

## Reporte Técnico

# Base de datos de las observaciones de las Boyas Oceanográficas y de Meteorología Marina (BOMM)



Grupo de Oleaje

Departamento de Oceanografía Física

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior

Ensenada, B.C., México

22 de abril de 2019

Elaboró: D.S.P. Zapata

Revisión 2.0

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Niveles de procesamiento . . . . .	3
1.2. Estructura de los archivos . . . . .	3
1.3. Formato NetCDF . . . . .	4
<b>2. Descripción de la base de datos</b>	<b>4</b>
2.1. Nivel 0 . . . . .	4
2.2. Nivel 1 . . . . .	5
2.3. Nivel 2 . . . . .	9
<b>3. Procesamiento de los datos</b>	<b>12</b>

---

## 1. Introducción

En este reporte técnico se presenta una descripción detallada del conjunto de datos observados con las Boyas Oceanográficas y de Meteorología Marina (BOMM).

### 1.1. Niveles de procesamiento

Para los fines de este trabajo, se definieron tres niveles de procesamiento, los cuales se describen a continuación:

**Nivel 0** En este nivel están los datos binarios que se escriben en la memoria interna de los instrumentos y los datos que son transmitidos a través de comunicación entre los instrumentos y la computadora de la boya. Estos datos están en formato ASCII y no tienen ningún control de calidad ni metadatos incorporados.

**Nivel 1** El primer nivel de procesamiento consiste en generar la base de datos en formato netCDF4 a partir de los datos de Nivel 0. Se hace una acomodación de los datos en una secuencia creciente del tiempo de acuerdo a su tasa de muestreo. Adicionalmente, se llenan los espacios vacíos con banderas de datos no válidos (NaN). Se incorporan los metadatos e información adicional para realizar correcciones y calibraciones. **Ejemplos:** *aceleraciones y tasas de cambio de los ángulos en el marco de referencia del sensor de movimiento, velocidad del viento sin corregir por el movimiento de la boya, posición de los WaveStaff para el cálculo de los espectros direccionales.*

**Nivel 2** En este nivel se presentan las variables resultantes de agrupar y combinar los datos en un tiempo determinado (30 minutos). Específicamente, se presentan promedios de las variables provenientes de diferentes sensores. Se aplican metodologías establecidas para el cálculo de variables derivadas. **Ejemplos:** *espectros direccionales, esfuerzos de Reynolds, rapidez y dirección del viento, parametros integrales del oleaje, etc.*

### 1.2. Estructura de los archivos

Los datos están organizados de la siguiente manera: dentro de la carpeta data hay una carpeta por cada instalación, por ejemplo, la BOMM1 que se instaló cerca de la Isla Todos Santos, tiene el nombre de bomm1\_its. Dentro de esta carpeta hay tres carpetas más con los datos de cada nivel. Más detalles se presentan en la siguiente sección.

```
./data/  
|-- bomm1_its  
|   |-- level0  
|   |-- level1
```

```
|  `-- level2
|  ....
|
|-- bomm2_its
|   |-- level0
|   |-- level1
|   `-- level2
```

### 1.3. Formato NetCDF

Según el SMID de CIGOM (<http://smid.cigom.org/smid-docs/>), en la Línea 1 del proyecto se estableció que la entrega de conjuntos de datos será en formato NetCDF ya que es un formato ampliamente utilizado por la comunidad científica y además es compatible con una gran variedad de software de análisis y visualización. NetCDF (*Network Common Data Form*) es un conjunto de bibliotecas de software y estándares de formato de datos, el cual es independiente de la arquitectura de la máquina, es de código abierto, y permite la creación, acceso y distribución de datos científicos orientados a arreglos. Una de sus mayores ventajas es que es autodescriptivo, es decir, los archivos contienen los datos y los metadatos. Otra de sus ventajas es la portabilidad y la escalabilidad, que permiten una fácil distribución y el acceso a subconjuntos más pequeños de los datos que están alojados en un servidor remoto. Específicamente la versión 4 del formato NetCDF permite la separación de los datos en grupos, lo cual es muy útil cuando se trabajan con datos de diferentes sensores y medidos a diferentes tasas de muestreo en el mismo dataset, como es el caso de los datos de las boyas oceanográficas.

