

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

**MODELAMIENTO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA
PARA ESTUDIOS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL
DISTRITO DE ITE PARA EL PERIODO 2016**

TESIS

PRESENTADA POR:

RENZO MARTIN SAMANIEGO RIVERA

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (MAGISTER SCIENTIAE) CON MENCIÓN
EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

TACNA – PERÚ

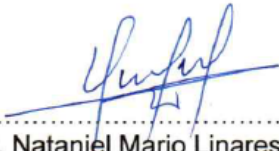
2021

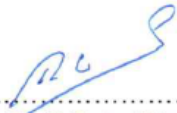
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA
ESCUELA DE POSGRADO


MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE


**MODELAMIENTO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA PARA ESTUDIOS
DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DISTRITO DE ITE PARA EL PERIODO
2016**

Tesis sustentada y aprobada el 14 de Junio del 2021; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : 
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO : 
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

MIEMBRO : 
Dr. Williams Sergio Almanza Quispe

ASESOR : 
Dr. Williams Sergio Almanza Quispe

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, gracias por su amor incondicional a pesar de la distancia, en tiempos de cuarentena, son mi motivo para seguir cumpliendo mis metas.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
RESUMEN	i
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1.1. Antecedentes del problema.....	3
1.1.2. Problemática de la investigación	4
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1. Problema general	5
1.2.2. Problema específico	5
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	5
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.5.1. Objetivos generales	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	7
1.6. HIPÓTESIS.....	7
1.6.1. Hipótesis general	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	8
2.2. BASES TEÓRICAS.....	9
2.2.1. Modelos atmosféricos	9
2.2.2. Weather Research and Forecasting (WRF).....	9
2.2.3. Componentes del WRF.....	10
2.2.4. Esquema BOULAC	13
2.2.5. Comportamiento del ciclo diurno de la capa límite atmosférica.....	13
2.2.6. Capa límite estable nocturna	15
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	16

CAPÍTULO III: MARCO FILOSÓFICO	18
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO	19
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
3.1.1. Tipo de investigación.....	19
3.1.2. Diseño de investigación.....	19
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	20
3.2.1. Población.....	20
3.2.2. Muestra.....	20
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	20
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS ...	20
3.4.1. Técnicas	21
3.4.2. Instrumentos.....	21
3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	21
3.5.1. Cálculo de la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac del modelo WRF	21
3.5.2. Validación de la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento del modelo WRF para representar correctamente la altura de la CLA. ...	26
CAPÍTULO V: RESULTADOS	32
5.1. Altura de la capa límite atmosférica.....	32
5.2. Validación del modelo	35
5.2.1. Validación de la temperatura del aire	35
5.2.2. Validación de la humedad relativa del aire	37
5.2.3. Validación de la velocidad del viento.....	38
5.3. Verificación y contratación de las hipótesis de investigación	40
5.4. Altura de la CLA y la calidad del aire	43
5.4.1. Material particulado.....	43
5.4.2. Dióxido de Azufre	44
5.4.3. Dióxido de Nitrógeno	46
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	49

CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Información de los dominios.	25
Tabla 2.	Valores horarios de la altura de la Capa Límite Atmosférica para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.	36
Tabla 3.	Análisis estadístico de la temperatura del aire a 2 m de la superficie.	39
Tabla 4.	Análisis estadístico de la humedad relativa a 2 m de la superficie.	40
Tabla 5	Análisis estadístico de la velocidad del viento a 10 m de la superficie.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Rutinas del WPS, pre-procesamiento.	12
Figura 2.	Grilla tipo Arakawa C.	13
Figura 3.	Evolución de la capa límite sobre la superficie terrestre.	15
Figura 4.	Flujos de datos en un solo sentido de ejecución anidada, utilizando el programa ndown.	25
Figura 5.	Altura de la Capa Límite Atmosférica con el esquema BouLac del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016.	35
Figura 6.	Promedio diario de la Altura de la CLA para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.	37
Figura 7.	Variación temporal horaria de la temperatura del aire a 2 metros en (°C) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.	38
Figura 8.	Variación temporal horaria de la humedad relativa del aire a 2 metros en (%) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.	39
Figura 9.	Variación temporal horaria de la velocidad del viento a 10 metros en (m/s) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.	40
Figura 10.	Evolución de la altura de la CLA y material particulado PM _{2,5} .	45
Figura 11.	Evolución de la altura de la CLA y material particulado PM _{2,5}	46
Figura 12.	Evolución de la altura de la CLA y el dióxido de azufre.	47
Figura 13.	Evolución de la altura de la CLA y concentración de SO ₂ .	48
Figura 14.	Evolución de la altura de la CLA y el dióxido de nitrógeno.	49
Figura 15.	Evolución de la altura de la CLA y concentración de NO ₂ .	49

RESUMEN

El actual trabajo de investigación tiene como objeto analizar la relación que hay entre la altura de la capa límite atmosférica y la calidad del aire en el distrito de Ite. La investigación pretende determinar la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac. La metodología de la investigación es de tipo descriptivo y de diseño transversal. La población y muestra fueron los valores de temperatura, velocidad y dirección del viento y humedad relativa para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en el distrito de Ite. La validación se realizó con respecto a datos meteorológicos de la estación in situ. Para la variable de temperatura del aire el modelo representa una buena correlación con lo observado, adicionalmente tiene un buen ajuste y representa correctamente la magnitud de la variable temperatura del aire; por otro lado, el modelo subestima los valores simulados de temperatura del aire con respecto a los datos registrados en la estación. Referente a la variable de humedad relativa del aire el modelo representa una buena correlación con lo observado a pesar de sobreestimar los valores, así mismo tiene un buen ajuste. La variable velocidad del viento, no representa una correlación con lo observado, así mismo no presenta un buen ajuste, el modelo sobreestima la variable y no representa correctamente la magnitud debido al incumplimiento de la primera y segunda condición establecida por Pielke (2002). La relación que existe entre la altura de la capa límite atmosférica y la calidad del aire, dependió de la variable en estudio. Para el caso del material particulado menores a 2.5 micras (PM_{2,5}), existe una relación inversa con la Altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA), debido a que menor altura de la capa límite atmosférica se registraba una mayor concentración de material particulado PM_{2,5}. Para el caso del dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) no se puede concluir que existe un tipo de relación con respecto a CLA, debido a la aleatoriedad de ambas variables. Se concluye que la configuración del modelo puede representar correctamente la relación inversa entre la altura de la capa límite atmosférica y el material particulado (PM_{2,5}).

Palabras clave: capa límite atmosférica, esquema BouLac, material particulado, calidad del aire.

ABSTRACT

The present research work aims to analyze the relationship between the height of the atmospheric boundary layer and the air quality in the district of Ite. The research aims to determine the height of the atmospheric boundary layer using the BouLac scheme. The research methodology is descriptive and cross-sectional in design. The population and sample were the values of temperature, relative humidity, speed and direction of the wind for the days 13 to 18 September 2016 in the district of Ite. The validation was performed against meteorological data from the on-site station. For the air temperature variable, the model represents a good correlation with the observed, additionally it has a good fit and correctly represents the magnitude of the air temperature variable, however the model underestimates the simulated values. Regarding the relative humidity variable of the air, the model represents a good correlation with what was observed despite overestimating the values, it also has a good fit. The wind speed variable does not represent a correlation with what is observed, likewise it does not present a good fit, the model overestimates the variable and does not correctly represent the magnitude due to non-compliance with the first and second conditions established by Pielke (2002). The relationship between the height of the atmospheric boundary layer and air quality depended on the variable under study. In the case of particulate matter than 2,5 microns ($PM_{2,5}$), there is an inverse relationship with the height of the Atmospheric Boundary Layer (CLA), due to the lower height of the atmospheric boundary layer, a higher concentration of $PM_{2,5}$ particulate matter was recorded. In the case of sulfur dioxide (SO_2) and nitrogen dioxide (NO_2) it cannot be concluded that there is a type of relationship with respect to the height of the atmospheric boundary layer, due to the randomness of both variables. This research concludes that the configuration of the model can correctly represent the inverse relationship between the height of the atmospheric boundary layer and the particulate material ($PM_{2,5}$).

Keywords: atmospheric boundary layer, BouLac scheme, particulate matter, air quality

INTRODUCCIÓN

La capa límite atmosférica refiere al estrato de la atmósfera más cercano a la superficie de la tierra. En el cual la interacción se representa por la transferencia de momento, calor y humedad en escalas de tiempo de una hora o menos. Stull (1989). Este factor que incluye el aire que respiramos da lugar a campos de investigación que permitan estudiar el comportamiento del estrato, a través por el cual los contaminantes son liberados desde la superficie. Al estudiar la contaminación atmosférica, la altura de la capa límite atmosférica es un parámetro importante, al cual es difícil el acceso de información, ya que los organismos responsables del componente ambiental no lo consideran como una práctica meteorológica habitual.

Estudiar la capa límite atmosférica ayuda a entender los procesos que ocurren a escala local y sus interrelaciones con otras variables como la evaporación de agua de los océanos, la dispersión de los contaminantes, el cambio en el uso de suelo. Sales (2016).

Para caracterizar adecuadamente la capa límite atmosférica se debe considerar los procesos físicos que ocurren a escalas espaciales y temporales. En los actuales modelos meteorológicos, los usuarios atienden los casos particulares de aplicación considerando la parametrización de los procesos físicos. La capacidad de reproducción de un escenario meteorológico dependerá de los procesos físicos y las parametrizaciones usadas en las simulaciones numéricas.

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF), incluye distintas parametrizaciones de la capa límite atmosférica y se utilizan diversas aplicaciones desde escalas de decenas de metros a miles de kilómetros. Actualmente, el mencionado modelo brinda predicciones meteorológicas, las cuales se actualizan de acuerdo a los últimos estudios científicos de la sociedad

científica internacional en materia de la física, métodos numéricos y asimilación de datos.

