2.3\zeta^{0.6}]^{3/2}, \quad (\text{B.5})$$

Una propuesta por Wyngaard y Cot (1971) y adaptado por Andreas (1989). Usando la constante Von Karman para tener en cuenta $k = 0.4$ en lugar de 0.35.

$$f_\varepsilon(\zeta) = [1 + 4\zeta + 16\zeta^2]^{1/2}, \quad (\text{B.6})$$

Otra propuesta por Thiermann y Grassl (1992),

$$f_\varepsilon(\zeta) = 0.85 + 4.26\zeta + 2.58\zeta^2, \quad (\text{B.7})$$

Una propuesta más por Frenzen y Vogel (2001):

$$f_\varepsilon(\zeta) = c_{\varepsilon 1} + c_{\varepsilon 2}\zeta, \quad (\text{B.8})$$

Varios autores utilizan la Ecuación B.8 con diferentes valores para las constantes $c_{\varepsilon 1}$ y $c_{\varepsilon 2}$; Wyngaard (1973) dio $c_{\varepsilon 1} = 1$ y $c_{\varepsilon 2} = 5$, Högström (1990) encontró $c_{\varepsilon 1} = 1.24$

y $c_{\varepsilon 2} = 4.7$, y recientemente Pahlow et al. (2001) obtuvieron $c_{\varepsilon 1} = 0.61$ y $c_{\varepsilon 2} = 5$. La forma original de la Ecuación B.7 dada por Frenzen y Vogel (2001) $f_{\varepsilon} = (0.85 + 0.6\zeta)(\phi_m - \zeta)$ con $\phi_m = 1 + 5.3\zeta$. En la ecuación B.7, se insertó su función ϕ_m en la expresión f_{ε} . Frenzen y Vogel (2001) también dieron una función hiperbólica de f_{ε} para el rango estable e inestable. Ellos argumentaron que esta función es la mejor forma ya que es continua tanto para los casos estables e inestables y representa más de cerca las zonas de transición entre los dos regímenes. El interés en condiciones estables, por lo tanto, sólo se tendrá en cuenta su función f_{ε} estable.

Teniendo en cuenta que Hill (1997) citó erróneamente Frenzen y Vogel (1992) en su literatura las expresiones f_T y f_{ε} , dio $f_{\varepsilon} = 0.84 + 5\zeta$ para condiciones estables después de Frenzen y Vogel (1992), el que también sugerían $f_{\varepsilon} = 0.84$ para condiciones neutras, pero este resultado se obtiene utilizando únicamente los datos inestables y no se presentaron datos estables.

Para $f_{\varepsilon}(0) \neq 1$ no hay un equilibrio entre las tasas de disipación y de producción de la energía cinética turbulenta en condiciones neutrales, Esto se deduce directamente de la ecuación B.3, donde se puede ver que $f_{\varepsilon}(0) = \phi_m(0)$, donde $\phi_m(0)$ es 1 para la definición de la constante de Von Kármán. Frenzen y Vogel (1992 y 2001) y Pahlow et al. (2001) encontró $f_{\varepsilon}(0) > 1$.

Para f_T se considera:

$$f_T(\zeta) = c_{T1} [1 + c_{T2}\zeta^{2/3}], \quad (\text{B.9})$$

después Wyngaard et al. (1971) con $c_{T1} = 4.9$ y $c_{T2} = 2.4$. Usando $c_{T2} = 2.2$, después Andreas (1989), tiene en cuenta para $k = 0.4$ en lugar $k = 0.35$ usado por Wyngaard. Thiermann y Grassl (1992) encontraron:

$$f_T(\zeta) = 6.34 [1 + 7\zeta + 20\zeta^2]^{1/3}. \quad (\text{B.10})$$

Bibliografía

- [1] Burba, G. (2013). Eddy covariance method. *Li-COR Biogeosciences, Lincoln, NE*.
- [2] Evans, J., McNeil, D., Finch, J., Murray, T., Harding, R., Ward, H., & Verhoef, A. (2012). Determination of turbulent heat fluxes using a large aperture scintillometer over undulating mixed agricultural terrain. *Agricultural and forest meteorology, 166*, 221–233.
- [3] Ezzahar, J., Chehbouni, A., Hoedjes, J. C., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Boulet, G., Bonnefond, J.-M., & De Bruin, H. (2007). The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management, 89*(3), 173–184.
- [4] Gruber, M. A., Fochesatto, G. J., Hartogensis, O. K., & Lysy, M. (2013). Functional derivatives applied to error propagation of uncertainties in topography to large-aperture scintillometer-derived heat fluxes. *arXiv preprint arXiv:1309.4735*.
- [5] Hartogensis, O. K. (2006). *Exploring scintillometry in the stable atmospheric surface layer*. Citeseer.
- [6] LI-COR. Li-7500a analizador de gases de co₂/h₂o de canal abierto. WEB. Tomado de:https://es.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-7500A/system_components.html. El 01 de julio de 2016.

-
- [7] SCIENTIFIC, C. Csat3 three dimensional sonic anemometer. WEB. Tomado de: <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/csat3.pdf>. El 01 de julio de 2016.
- [8] Van Kesteren, B., Hartogensis, O., Van Dinter, D., Moene, A., & De Bruin, H. (2013). Measuring h_2o and co_2 fluxes at field scales with scintillometry: Part i—introduction and validation of four methods. *Agricultural and forest meteorology*, 178, 75–87.
- [9] Zonen, K. . Theory scintillation method. WEB. Tomado de:<http://www.kippzonen.es/> 03 julio de 2015.