## 2. Descripción de la base de datos

### 2.1. Nivel 0

Se consideran como datos crudos los datos que se escriben directamente en el disco duro de la boya. Estos datos no tiene ningún tipo de procesamiento, y se escriben tal cual como salen de cada uno de los sensores. Los datos crudos son los datos de Nivel 0 y tienen la siguiente estructura:

```
{bomm_name}/
|-- level0/
|   |-- acelerometro/
|   |-- anemometro/
|   |-- binary/
|   |-- gps/
|   |-- marvi/
|   |-- maximet/
```

```
|  |-- msg/  
|  |-- proceanus/  
|  |-- rbr/  
|  |-- signature/  
|  |-- vector/  
|  `-- wstaff/  
|-- level1/  
`-- level2/
```

Se genera una carpeta por cada sensor. En la mayoría de los sensores (los de alta frecuencia) se escribe una carpeta por año, una por mes, una por día y una por hora; y se escribe un archivo cada 10 minutos. Por ejemplo, la ruta del archivo que corresponde a las 10:20 am del 5 de enero de 2018 del anemómetro sónico instalado en la BOMM1-ITS es:

```
./data/bomm1_its/level0/anemometro/2018/01/05/10/anemometro-1801051020.csv
```

Por otra lado, los sensores de baja frecuencia, es decir, los que reportan promedios de los datos, como el sensor de CO<sub>2</sub> y el CTD, se escribe una carpeta por año y una carpeta por mes, y se escribe un archivo por día, el cual contiene los datos a la tasa de muestreo específica.

En la carpeta `binary` se almacenan los archivos binarios originales de los sensores que así lo permiten. Por ejemplo, en el caso de la BOMM1-ITS que estuvo midiendo cerca de la Isla de Todos Santos, entre noviembre de 2017 y febrero de 2018, los sensores que permitieron almacenar los datos binarios fueron el acelerómetro (Ekinox2-M), el MARVI (Módulo de Adquisición y Regulación de Voltaje Inteligente) y el velocímetro Vector. En la carpeta `msg` se almacenan los promedios de los datos que son enviados vía satélite. En las carpetas `level1`, `level2` y `level3` se almacenan los datos procesados en los diferentes niveles, los cuales se describen en las siguientes secciones.

## 2.2. Nivel 1

### Análisis de los datos

Se realizó un análisis y procesamiento de los datos crudos para convertirlos al formato `netCDF`. Para esto, primero se hace una acomodación de los datos en una secuencia creciente de tiempo de acuerdo a su tasa de muestreo. Por ejemplo, algunos sensores presentan imprecisiones en su reloj interno, lo que implica que la tasa de muestreo a la que se programan no sea constante en el tiempo lo cual genera pequeñas variaciones, que hacen que en ocasiones se tengan más o menos datos de los que se esperan en cierto intervalo de tiempo. Por ejemplo, los alambres de capacitancia se programan para medir a una tasa de muestreo de 20 datos por segundo, pero debido a la deriva del reloj, en ocasiones se tiene 19 o 21 datos en un segundo. Para solucionar esto, se genera una arreglo del tiempo de acuerdo a la tasa de muestreo del instrumento y se aplica una interpolación lineal de los datos. Si hay más del 10 %

de datos inválidos de forma continua dentro de un intervalo de 10 minutos, ese intervalo se considera como inválido. Cuando son menos de 10 % los datos inválidos y estos no están de forma continua en el tiempo, los datos inválidos se reemplazan por promedios del intervalo de 10 minutos con el fin de aplicar la interpolación. Finalmente, cuando se tiene espacios vacíos, es decir, intervalos de tiempo donde la boya no registró datos, se genera un arreglo con datos no válidos (NaN) del mismo tamaño y se llenan dichos espacios vacíos. En los datos de Nivel 1 se eliminan también los datos en los que la boya no estaba instalada. Estos datos si se conservan en el Nivel 0.