Por tanto, el propósito de este estudio es determinar la relación que existe entre la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA) y la calidad del aire en el distrito de Ite utilizando el modelo WRF, así como también, calcular la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y validar variables meteorológicas del modelo WRF para representar correctamente la altura de la CLA.

El trabajo de investigación se ha estructurado en capítulos para tener una mejor comprensión y manejo del mismo:

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema.

En el Capítulo II trata del marco teórico.

En el Capítulo III enfoca la metodología de la investigación

En el Capítulo IV está dedicado al marco filosófico.

En el Capítulo V muestra los aspectos identificados al resultado.

En el Capítulo VI se concluye con la discusión de los resultados

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

El Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015), indica que al comparar las mediciones de los contaminantes con los ECA establecidos se puede precisar la situación de la calidad del aire, esto permite identificar zonas más contaminadas y de mayor riesgo para la salud, para posteriormente proponer posibles soluciones para disminuir los riesgos. En el informe Nacional de Calidad del Aire 2013 – 2014, hace mención que la evaluación de la calidad del aire comenzó en el proyecto de la Red Panamericana de la Calidad del Aire, dirigido por la Organización Panamericana de la Salud OPS entre los años 1967 – 1980, contando Lima con distintas estaciones de Monitoreo de material particulado o polvo atmosférico. En 1999, año que se establecieron 5 estaciones de monitoreo por todo Lima y Callao.

En el 2001, el Ministerio de Salud (MINSAL, 2011), estableció las iniciales 13 Zonas de Atención Prioritaria (ZAP) delegando a la DIGESA, con la finalidad de realizar una línea base establecido en el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del aire, según el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM. De lo resultante, se contempló que, en dichas ciudades, en algunos días, se excedían los ECA de material particulado menor a 10 micras (PM10) y menor a 2,5 micras (PM2,5). Con respecto a los contaminantes gaseosos, solamente se encontró niveles elevados de dióxido de azufre en la ciudad de la Oroya, mientras que las demás ciudades se encontraron por debajo de los ECA, tanto para dióxido de azufre como dióxido de nitrógeno. A consecuencia se aplican de forma progresiva la Red de Vigilancia de Calidad del Aire a nivel nacional a cargo de las Direcciones Ejecutivas de Salud Ambiental y luego recae en la Municipalidad Provincial.

1.1.2. Problemática de la investigación

Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015), al pasar de los años la data de calidad del aire fue incrementándose, sin embargo, la falta de presupuesto para cubrir los gastos de mantenimiento y pago al personal técnico se ha visto afectado, así como también un estudio adecuado de la calidad del aire. Otra limitación está referido a la incorporación de las 18 nuevas ZAP en adición de las 13 ya establecidas, puesto que se realizaron monitoreos puntuales lo cual limita a no tener data inter estacional y los días de la semana, por lo que dicha información debe ser considerada como data referencial.

Durante los 90's (Seibert et al. 2000), se ha venido exigiendo la determinación de protocolos, con el objeto de estandarizar las definiciones y procedimientos para calcular los parámetros de la calidad del aire, entre los cuales se considera la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA). Recientes investigaciones apuntan a ofrecer una alternativa que resuelva la carencia de mediciones rutinarias de los parámetros que depende en gran medida, la dispersión del material contaminante que respiramos mediante esquemas de parametrización que incluyan modelos meteorológicos.

Por otro lado, el Gobierno Regional de Tacna (GORE, 2014), en su proyecto de “Mejoramiento del Servicio de Monitoreo e Información Ambiental” comenta sobre la situación de la cuenca atmosférica de Tacna, que actualmente viene registrando un continuo deterioro de la calidad del aire. Adicionalmente a esto, no se cuentan con estaciones de calidad del aire para poder monitorear, vigilar y controlar la contaminación atmosférica de forma continua. Es por esta razón que surgen preguntas sobre la utilización de los modelos meteorológicos que puedan representar correctamente los parámetros meteorológicos y estos a su vez puedan representar correctamente la altura de la CLA con la finalidad de encontrar herramientas que puedan suplir la necesidad de monitorear continuamente la calidad del aire en la ciudad de Ite.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

Debido a la falta de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire en la ciudad de Ite. ¿La simulación de la altura de la Capa Límite Atmosférica utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), mostrará una relación con la calidad del aire en el distrito de Ite para los días 13 – 18 de setiembre del 2016?

1.2.2. Problema específico

¿Utilizando correctamente los esquemas de parametrización y su validación de los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento) del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) representará correctamente la Capa Límite Atmosférica?

1.3. Justificación e importancia

Stull, R. (1988), en el plano de la meteorología, existen muchos factores que contribuyen directamente en la calidad del aire, una de ella es la altura de la CLA, la cual es variable, su rango se encuentra en el intervalo de decenas de metros, en escalas de tiempo de una hora o menos. Dentro de la capa límite atmosférica se presentan más capas de acuerdo a la hora durante el día; la capa límite estable es la más importante en horas de la noche por ser una capa más próxima a la superficie (Stull, R.B. 1988). La parametrización de la altura de la capa límite estable merita atención especial por la gran importancia en investigaciones de calidad de aire, en la dispersión de contaminantes, en las predicciones meteorológicas (Jiménez y Cuxart, 2005). La capa límite estable, presenta una altura típica de 50 a 200 m, esto dependerá de la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica (Beljaars, 1992), ocasionalmente puede presentar alturas máximas de unos 500 m y su comportamiento dependerá del

origen de su formación, ya sea sobre tierra o sobre el mar. Debido a que su cima no se observa con nitidez, ya que se mezcla con la capa residual, el cálculo de la misma es tarea difícil en algunas ocasiones.

Al conocer la altura de la CLA, ayudará a saber el volumen de aire que está dentro de ella y ver en qué proporción los contaminantes pueden diluirse en la atmósfera confinada dentro de ella (Gassman, 1998). Si la altura de la CLA es menor de lo normal, el volumen dentro de la capa será menor y por ende la concentración de los contaminantes se incrementará. Caso contrario, si la capa tiene un espesor mayor, el volumen de aire será mayor y por ende las concentraciones de los contaminantes serán menores (Gassman, 1998).

Por ese motivo, el presente estudio servirá como plataforma base para futuros proyectos que planteen soluciones sobre la contaminación atmosférica, aplicaciones en modelos de dispersión de contaminantes (escala local) y sobre todo para que las autoridades competentes puedan considerar como una herramienta la capa límite atmosférica para poder tomar decisiones a corto plazo sobre los posibles impactos que podrían generar producto de las emisiones de gases y/o material particulado.

1.4. Alcances y limitaciones

Al respecto, la investigación está enfocada a evaluar el comportamiento de la capa límite atmosférico y cómo influye en la calidad del aire en el distrito de Ite en el año 2016 y su posible impacto en las personas.

Una de las limitaciones en el trabajo de estudio, fue la poca colaboración del Sistema de Información Ambiental Regional SIAR del Gobierno Regional de Tacna en la obtención de información con respecto al monitoreo de calidad del aire realizada en el distrito de Ite. No se obtuvo respuesta sobre los resultados del monitoreo de material particulado menor a 10 micras, ya que los datos son duplicados con respecto al monitoreo de material particulado menor a 2,5 micras.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivos generales

Analizar la relación que existe entre la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA) y la calidad del aire en el distrito de Ite para los días 13 – 18 de setiembre del 2016, modelado con el Weather Research and Forecasting.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Calcular la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac del modelo Weather Research and Forecasting.
2. Validar la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento del modelo WRF para representar correctamente la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA).

a. Hipótesis

i. Hipótesis general

- La altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA) tiene relación directa con la calidad del aire en el distrito de Ite para los días 13 – 18 de setiembre del 2016.

ii. Hipótesis específicas

- El esquema BouLac del modelo WRF representa correctamente la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA).
- Estadísticamente, el modelo WRF es aceptable cuando simula los parámetros atmosféricos (temperatura, viento y humedad) para presentar la altura de la capa límite atmosférica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Según Fisher et al. (1998), uno de los primeros estudios asociados al contexto del estudio del balance de energía en superficie, altura de la capa límite, fenómenos asociados, perfiles verticales de variables se llevó a cabo en la Cooperación Europea en el Campo Científico y de la Investigación Tecnológica (COST Action 710: European Co-operation in the Field of Scientific and Technological Research).

Según Seibert et al. (1998), referente a la capa de mezcla, existen dos formas para la determinación del espesor de esta capa (la experimental y la teórica), así como diversos procedimientos que deberían ser discutidos por lo que era necesario establecer una guía de recomendación, tanto para los procedimientos experimentales y teóricos. Una de las conclusiones dentro del perfil COST 710, sobre la capa límite es la importancia de realizar campañas experimentales para lograr de esta forma la caracterización experimental en distintas regiones.

En el campo de la experimentación se basa en el análisis de los resultados de las campañas de medida, básicamente en los vuelos de sondeo atmosférico, lo que ha permitido aumentar un mayor conocimiento de este parámetro. Por otra parte, está la teórica, que surge de la necesidad de encontrar mediante fórmulas matemáticas, reproducir lo que experimentalmente se desarrolla en la naturaleza.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Modelos atmosféricos

Jacobson (2005), señala que un modelo atmosférico computacional, es una representación codificada de la dinámica, física, química de los procesos radiactivos de la atmósfera.