## Estructura de los archivos

Los datos de Nivel 1 de procesamiento se escriben en archivos netCDF4, usando la capacidad de generar grupos de datos, característica de este formato. Se genera un archivo netCDF4 por cada día de datos. El nombre cada archivo consiste en la fecha en el formato 'yyyymmdd' más la extensión '.nc', por ejemplo:

```
level1/
|-- 20171117.nc
|-- 20171118.nc
|-- 20171119.nc
|--      .
|--      .
|--      .
|-- 20180131.nc
`-- 20180201.nc
```

Cada archivo agrupa los datos en grupos por cada sensor. Por ejemplo, los datos de la BOMM1-ITS se clasifican en los siguientes grupos.

```
groups: ekinox, sonic, gps, marvi, maximet, proceanus,
        rbr, signature, vector, wstaff
```

Los grupos contienen las variables y las dimensiones. En este caso solo se tiene dos tipos de dimensiones, el tiempo y el número de celdas, esta última es exclusiva del perfilador de corrientes Signature 1000 kHz. El siguiente es un ejemplo de la estructura del grupo asociado con los datos del sensor de movimiento Ekinox2-M:

```
group /ekinox:
    sampling_frequency: 100
    serial_number: 5242914
    description: MRU Subsea Ekinox2-M
    convention: X positive towards north buoy, Y eastward and Z downward
```

```
dimensions(sizes): time(8640000)
variables(dimensions): float64 time(time), float64 accel_x(time),
                        float64 accel_y(time), float64 accel_z(time),
                        float64 gyro_x(time), float64 gyro_y(time),
                        float64 gyro_z(time), float64 delta_vel_x(time),
                        float64 delta_vel_y(time), float64 delta_vel_z(time),
                        float64 delta_ang_x(time), float64 delta_ang_y(time),
                        float64 delta_ang_z(time), float64 temp(time)
```

Cada una de las variables tiene atributos, para los cuales se sigue la convención CF-1.7 y las recomendaciones de los manuales de usuario de cada uno de los instrumentos. Por ejemplo, los atributos de la tasa de cambio del ángulo al rededor del eje  $x$ , se presentan a continuación:

```
float64 gyro_x(time)
  _FillValue: nan
  standard_name: gyro_x
  long_name: rate of change of the angle in X direction
  units: rad/s
path = /ekinox
unlimited dimensions:
current shape = (8640000,)
filling on
```

Los metadatos de las mediciones que se incorporan en el archivo netCDF se presentan en un archivo aparte con un formato YAML (<http://yaml.org/>) ya que es el formato más amigable para este tipo de información. Por ejemplo, los atributos globales que identifican la información de la boya son:

```
title: BOMM1-ITS observations from Nov 2017 to Jan 2018.
```

```
summary: >
```

```
This dataset presents air-sea physical and chemical variables from an
Oceanographic and Marine Meteorology buoy (BOMM) near the Isla Todos
Santos, Ensenada, BC, México, from Nov 2017 to Jan 2018. This dataset
is part of the BOMM observations test period.
```

```
keywords: >
```

```
air-sea momentum flux, air-sea carbon exchange, directional wave spectrum,
oceanographic buoy, wave parameters.
```

```
comments: >
```

The BOMM1-ITS was deployed on 2017/11/16 and recovered on 2018/02/02.

```
institution: CICESE - CIGOM
date_created: 2019/01/26
creator_name: The waves group - CICESE
creator_url: https://www.cicese.mx/
creator_email: oleaje@cigom.org
acknowledgments: >
```

This research has been funded by Fondo Sectorial CONACYT-SENER  
Hidrocarburos, Project 201441.

```
references: |
```

Anctil, Donelan, Drennan, Graber, (1994). JAOT 11(4):1144-1150.  
Donelan, Drennan, Magnusson, (1996). JPO, 26(9):1901-1914.  
Ocampo-Torres, García-Nava, Durazo, Osuna, Méndez, Graber, (2010).  
BLM, 138(3):433-451.

```
convention: CF-1.7
```

Igualmente, en el formato YAML se presentan los metadatos asociados con los atributos de cada variable.  
Para esto se separan en grupos de acuerdo con cada sensor como se muestra a continuación:

```
ekinox:
  sampling_frequency: 100
  seconds_per_file: 600
  serial_number : 024000042
  description: MRU Subsea Ekinox2-M
  convention: X positive towards north buoy, Y eastward and Z downward
  variables:
    accel_x:
      column: 6
      long_name: acceleration in X direction
      units: m/s^2
    accel_y:
      column: 7
      long_name: acceleration in Y direction
      units: m/s^2
    .
    .
    .
```



```
delta_ang_z:
  column: 18
  long_name: coning output in Z direction
  units: rad/s
temp:
  column: 15
  long_name: sensor temperature
  units: degrees_celsius
```

En este caso, los metadatos son los mismos que se escribieron en el archivo NetCDF, excepto por algunos como `column` que es el número de la columna en la que se presentan los datos en el archivo ASCII del Nivel 0.