El funcionamiento de un modelo numérico, está dado por procesos que dependen tanto del tiempo como del espacio, a su vez son representados a través de ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones son sustituidas por medio de diferencias finitas u otras aproximaciones, que luego se codifican a un lenguaje de ordenador y son resueltas. (Jacobson, 2005)

2.2.2. Weather Research and Forecasting (WRF)

En esta investigación se utilizará el modelo “Weather Research and Forecasting”, que es considerado como la siguiente generación de sistemas de predicción numérica de tiempo a meso escala. El modelo es útil para estudiar la atmósfera y como una herramienta para realizar pronósticos. El desarrollo de Weather Research Forecasting ha sido un objetivo de diversas agencias para lograr obtener un sistema modelo de pronóstico y la asimilación de datos de meso escala. Entre ellos tenemos la colaboración del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de meso escala (NCAR) y División de Meteorología de Microescala (MMM), Administración Nacional del Océano y Atmósfera (NOAA), Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), el Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL), etc.

Según Schimitz, et al. (2008), el modelo es inicializado por datos forzantes, uno de ellos son los datos meteorológicos de modelos globales de pronóstico (Global Forecast Models, GFM), de baja resolución espacial de 1° y una resolución temporal de 6 horas y otro, es el uso de suelo y categorías de suelo como datos estáticos.

Así mismo, el modelo utiliza un sistema de coordenadas verticales de presión hidrostática que siguen el terreno de notadas por η (eta).

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \quad \text{Donde, } \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad [1]$$

p_h es la componente hidrostática de la presión, p_{hs} y p_{ht} son valores de presión a lo largo de la superficie y en el límite superior, respectivamente.

Según National Center for Atmospheric Research (NCAR, 2009), el modelo posee una serie de parametrizaciones físicas que presentan procesos como lo son, radiación solar, interacciones suelo-atmósfera, precipitación.

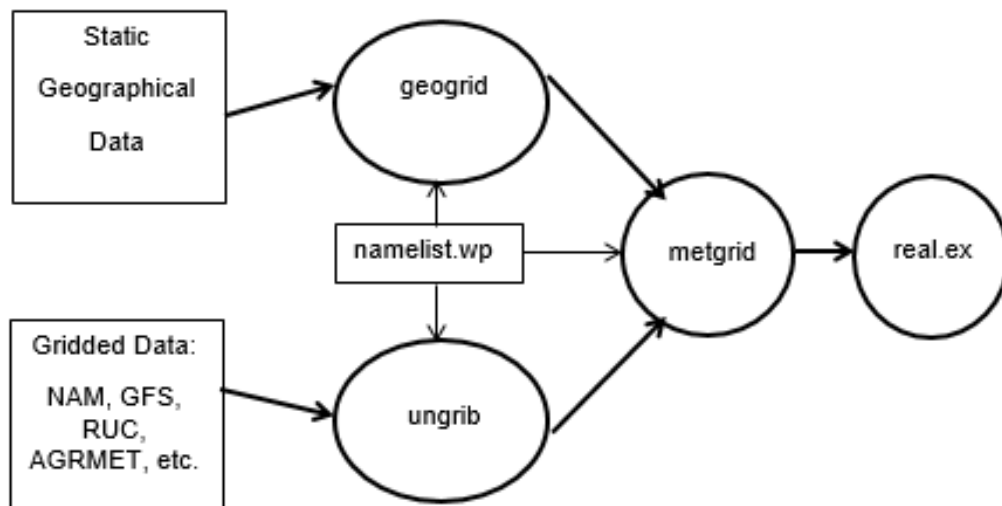
2.2.3. Componentes del WRF

a) WRF Pre-Processing System (WPS)

Según (NCAR, 2019), el WPS consta de tres programas independientes: geogrid, ungrib y metgrid. Geogrid, define los dominios de simulación; los cuales son definidos utilizando la información indicada por el usuario, e interpola diversos conjuntos de datos terrestres a las redes del modelo. En los dominios se registrará en los namelist (namelist.wps) que están ubicados dentro de los archivos del WPS. Ungrib, lee archivos GRIB y describe los datos en un formato simple denominado formato intermedio. Los archivos GRIB tienen campos meteorológicos variables en el tiempo que pueden ser de otro modelo regional o global, como el NAM NCEP o modelos GFS. Ungrib puede leer GRIB1 y, si se compila con la opción "GRIB2", para obtener archivos GRIB2. Por último, el propósito de metgrid, es interpolar horizontalmente los datos meteorológicos de formatos intermedios que se extrae por el programa ungrib en los dominios de simulación definidos por el programa de geogrid. La salida metgrid interpolado podría ser procesado por el programa real del WRF. (Ver Figura 1)

Figura 1

Rutinas del WPS, pre-procesamiento.



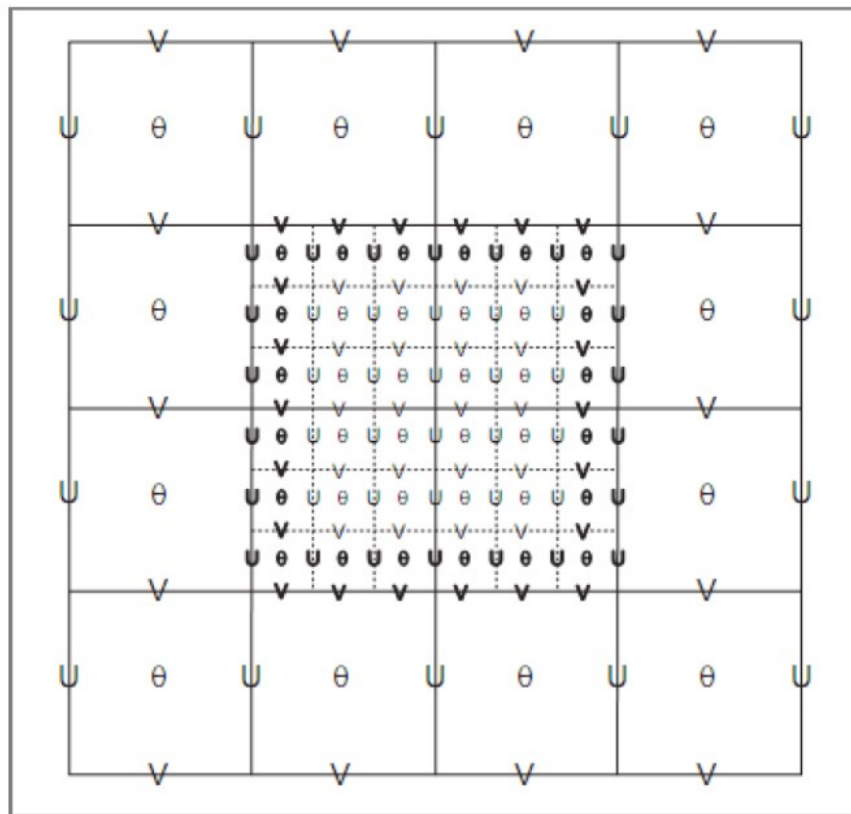
Fuente: ARW, Version 3 Modeling System User's Guide. (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>)

b) Real Data ARW System

Según (NCAR, 2019), es un modelo comprensible y no hidrostático. Utiliza una grilla tipo Arakawa C (Figura 2), esquemas de integración Runge-Kutta de 2° y 3° orden y esquemas de advección de 2° y 6° orden tanto en la horizontal como en la vertical. Utiliza un pequeño intervalo de tiempo de división para los modos acústicos y ondas acústicas. La dinámica conserva las variables escalares.

Figura 2

Grilla tipo Arakawa C.



Fuente Samarock et al. (2008)

Según (NCAR, 2019) el código del modelo WRF, contiene programas de inicialización (ya sea para datos reales – wrf.exe – o datos idealizados -ideal.exe – y un programa para realizar corridas en anidamiento de un solo sentido – ndown.exe

c) **Post procesamiento**

Según (NCAR, 2019), las salidas del modelo están en el formato netCDF, por lo que se puede visualizar con cualquier herramienta capaz de leer este tipo de formato. El modelo cuenta con herramientas de post procesamiento, tal es el

caso del NCL (NCAR Command Language), RIP4 (Read/Interpolate/Plot), ARWpost (que convierte en archivos “.dat” y “.ctl” para poder visualizarlos en GrADS), WPP (WRF Post Processor) y VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere and Solar Research).

Cabe resaltar, que en esta investigación se utilizará la herramienta del ARWpost, para poder visualizar las salidas del modelo en un formato que pueda leerlo el software GrADS.

2.2.4. Esquema BOULAC

Esquema de la Capa Límite Atmosférica (CLA), propuesto por Bougeault & Lacarrère (1989), con opción para energía cinética turbulenta (ECT). Este esquema parametriza las turbulencias inducidas por la topografía para representar los casos de no homogeneidad horizontal. Según el autor la ECT en un modelo de escala meso-beta permite buenas previsiones de la ubicación e intensidad de la turbulencia de aire claro en regiones donde el flujo pasa sobre una orografía empinada. Este éxito se debe a dos aspectos: i) la buena dinámica del modelo con resolución vertical suficiente para resolver la propagación de las ondas internas y resolución horizontal para resolver las características topográficas; ii) la mayor parte de los flujos en la atmósfera, la escala de longitud de los torbellinos se determina principalmente por la resistencia del desplazamiento vertical debido a la estabilidad estática.

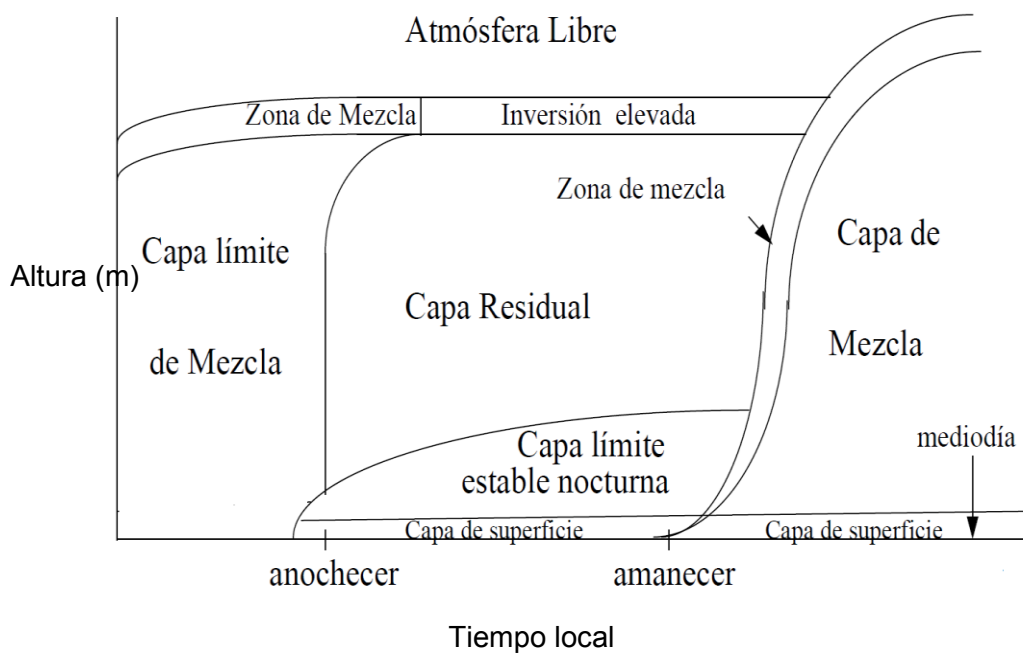
2.2.5. Comportamiento del ciclo diurno de la capa límite atmosférica

Según Gassmann, M. (1998), la altura de la capa límite diurna (ACL_D) varía de acuerdo al paso de las horas, este comportamiento es creciente hasta tener un valor máximo después del mediodía, justamente en el momento en que la superficie terrestre alcanza su máximo calentamiento debido a la radiación solar. Posterior a ellos, debido a la disminución de la radiación, la disminución de la turbulencia hace que la ACL_D comience a disminuir. En el tope de la capa

puede hallarse una inversión térmica, justamente en la zona de mezcla entre el aire de la capa límite y de la libre atmósfera. A medida que va anocheciendo, la disminución progresiva de la temperatura debido al enfriamiento de la superficie de la tierra, se va formando una nueva inversión de temperatura superficial, que por lo general es una capa estable, cuyo tope superior configura la altura de la capa límite nocturna. En la parte alta de la capa, generalmente quedan turbulencias mínimas de la capa diurna, siendo esta capa “capa residual” (Figura 3).

Figura 3

Evolución de la capa límite sobre la superficie terrestre.



Fuente: Adaptado de Stull R.B. (1988).

Por otro lado, la dispersión de los contaminantes variará con el ciclo diario, esto dependerá del comportamiento de las capas diurnas y nocturnas. Indicó Stull R.B. (1991), que generalmente los comportamientos de la pluma de la emisión de gases se asocian con la estabilidad atmosférica.

2.2.6. Capa límite estable nocturna

a) Estructura de la capa límite nocturna

Gassmann, M. (1998), al transcurrir de las horas durante el día, llegada la noche, la superficie empieza a enfriarse debido a la ausencia de la fuente energética proveniente del sol, el cual se forma una capa límite estratificada muy estable, debido a la poca turbulencia. El aire enfriado se traslada verticalmente a capas más elevadas, así mismo existen procesos de enfriamiento de la atmósfera, el cual es producido por la emisión de radiación en onda larga.

La subsidencia, la radiación en onda larga, la advección horizontal y la turbulencia son procesos físicos que influyen la evolución nocturna de la capa límite.

Dada la ecuación de energía cinética turbulenta (Businger, 1982).

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = -\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{g}{\theta_v} \overline{w'\theta'_v} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'e'} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'p'} - \varepsilon$$

Donde:

$e = 0.5 (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$: la energía cinética turbulenta por unidad de masa

u' , v' y w' : Componentes de las perturbaciones de la velocidad,

t : Tiempo,

g : Aceleración de la gravedad,

θ_v : Temperatura potencial virtual

U : Velocidad del flujo medio,

θ'_v : Perturbación de la temperatura potencial virtual del aire,

Z : Altura,

p' : Perturbación de la presión atmosférica,

ρ : Densidad del aire

ε : Disipación de energía cinética turbulenta

Por la noche, el movimiento vertical turbulento es el único que genera turbulencia, estos son originados por el viento cortante o por las perturbaciones debido al flujo por presencia de obstáculos. En caso que sea muy estable, el movimiento vertical se limita a la mezcla generada por pequeñas turbulencias, el cual se consumen la energía cinética disponible para los desplazamientos de manera vertical. (Pearson et al. 1983).

Los sistemas de alta presión, por lo general están asociados a cielos despejados, debido a la subsidencia y divergencia horizontal. Esto afecta al balance de energía dentro de la capa límite nocturna, debido al ingreso de masa de aire caliente por la capa residual superior.

Carlson y Stull, 1986. Evaluaron los efectos de la subsidencia, de forma teórica, teniendo como resultado una disminución en el crecimiento de la altura de la capa límite nocturna entre el 5 y 50 %.

2.3. Definición de términos

Parametrizaciones

Castro et al. (1991), los fenómenos atmosféricos son procesos complejos que al momento de modelarlos a una escala más pequeña son simplificados sus procesos. Es por esta razón que las parametrizaciones son aproximaciones a lo real de los fenómenos físicos.

Capa límite atmosférica

Castro et al. (1991), es una capa o estrato de aire donde interactúan la atmósfera y el suelo, y es afectada por el flujo turbulento, humedad relativa, temperatura del aire.

Calidad del aire

Según (MINAM, 2015), los valores indicados mediante los Estándares de Calidad Ambiental del Aire (ECA Aire), consideran valores máximos permitidos

de los contaminantes atmosféricos químicos y físicos de manera que estos niveles no afecten a la salud y al ambiente. La calidad del aire está relacionada con el cumplimiento de dichos estándares.

Material particulado

MINAM (2015), es una combinación de microscópicas partículas de sólidos y gotas líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, el material particulado se clasifica de acuerdo al tamaño de las partículas que lo constituyen pueden ser menores a 10 micras, 2,5 micras y 1 micra.

Temperatura del aire

Según la World Meteorological Organization (WMO, 2008), es la temperatura del aire libre medida de 1,25 a 2 m. por encima del suelo).

Humedad relativa

Según la (WMO, 2008), es la relación porcentual de la presión de vapor actual, con la presión de vapor de saturación, en similares condiciones de presión y temperatura.

Velocidad y dirección del viento

Según la (WMO, 2008), representada por un vector tridimensional que pudiese fluctuar de forma aleatoria en tiempo y espacio. El viento en superficie es considerado bidimensional que representa la dirección y la velocidad.

CAPÍTULO III

MARCO FILOSÓFICO

Desde años atrás se va venido forjando una nueva idea cultural y filosófica en gran parte del planeta acerca del cuidado y mitigación de los impactos que produce el hombre en la tierra. Matveichuk, A (2004). En 1859, en Penslvania, se inicia la explotación de pozos petroleros, el cual da origen al impulso de la industria automovilística, por ser el combustible una nueva fuente de energía. En 1899, en Londres, se crea la National Society for Clear Air and Enviromental Protection (NSCA), debido al alto deterioro de la calidad del aire para esta época. A pesar de los esfuerzos para mitigar esta contaminación, en 1930, en Bélgica, ocurrió un evento meteorológico en el cual se concentró una capa de polución que duró 3 días.

Weston (1999), en los años 1970 surgen movimientos sociales que impulsaba la filosofía medioambiental, se intentaba conectar la alineación de la naturaleza con el sentido de la humanidad de una forma continua durante el paso de la historia. En México, en el año 1975, se crea una red manual para partículas suspendidas totales, al igual que Brasil en 1976 con una red de vigilancia y monitoreo de la calidad del aire. Actualmente, gran parte de los países cuentan con una red de vigilancia de monitoreo ambiental de la calidad del aire, para el caso de Perú, la red de monitoreo lo maneja el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), y los Gobiernos Regionales con el apoyo de los Sistemas de Información Ambiental Regional.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

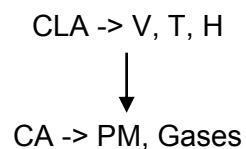
3.1. Tipo y Diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

Según Hernández et. al. (2014) esta investigación es netamente descriptiva, ya que define y describe un evento con sus variables para someterse a un análisis; así mismo compara resultados con estudios previos.

3.1.2. Diseño de investigación

Según Hernández et. al. (2014), una de las características de un diseño transversal o transeccional es la colección de datos en un único momento. Su objetivo es describir variables y analizar su incidencia e interrelación:



Donde:

CLA: Capa límite atmosférica

V: Viento

T: Temperatura

H: Humedad

CA: Calidad del aire

PM: Material particulado

Gases: NO₂ y SO₂.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población está conformada por los valores de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en el distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna.

3.2.2. Muestra

La muestra está conformada por los valores de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la planta de agua (Pampa Alta) en el distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna.

3.3. Operacionalización de variables

Variable 1 (X): Altura de la capa límite atmosférica

Dimensiones:

- Altura de la capa límite estable
- Altura de la capa residual
- Altura de la capa convectiva

Variable 2 (Y): Calidad del aire

Dimensiones:

- Gases atmosféricos
- Material particulado

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

La información que se recolectará ayudará a probar las hipótesis y responderá a las preguntas presentadas en la presente investigación, logrando así a la vez, responder a los objetivos generados a partir del problema de la investigación.

3.4.1. Técnicas

Las principales técnicas que se utilizaron en la investigación son:

- Análisis de documentos, bibliografía e informes.
- Recopilación de informe de monitoreo.