### Ejemplo de acceso a los datos

Los archivos netCDF4 son de fácil acceso en la mayoría de los lenguajes de programación, por ejemplo, en Python se usa la paquetería `netcdf4-python` (<http://unidata.github.io/netcdf4-python/>). A continuación se presenta un ejemplo simple de cómo leer los datos de Nivel 1 en Python 3.6.5:

```
import numpy as np
import netCDF4 as nc
#
filename = "../data/20171117.nc"
data = nc.Dataset(filename) #<-- carga el dataset completo
ekx = data["ekinox"]        #<-- lee el grupo del ekinox
met = data["maximet"]       #<-- lee el grupo de la maximet
#
i, j = 0, 180000            #<-- indices para el tiempo 30 mins
ax = ekx["accel_x"][i:j]    #<-- extrae la aceleracion en x
```

### 2.3. Nivel 2

Los datos de Nivel 2 consisten en promedios de 30 minutos de las variables físicas más importantes derivadas de las observaciones del Nivel 1. Estos datos se encuentran en un solo archivo netCDF4. Las variables que se tiene en este nivel se describen a continuación en la Tab. 1:

Los atributos globales del archivo del Nivel 2 son los mismos que los de los archivos de Nivel 1. En este caso se definieron 6 dimensiones. La más importante es el tiempo ya que todas las variables dependen del tiempo. Luego está el número de alambres de capacitancia (6) y las frecuencias del espectro en frecuencias, las frecuencias y direcciones del espectro direccional y por último las profundidades del perfil

**Cuadro 1.** Descripción de las variables presentes en el Nivel 2.

Variable	Nombre	Unidades
roll	Inclinación adelante/atrás	grados
pitch	Inclinación izquierda/derecha	grados
heading	Orientación	grados
tWdir	Dirección del real viento	grados
rWdir	Dirección del relativa del viento	grados
Wspd	Rapidez del viento en el mástil	m/s
Pa	Presión atmosférica	hPa
Ta	Temperatura del aire	grados Celsius
rhum	Humedad relativa del aire	%
DP	Temperatura del punto de rocío	grados Celsius
total rain	Precipitación total	mm
rain rate	Intensidad de la precipitación	mm/h
aCO2	Concentración de CO2 en el aire	ppm
wCO2	Concentración de CO2 en el agua	ppm
ahum	Humedad absoluta del aire	mbar
rhoa	Densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>
lat	Latitud	grados norte
lon	Longitud	grados este
pH	pH del agua de mar	units
Sw	Salinidad del agua	ppm
Tw	Temperatura del agua	grados Celsius
Cw	Conductividad del agua	mS/cm
rho	Densidad in-situ del agua	kg/m <sup>3</sup>
depth	Profundidad	m
dissoxy	Oxígeno disuelto	%
S	Espectro en frecuencia del oleaje	m <sup>2</sup> /Hz
E	Espectro direccional del oleaje	m <sup>2</sup> /Hz/rad
Hm0	Altura significativa del oleaje	m
Tp	Período del pico espectral	s
pDir	Dirección del pico espectral	grados
mDir	Dirección promedio del oleaje	grados
Us0	Magnitud de la deriva de Stokes en la superficie	m/s
Ua	Componente zonal del viento	m/s
Va	Componente meridional del viento	m/s
Ts	Temperatura sónica	grados Celsius
uw	Flujo de momentum zonal	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
vw	Flujo de momentum meridional	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
wT	Flujo de calor sensible	K m/ s
ustar	Velocidad de fricción en el aire	m/s
wstar	Velocidad de fricción en el agua	m/s
U10N	Rapidez del viento a 10 m en condiciones neutrales	m/s
v1	Componente $v_1$ de la velocidad del agua	m/s
v2	Componente $v_2$ de la velocidad del agua	m/s
v3	Componente $v_3$ de la velocidad del agua	m/s
vel b1	Perfil de la velocidad en la columna - Haz 1	m/s
vel b2	Perfil de la velocidad en la columna - Haz 2	m/s
vel b3	Perfil de la velocidad en la columna - Haz 3	m/s
vel b5	Perfil de la velocidad en la columna - Haz 5	m/s
Ti	Temperatura interna del cilindro	grados Celsius
Pi	Presión interna del cilindro	mbar
Hi	Humedad interna del cilindro	%