3.4.2. Instrumentos

Los principales instrumentos que se emplearon en el estudio fueron:

- Envío de correos electrónicos al Gobierno Regional para la recopilación de datos de calidad del aire y datos de la estación meteorológica.
- Una Computadora DELL Corel i 7, 8 núcleos.
- El software libre del modelo atmosférico Weather Research Forecasting.
- Microsoft Office (Excel, word).

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Cálculo de la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac del modelo WRF

Según (NCAR, 2009), el modelo de meso escala WRF, es compatible con las salidas de varios modelos globales, como: Global Forecasting System (GFS), NCEP/NCAR Reanalysis Project (NNRP), North American Model (NAM), Global data Assimilation System (GDAS), North American Regional Reanalysis (NARR), etc. Cada modelo global tiene sus propias particularidades, principalmente en la resolución espacial y temporal. Estos a su vez, se encuentran en formato GRIB, que es utilizado como datos forzantes para dar inicio a la corrida del modelo. El modelo, cuenta con un VTable que permite reconocer la información contenida de cada modelo global.

Para este caso, se utilizó datos provenientes del NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses (FNL), esta información es generada a partir del análisis del modelo Global Forecasting System (GFS). Los FNL, tienen

una resolución espacial de 1° y una resolución temporal de seis horas, estos comparados con los datos de Reanalysis del NCEP/NCAR, se distinguen por la resolución espacial, presentando este último 2,5°, la cual afecta significativamente en la calidad de la simulación (Kistler et al., 2001).

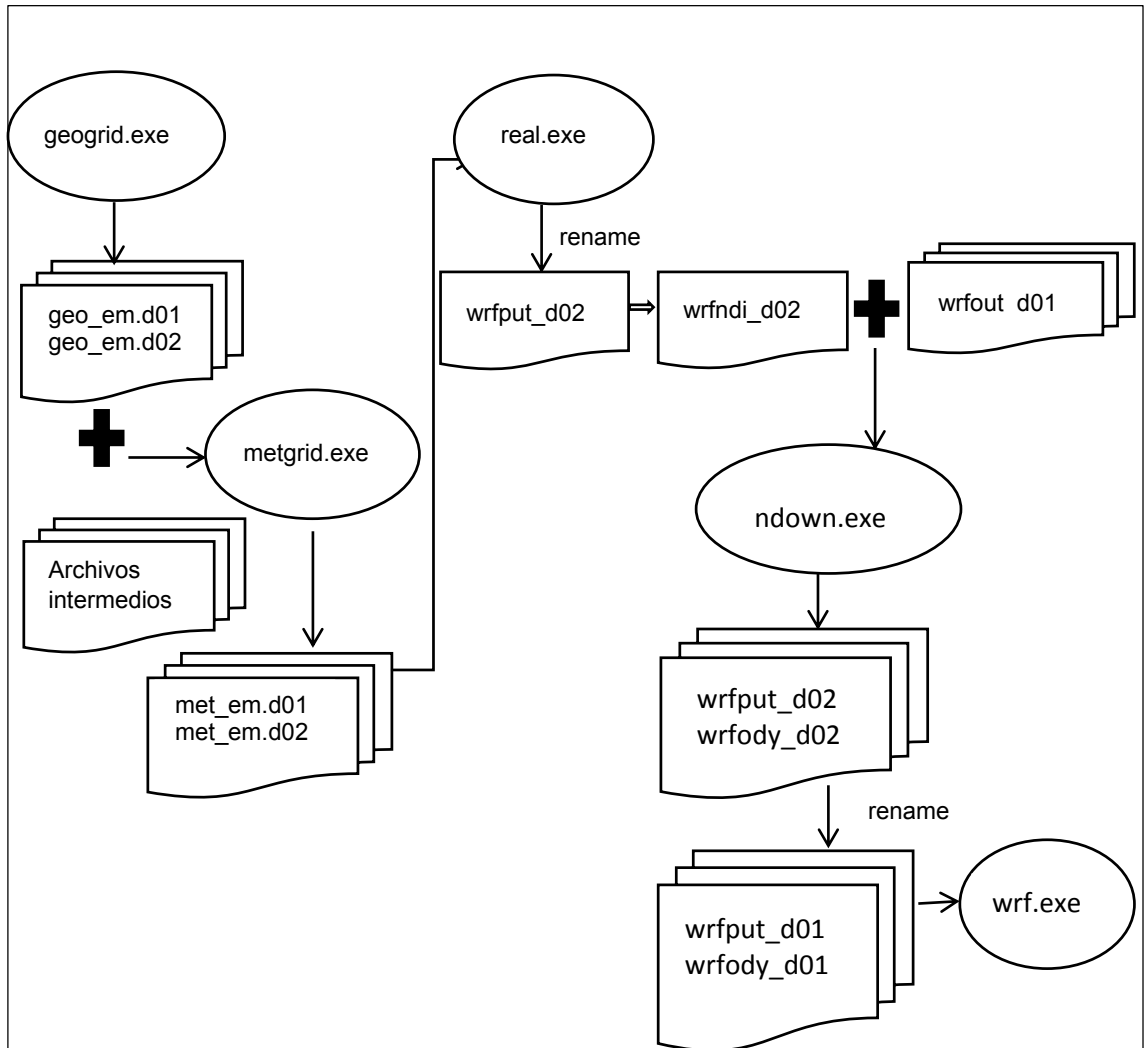
Los datos de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, máscara de agua, es decir, la mayoría de las variables de la superficie del dominio ya vienen incorporadas en el paquete de instalación. Debido a que varían muy lentamente en el tiempo son considerados datos fijos, por lo que no es necesaria su descarga cada vez que se realice una nueva simulación.

a. Creación de dominios (geogrid.exe)

Las simulaciones se realizaron para tres dominios donde los datos de entrada presentan una resolución espacial de 1° equivalente aproximadamente a 110 km, estos fueron procesados mediante una simulación simple para el primer dominio (coarse domain), reduciéndolo a una resolución horizontal de 27 km. Posteriormente, las simulaciones se realizaron utilizando el método ONE – WAY NESTING para el segundo y tercer dominio de 9km y 3km de resolución horizontal respectivamente. En la Figura 4, se puede observar el flujo de datos utilizando el método ONE – WAY NESTING.

Figura 4

Flujos de datos en un solo sentido de ejecución anidada, utilizando el programa ndown.



Fuente: ARW, Version 3 Modeling System User's Guide

En el pre procesamiento WPS, se configuró los dominios y el periodo de simulación requerido, el cual utilizó el programa del modelo llamado `geogrid.exe`, que interpola el conjunto de datos terrestres ordenados dentro del `namelist.wps`. Una vez ejecutado el programa, se generarán tres archivos en formato netCDF: `geo_em.d01.nc`, `geo_em.d02.nc` y `geo_em.d03.nc` que corresponden a cada dominio anidado. En Tabla 1 se detallan las propiedades de dichos dominios.

Tabla 1*Información de los dominios*

Dominio	Resolución horizontal	Extensión (xx,yy,zz)	Niveles verticales
D01	27 km.	1971 x 1971 km.	35
D02	9 km.	657 x 657 km.	35
D03	3 km.	219 x 219 km.	35

- b. Ingreso y transformación de la información de entrada (ungrib.exe y metgrid.exe)

La data de entrada se encuentra en formato GRIB, dicho formato es utilizado en meteorología para el almacenamiento de información histórica y pronósticos del tiempo. Por esta razón, es necesario utilizar el VTable (Tabla de variables) que permita leer la información contenida dentro del archivo GRIB, que este caso vendría hacer las salidas del modelo global FNL. El modelo WRF, cuenta con un juego de VTables para las salidas de diferentes modelos, para el caso de estudio se utilizó el VTable.GFS.

En primer lugar, antes de ejecutar el ungrib.exe, es necesario modificar el namelist.wps, los campos correspondientes a los intervalos de simulación (tiempo inicial y final), centrar los dominios, direccionar los datos terrestres. Una vez hecho estos cambios se ejecuta el ungrib.exe. De esta manera se cambiará al formato nativo de los datos de entrada (GRIB) a un formato intermedio entendido por las rutinas del Pre procesador del WRF. Seguidamente se ejecutará el metgrid.exe que interpolará la información meteorológica, contenida en el GRIB, a la grilla del modelo. Las salidas de este proceso generan archivos met_em.d01*, met_em.d02*, met_em.d03* que fueron usados como datos de entrada para la consecuente etapa llamada pre procesamiento WRFV3.

- c. Creación de las condiciones iniciales y de frontera laterales

Los archivos generados en el paso anterior son linkeados en una carpeta que se creó para la simulación donde se encuentran el namelist.input y las rutinas del real.exe y el wrf.exe. Cabe mencionar que el real.exe es el encargado de generar las condiciones iniciales de cada dominio (wrfinput_d01.nc) y las condiciones de frontera laterales del dominio madre (wrfbdy_d01.nc).

d. Ejecución del modelo

En este proceso se ejecutó el wrf.exe, en este caso se corrió la simulación mediante un script que se detalla a continuación:

```
#!/bin/bash
#SBATCH --time=48:00:00
#SBATCH --job-name=simu0
#SBATCH --output=slurm201609.out
#SBATCH --error=slurm201609.err
#SBATCH --partition=mpi_long
#SBATCH --nodes=2
ulimit -s unlimited
mpirun -np 12 ./wrf.exe
```

Posteriormente, para correr el script se coloca sbatch script.sh (nombre del script, con extensión .sh). Para visualizar el tiempo que viene ejecutando la corrida se puede utilizar el comando squeue.

Las salidas del modelo están en formato netCDF, el cual se puede leer directamente con algún software como Matlab, para el caso, se utilizó el graficador GrADS, previo a esto se tuvo que realizar el Post – Procesamiento.

e. Post – Procesamiento

El modelo cuenta con herramientas de post procesamiento, tal es el caso del NCL (NCAR Command Language), RIP4 (Read/Interpolate/Plot), ARWpost (que convierte en archivos “.dat” y “.ctl” para poder visualizarlos en GrADS), WPP (WRF Post Processor) y VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere and Solar Research).

Cabe resaltar, que en esta investigación se utilizó la herramienta del ARWpost, para poder visualizar las salidas del modelo en un formato que pueda leerlo el software GrADS que nos ofrece diversas opciones de gráfico.

f. Extracción de la información

Se desarrolló un script que pueda extraer la CLA (Ver Anexo N° 7) en un formato *txt, para ser leído por el programa Microsoft Excel y su posterior generación de gráficas (Altura de la CLA vs Fechas de Monitoreo).

3.5.2. Validación de la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento del modelo WRF para representar correctamente la altura de la CLA.

a. Extracción de la información del modelo

Utilizando la herramienta de ARWpost, se aplicó una serie de scripts (Ver Anexos N° 8 al N° 10), para poder extraer la data en formato *txt, la cual puede ser leída por el programa Microsoft Excel.

De toda la información meteorológica proveniente de la estación meteorológica, presentada en formato Excel, se utilizó la información concerniente a las variables que se analizaron: Temperatura, velocidad del viento y humedad relativa.

b. Procesamiento de gráficas en excel

En primera instancia se procedió a realizar gráficas en cada hoja de Excel donde se comparó cada variable meteorológica con respecto a lo simulado y observado; para la temperatura será (°C vs Fechas de Monitoreo), humedad (% vs Fechas de Monitoreo) y velocidad del viento (m/s vs Fechas de Monitoreo)

c. Validación con observaciones

Galmarini (2003), sostiene que toda validación de un modelo debe ser realizada en forma cuantitativa a través de parámetros de validación apropiados, estos son indicadores estadísticos que permiten el análisis del performance del modelo. Además, explica que una de las formas más importantes y relevantes de validar es la comparación de las medidas de campo (observaciones de estaciones meteorológicas) con las variables simuladas.

En el presente trabajo se utilizó los parámetros sugeridos por Gross, G. (1994), los cuales comparan la calidad de los resultados del modelo con las observaciones de campo (información de las estaciones) usando los siguientes indicadores estadísticos (X_0 y X_P son las observaciones y simulaciones individuales para un mismo punto y para un mismo tiempo, además \bar{X}_0 y \bar{X}_P son los valores promedios de X_0 y X_P en el período de estudio.

- Coeficiente de correlación de Pearson (r):

$$r = \frac{\overline{(X_0 - \bar{X}_0) \times (X_P - \bar{X}_P)}}{\sqrt{\overline{(X_0 - \bar{X}_0)^2} \times \overline{(X_P - \bar{X}_P)^2}}} \quad [1]$$

El presente indicador es para medir el grado de asociación lineal entre lo simulado y lo observado. Es decir, si altos valores simulados están asociados a altos valores observados o viceversa; o sea, si las variaciones ocurren en un mismo sentido simultáneamente. Tiene un rango que va desde -1 a +1; siendo 1 la correlación perfecta y el cero indica que las simulaciones son independientes de las observaciones. Además, es importante indicar que el coeficiente de correlación no es afectado por un sesgo linear, puede estar perfectamente correlacionado ($r=1$) y presentar sesgos grandes (EUMETCAL, 2010). Para esta prueba se utilizará el software Minitab 18.

Así mismo, se hará una prueba “t” student para evaluar que tan significativas son las correlaciones; se realizó un análisis estadístico para el siguiente contraste:

$$\begin{aligned}
 H_0 &= 0 \\
 H_1 &\neq 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

Con una distribución “t” de Student con n-2 grados de libertad

Donde:

t: t calculado

n: tamaño de la muestra

r: coeficiente de correlación de Pearson

r^2 : coeficiente de determinación

H_0 : Hipótesis nula

H_1 : Hipótesis alterna

El valor del t tabular, bajo la distribución $t(n-2, \alpha/2)$ de dos colas, con $n-2$ grados de libertad y $\alpha = 0.05$. Si el valor p es mayor a nivel de significancia de 0.05, se acepta la hipótesis nula y por lo tanto se podrá concluir que ambas muestras tienen significancia.

- Sesgo Fraccional (FB)

$$FB = \frac{\bar{X}_0 - \bar{X}_p}{0.5 \times (\bar{X}_0 + \bar{X}_p)} \quad [3]$$

Esta medida es válida para comparar de forma global la media de la predicción y la media del valor real general. Valores negativos indican una sobreestimación por parte del valor simulado, caso contrario lo subestima. Cuanto más bajo es el valor, es decir cuanto más se aproxime a cero, los valores simulados se acercan más a lo observado. Debe encontrarse entre -0.67 y +0.67 para que sea aceptable, un valor cero indica que se encuentra libre de sesgo.

- Porcentaje de casos dentro de un factor de 2 (FAC2)

$$0.5 \leq \frac{X_0}{X_p} \leq 2 \quad [4]$$

Muestra en qué proporción están los valores de la ratio en el intervalo de 0.5 a 2. Para casos ideales sería que la proporción sea igual a la unidad, si esta proporción sale de este rango quiere decir que el valor simulado es muy incongruente, en la medida que o el valor simulado es mayor o igual al doble de lo observado o es menor o igual a la mitad de este. Para esto se tiene que tabular toda la data que verifique la expresión.

Si el 90 % de las simulaciones se encuentran en este rango, el modelo presentará un buen ajuste.

- Diferencia promedio (MD) o Bías promedio:

$$MD = \overline{X_0} - \overline{X_p}$$

Si el valor MD es negativo quiere decir que en términos globales el modelo sobreestima la observación, caso contrario lo subestima. Lo ideal es que este valor se aproxime a cero.

Pielke (2002), utiliza una técnica donde compara la desviación estándar de las observaciones (σ_{obs}) con los siguientes estadísticos de las simulaciones:

- La raíz del error cuadrático medio (RMSE)
- El RMSE centrado (EUB)
- Desviación estándar de lo observado (σ_{obs})
- Desviación estándar de lo simulado (σ)

Esta técnica permite evaluar cuantitativamente la performance del modelo, si cumple que: $\sigma \approx \sigma_{obs}$, $RMSE < \sigma_{obs}$ y $EUB < \sigma_{obs}$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_p - X_o)^2} \quad [5]$$

$$EUB = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([X_p - \bar{X}_p] - [X_o - \bar{X}_o])^2} \quad [6]$$

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad [7]$$

En la medida que los indicadores estadísticos demuestren que lo simulado se acerca significativamente al valor observado y que el comportamiento de las tendencias de las variables en el tiempo sea similar a lo observado, podremos concluir que la simulación brinda datos representativos y que el modelo es apto para simular las condiciones atmosféricas de la ciudad de Ite.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Se presentan los resultados tomando en cuenta los objetivos específicos:

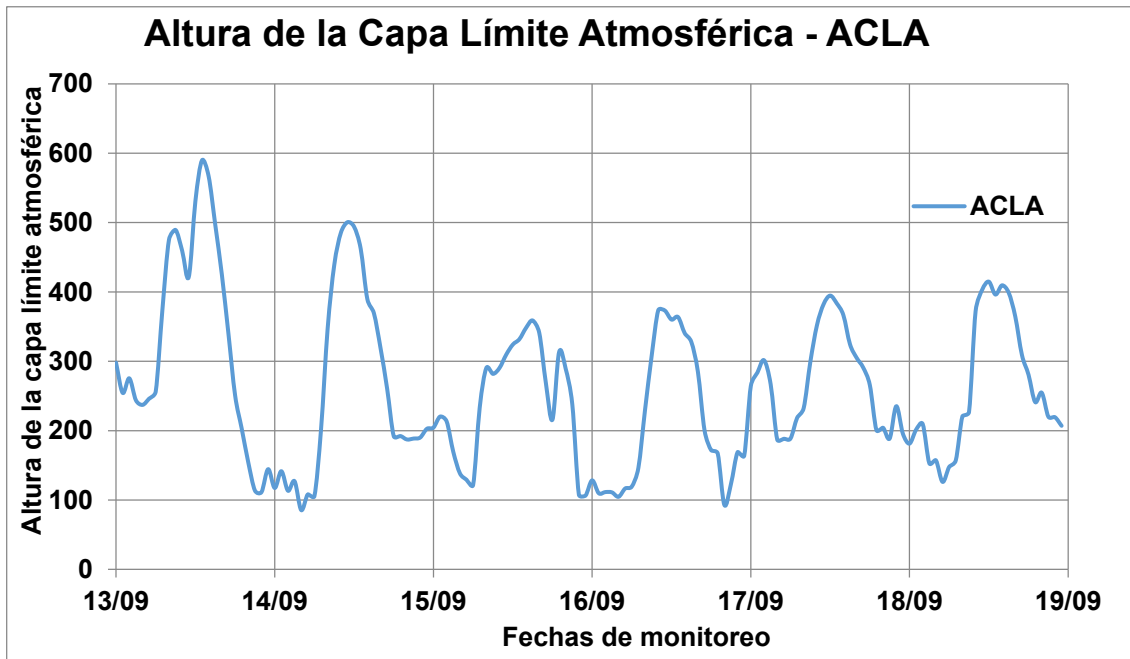
1) Cálculo de la altura de la capa límite atmosférica utilizando el esquema BouLac del modelo WRF. 2) Validación de la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento del modelo WRF para representar correctamente la altura de la CLA.