de corrientes que mide el Signature 1000 kHz. Un ejemplo de cómo se ven los atributos de cada una de las dimensiones se muestra a continuación:

```
dimensions:
    time = 3648 ;
    nwstaff = 6 ;
    ffrq = 1801 ;
    wfrq = 97 ;
    dirs = 360 ;
    z_profile = 10 ;
variables:
    double time(time) ;
        time:units = "seconds since 1970-01-01 00:00:00" ;
        time:calendar = "gregorian" ;
    double nwstaff(nwstaff) ;
    double ffrq(ffrq) ;
    double wfrq(wfrq) ;
    double dirs(dirs) ;
    double z_profile(z_profile) ;
    ...
```

Cada una de las variables en el archivo tiene los siguientes atributos:

**\_FillValue:** Valor que se usa como bandera para designar a los datos faltantes. En este caso se usa NaN (Not a Number), que es el estándar del IEEE 754.

**standard\_name:** En este atributo va el nombre estándar de la variable. Para acercarse lo más posible a un nombre estándar se usaron las recomendaciones de la convención C.F. 1.7 y además los nombres que designan los fabricantes a las variables de cada sensor.

**long\_name:** Aquí va una descripción más detallada del nombre de la variables.

**units:** Las unidades de la variable en formato de texto compatible.

**source:** En este campo va la fuente de dónde se obtuvieron los datos para calcular las variables. Como todas las variables del Nivel provienen de las variables de Nivel 1, entonces en este atributo se puso el nombre del sensor del que se obtuvo la variable.

**valid\_range:** Este atributo contiene una lista de dos elementos con los valores mínimos y máximos posibles que podría tomar la variables para que sea considerada como válido. Los valores por fuera del éste rango son automáticamente descartados. Este campo es bastante útil como primer criterio de depuración de los datos.

**dimensions:** En este atributo van las dimensiones de las que depende las variables. Por ejemplo en el caso de la rapidez del viento, la dimensión es solo el tiempo, pero en el caso del espectro direccional del oleaje, las dimensiones son tiempo, frecuencia y dirección.

Un ejemplo de cómo se ven los atributos del flujo de calor sensible sería:

```
double wT(time) ;
wT:_FillValue = NaN ;
wT:standard_name = "upward_sensible_heat_flux" ;
wT:long_name = "upward sensible heat flux" ;
wT:units = "Km/ s" ;
wT:source = "sonic anemometer" ;
wT:valid_range = -1LL, 1LL ;
wT:dimensions = "time" ;
```

### 3. Procesamiento de los datos

En esta sección se hace una descripción del procedimiento llevado a cabo para la generación de los datos del segundo nivel de procesamiento. Se explican los métodos y algunas consideraciones.

#### Parámetros del oleaje

El cálculo del espectro direccional del oleaje permite la estimación de diferentes parámetros. En este caso se calcularon los principales. La altura significativa del oleaje se estimó como:

$$H_{m0} = 4 \left[ \iint E(f, \theta) d\theta df \right]^{1/2}, \quad (1)$$

esta es una medida directa de la energía de las olas. Igualmente, el período asociado al pico espectral y su dirección se calcularon usando una estimación robusta para evitar la dependencia de la resolución espectral:

$$T_p = \frac{\int S(f)^4 df}{\int f S(f)^4 df}, \quad \theta_p = \frac{\int \Theta(\theta)^4 d\theta}{\int \theta \Theta(\theta)^4 d\theta}, \quad (2)$$

donde  $S(f) = \int E(f, \theta) d\theta$  y  $\Theta(\theta) = \int E(f, \theta) df$  son los espectros integrados en dirección y en frecuencia, respectivamente. La dirección promedio del oleaje se calculó como:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\iint E(f, \theta) \sin \theta d\theta df}{\iint E(f, \theta) \cos \theta d\theta df} \right\}. \quad (3)$$