5.1. Altura de la capa límite atmosférica

La altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA) representado por el esquema BouLac, como se muestra en la Figura 5, se observa que para el día 13 la altura de la CLA estuvo más elevado con respecto a los próximos días donde se observa una ligera disminución en su altura de la capa en especial para los días 15 y 16 de septiembre.

Figura 5

Altura de la Capa Límite Atmosférica con el esquema BouLac del modelo WRF para los días 13 al 18 de septiembre del 2016.



Los valores de la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA), se presentan en el siguiente Cuadro 1, donde se puede apreciar que el promedio diario de la altura de la CLA varió durante los días de monitoreo, presentándose el mayor valor el día 13 de septiembre con 331,6 m, para los próximos días fueron los siguientes: 259,2 m (14 de septiembre), 243,6 m (13 de septiembre), 208,2 m (14 de septiembre), siendo este día el valor más bajo de la CLA, 271,7 m (15 de septiembre) y 261,4 m (16 de septiembre).

Cuadro 1

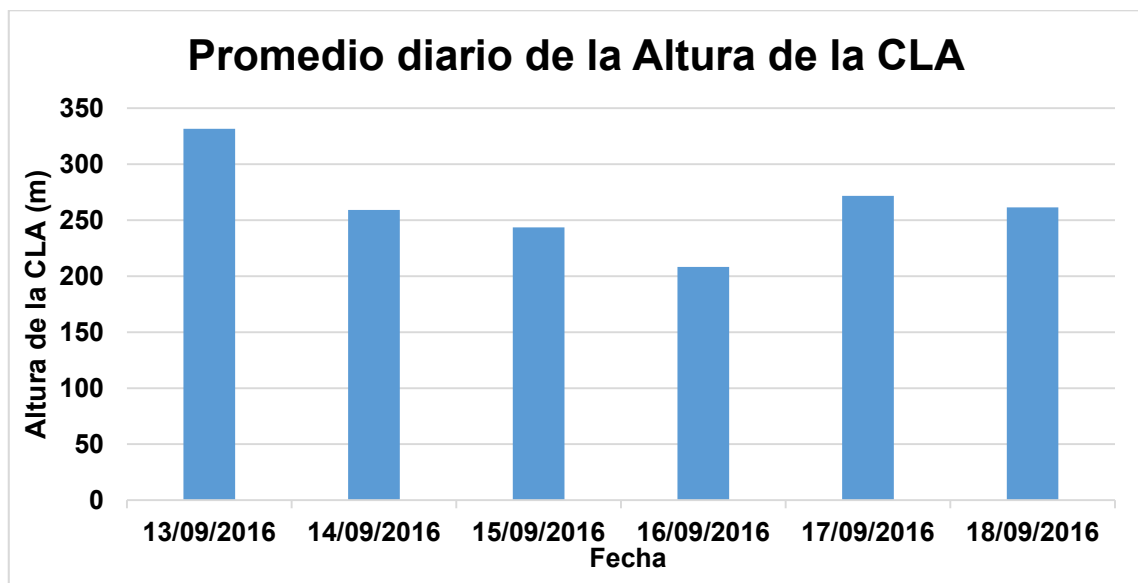
Valores horarios de la altura de la Capa Límite Atmosférica para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.

Fecha Hora	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	298,0	117,3	204,5	128,4	264,3	181,4
1	254,5	141,6	220,3	109,8	283,7	201,4
2	275,5	113,4	213,3	111,5	301,5	209,5
3	244,0	127,1	169,6	111,0	266,8	153,0
4	237,2	85,5	138,6	104,7	187,1	157,2
5	246,2	108,2	129,3	116,7	188,4	126,2
6	256,5	105,5	121,6	119,4	188,6	147,7
7	373,3	201,7	233,4	146,6	218,4	157,2
8	475,1	347,0	290,4	229,5	232,7	220,7
9	489,4	438,8	281,9	307,4	299,0	226,9
10	459,3	485,3	290,5	373,5	351,8	372,3
11	421,7	500,5	309,5	373,2	382,2	403,3
12	531,0	494,0	324,1	360,2	394,7	414,8
13	589,8	462,1	331,9	363,7	383,5	396,3
14	566,9	389,8	348,1	340,6	366,6	409,5
15	497,0	369,3	358,9	328,0	324,6	399,0
16	425,1	319,1	341,2	284,7	305,1	364,4
17	339,4	260,5	269,1	200,5	290,9	309,3
18	251,2	192,0	215,9	171,9	265,8	280,7
19	203,3	192,3	313,1	167,1	200,8	241,3
20	154,2	187,3	289,3	92,9	204,2	254,7
21	113,8	188,6	237,9	123,2	188,7	220,2
22	111,4	190,1	107,7	169,0	235,3	219,4
23	144,5	202,6	106,3	163,8	195,6	207,0
Promedio	331,6	259,2	243,6	208,2	271,7	261,4

Adicionalmente, también se puede observar en la Figura 6, el promedio diario de la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA).

Figura 6

Promedio diario de la Altura de la CLA para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.



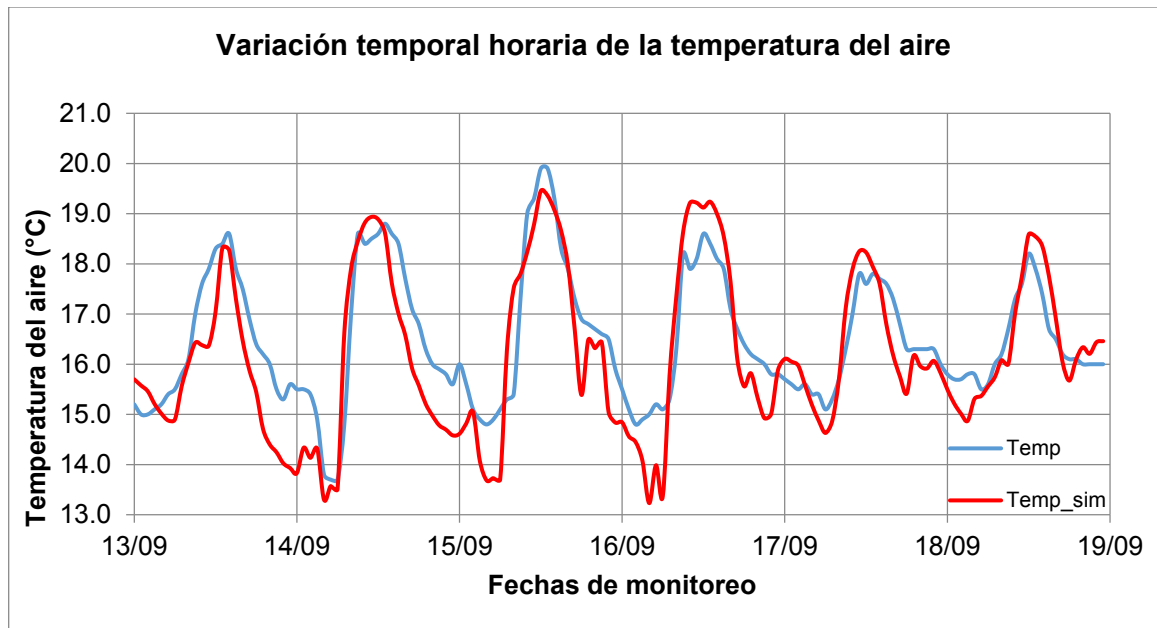
5.2. Validación del modelo

5.2.1. Validación de la temperatura del aire

La variación de la temperatura del aire simulado presentó un similar comportamiento con respecto a lo registrado en la estación (Ver Figura 7).

Figura 7

Variación temporal horaria de la temperatura del aire a 2 metros en (°C) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.



Se realizó la validación (Cuadro 2), se puede observar que la correlación Pearson es cercana al valor 1 el cual representa una buena correlación con respecto a lo observado con respecto al sesgo fraccional FB, el valor está dentro del rango, por lo que es aceptable y está cercano al valor cero el cual indicaría que está libre de sesgo. Para el factor 2 (FAC2), presenta un 100 % de los datos dentro del rango permitido lo que indica que el modelo presenta un buen ajuste para la variable temperatura del aire. Para el Bias promedio (MD), nos presenta un valor positivo, lo cual indica que el modelo subestima el valor de temperatura, en otras palabras, lo simulado presenta en su mayoría valores inferiores a lo registrado en la estación. Por último, según Pielke (2002), el modelo representa correctamente la magnitud de la variable temperatura del aire por cumplir con las tres condiciones.

Cuadro 2

Análisis estadístico de la temperatura del aire a 2 m de la superficie.