Otro de los parámetros más importantes del oleaje es la deriva de Stokes. En este caso se calculó la deriva de Stokes en la superficie a partir del espectro integrado en dirección como:

$$U_s(z) = \frac{16\pi^3}{g} \int f^3 S(f) e^{2kz} df. \quad (4)$$

Una recomendación es que se calcule la deriva de Stokes a partir de las componentes del espectro direcciones, es decir,

$$\mathbf{U}_s(z) = U_s \hat{\mathbf{x}} + V_s \hat{\mathbf{y}} \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_s(z) = \frac{16\pi^3}{g} \left[ \hat{\mathbf{x}} \iint f^3 E(f, \theta) \cos \theta e^{2kz} d\theta df + \hat{\mathbf{y}} \iint f^3 E(f, \theta) \sin \theta e^{2kz} d\theta df \right] \quad (6)$$

donde  $\hat{\mathbf{x}}$  y  $\hat{\mathbf{y}}$  representan los vectores unitarios en el plano cartesiano.

### Parámetros del flujo de momentum

El flujo de momentum entre el océano y la atmósfera se estima a partir de la velocidad de fricción, la cual a su vez es calculada en función de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad del viento, que se miden con el anemómetro sónico. En ese orden de ideas, lo primero que se hace es rotar el sistema de coordenadas del anemómetro en la dirección del viento promedio de un intervalo de 10 minutos (o 30 minutos). Con esto se garantiza que  $\bar{V} = \bar{W} = 0$ . El flujo de momentum en dirección del viento promedio es entonces calculado a partir del esfuerzo de Reynolds en la misma dirección, es decir,  $\tau_x = -\rho_a \overline{u'w'}$ . Análogamente, el esfuerzo del viento en la dirección perpendicular es  $\tau_y = -\rho_a \overline{v'w'}$ . Estas correlaciones se calcularon simplemente como:

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U - \bar{U})(W - \bar{W}), \quad (7)$$

y,

$$\overline{v'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V - \bar{V})(W - \bar{W}). \quad (8)$$

donde  $N$  es el número de datos. La velocidad de fricción en el aire se calculó como:

$$u_* = \left( \overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

y su análoga en el agua, considerando conservación del flujo momentum en la interfase, como:

$$w_{\star} = u_{\star} \sqrt{\rho_a / \rho_w}, \quad (10)$$

donde  $\rho_a$  representa la densidad del aire y  $\rho_w$  la del agua, las cuales fueron calculadas usando la ecuación de estado de TEOS10 implementada en python (<http://www.github.com/TEOS-10/GWS-python>)

La longitud de estabilidad de Monin-Obukhov define la distancia a la cual los efectos de la turbulencia debida al corte del flujo medio se igualan a los de la turbulencia producida por la flotabilidad. Este parámetro se calcula como:

$$L = \frac{T_s u_{\star}^3}{\kappa g w' T_s'} \quad (11)$$

Cuando  $z/L > 0$  se considera que las condiciones atmosféricas son estables <sup>1</sup>, mientras que cuando  $z/L < 0$ , las condiciones son inestables. Si  $z/L \sim 0$ , entonces se dice que las condiciones son neutrales, por lo tanto, siguiendo la ley de la pared, se puede demostrar que la rapidez del viento sigue un perfil logarítmico con la altura. Las observaciones que no corresponden a condiciones atmosféricas neutrales se corrigen usando una función de estabilidad, la cual está dada, según Högström (1988), por:

$$\Psi(z/L) = \begin{cases} (1 + 15.2z/L)^{1/4}, & z/L < 0 \\ 1 + 4.8z/L, & z/L > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Así, la rapidez del viento equivalente en condiciones neutrales es:

$$U_{zN} = U_{6.5} + \frac{u_{\star}}{\kappa} \Psi(z/L) \quad (13)$$

Es importante notar que la corrección que se hace debido a la estabilidad atmosférica, está restringida a valores pequeños de  $|z/L|$ , por lo tanto cuando se presenta una atmósfera altamente estable o altamente inestable, la corrección deja de ser válida. Finalmente, en virtud de que se espera un perfil logarítmico con la altura, la rapidez del viento se puede estandarizar a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar usando la siguiente relación:

$$U_{10N} = U_{zN} + \frac{u_{\star}}{\kappa} \log \left( \frac{10}{z} \right) \quad (14)$$

## Referencias

Högström, U. (1988). Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*, 42(1):55–78.

<sup>1</sup>donde  $z = 6.5$  es la altura donde se hace la medición de los flujos de momentum y calor y la velocidad del viento