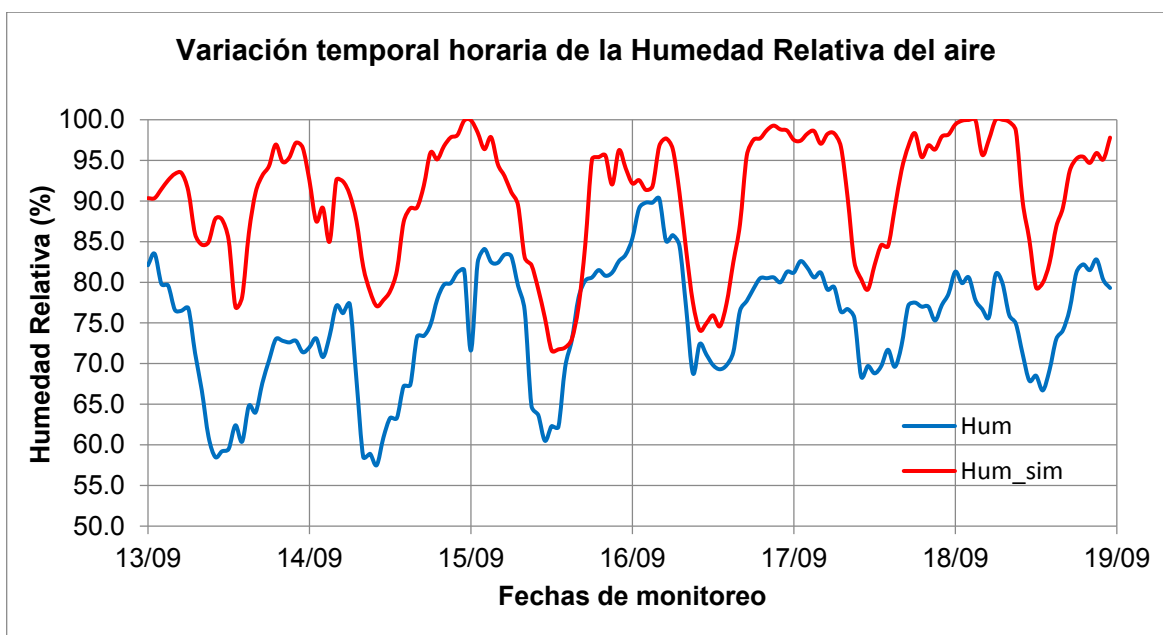
Pearson (r)	FB	FAC2 (%)	Bias (MD)	σ	σ obs	EUB	RMSE	Pielke (1) $\sigma \approx \sigma$ obs (2) $RMSE < \sigma$ obs (3) $EUB < \sigma$ obs
0,88	0,02	100	0,32	1,59	1,28	0,07	0,83	(1) SI (2) SI (3) SI

5.2.2. Validación de la humedad relativa del aire

La variación humedad relativa del aire simulado, presentó una desviación por encima de lo registrado en la estación (Figura 8), sin embargo, siguió las tendencias de ascenso y descenso de la humedad relativa.

Figura 8

Variación temporal horaria de la humedad relativa del aire a 2 metros en (%) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.



Se realizó la validación (Cuadro 3), se puede apreciar que la correlación Pearson es cercana al valor 1, el cual representa una buena correlación con respecto a lo observado, con respecto al sesgo fraccional FB, el valor está dentro del rango, por lo que es aceptable y está cercano al valor cero, el cual indicaría que está libre de sesgo. Para el factor 2 (FAC2), presenta un 100 % de los datos dentro del rango permitido lo que indica que el modelo presenta un buen ajuste para la variable humedad relativa del aire. Para el Bias promedio (MD), nos presenta un valor negativo lo cual indica que el modelo sobreestima el valor de humedad relativa, en otras palabras, lo simulado presenta en su mayoría valores superiores a lo registrado en la estación. Por último, según Pielke (2002), las desviaciones estándar son parecidas, lo que quiere decir que el patrón de variación tiene la misma amplitud tanto en lo simulado como en lo observado, sin embargo, no cumple con los tres requisitos por lo que el modelo no representa correctamente la magnitud de la variable humedad relativa del aire.

Cuadro 3

Análisis estadístico de la humedad relativa a 2 m de la superficie.

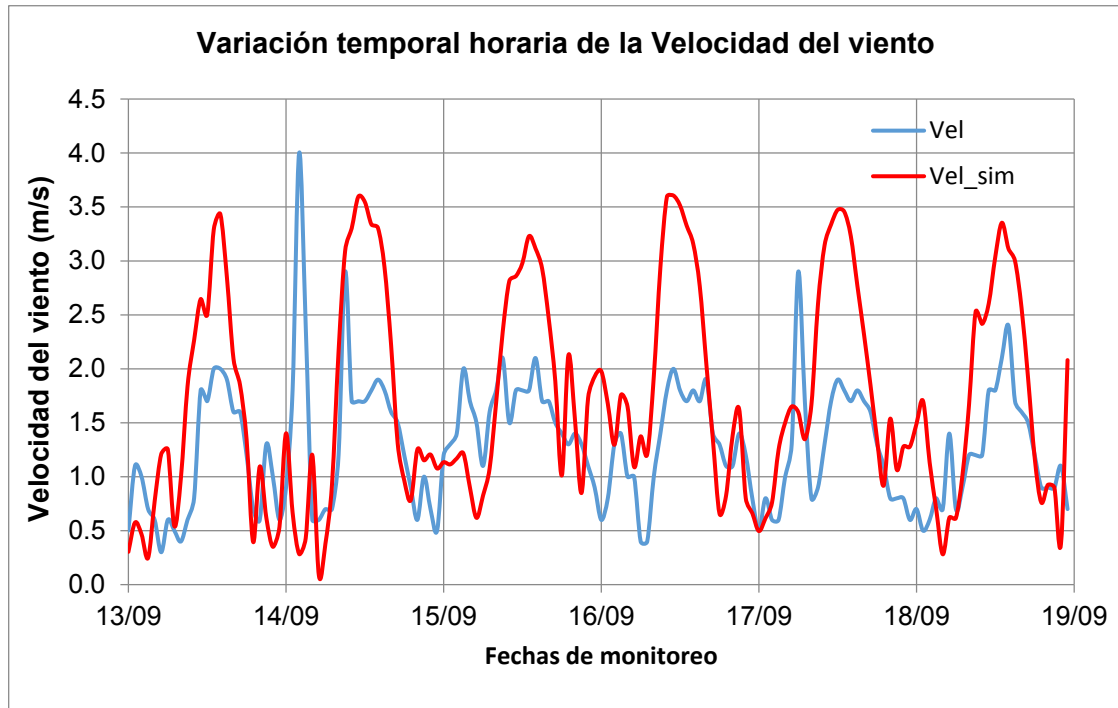
Pearson (r)	FB	FAC2 (%)	Bias (MD)	σ	σ obs	EUB	RMSE	Pielke (1) $\sigma \approx \sigma$ obs (2) $RMSE < \sigma$ obs (3) $EUB < \sigma$ obs
0,68	-0,19	100	-15,48	7,78	7,38	0,60	16,64	(1) SI (2) NO (3) SI

5.2.3. Validación de la velocidad del viento

La variación de la velocidad del viento simulado presentó en su mayoría una desviación por encima de lo registrado en la estación (Figura 9), sin embargo, siguió las tendencias de ascenso de la velocidad del viento por las mañanas y descenso en horas de la noche.

Figura 9

Variación temporal horaria de la velocidad del viento a 10 metros en (m/s) para los días 13 al 18 de septiembre del 2016 en la Ciudad de Ite – Tacna.



Se realizó la validación (Cuadro 4), se puede observar que la correlación Pearson está ligeramente lejos al valor 1, el cual nos podría indicar que no representa una buena correlación con respecto a lo observado, con respecto al sesgo fraccional FB, el valor está dentro del rango por lo que es aceptable. Para el factor 2 (FAC2), presenta un 74 % de los datos dentro del rango permitido lo que indica que el modelo no presenta un buen ajuste para la variable velocidad del viento. Para el Bias promedio (MD), nos presenta un valor negativo lo cual indica que el modelo sobreestima el valor de velocidad del viento, en otras palabras, lo simulado presenta en su mayoría valores superiores a lo registrado en la estación. Por último, según Pielke (2002), las desviaciones estándar no son parecidas, lo que quiere decir que el patrón de variación no tiene la misma amplitud tanto en lo simulado como en lo observado, así mismo no cumple con los tres requisitos, por lo que el modelo no representa correctamente la magnitud de la variable velocidad del viento.

Cuadro 4

Análisis estadístico de la velocidad del viento a 10 m de la superficie.

Pearson (r)	FB	FAC2 (%)	Bias (MD)	σ	σ_{obs}	EUB	RMSE	Pielke (1) $\sigma \approx \sigma_{obs}$ (2) $RMSE < \sigma_{obs}$ (3) $EUB < \sigma_{obs}$
0,53	-0,29	74	-0,44	0,98	0,58	0,05	0,94	(1) NO (2) NO (3) SI

5.3. Verificación y contratación de las hipótesis de investigación

a) Variable temperatura del aire

Se realizó la prueba estadística t- student para dos muestras con un nivel de confianza del 95 %, se utilizó el software Minitab18, y los resultados son los siguientes:

Prueba T e IC de dos muestras: OBS, SIM Método

μ_1 : media de OBS

μ_2 : media de SIM

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
OBS	144	16,48	1,29	0,11
SIM	144	16,16	1,60	0,13

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95 % para la diferencia
0,319	(-0,017, 0,656)

Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
Valor T	GL	Valor p
1,87	273	0,063

Siendo el valor p un valor mayor a nivel de significancia 0.05, se concluye que se acepta la hipótesis nula, por lo que no existe diferencia significativa en la temperatura promedio del aire de lo simulado con lo observado.

b) Variable humedad relativa

Se realizó la prueba estadística t- student para dos muestras con un nivel de confianza del 95 %, se utilizó el software Minitab18, y los resultados son los siguientes:

Prueba T e IC de dos muestras: OBS, SIM Método

μ_1 : media de OBS

μ_2 : media de SIM

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
OBS	144	74,92	7,41	0,62
SIM	144	90,40	7,80	0,65

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-15,484	(-17,249; -13,719)

Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
Valor T	GL	Valor p
-1,27	285	0,000

Siendo el valor p un valor menor a nivel de significancia 0.05, se concluye que se rechaza la hipótesis nula, por lo que existe diferencia significativa en la humedad relativa promedio del aire de lo simulado con lo observado.

c) Variable humedad relativa

Se realizó la prueba estadística t- student para dos muestras con un nivel de confianza del 95 %, se utilizó el software Minitab18, y los resultados son los siguientes:

Prueba T e IC de dos muestras: OBS, SIM

Método

μ_1 : media de OBS

μ_2 : media de SIM

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
OBS	144	1,287	0,578	0,048
SIM	144	1,724	0,987	0,082

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95 % para la diferencia
-0,4374	(-0,6251, -0,2497)

Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
Valor T	GL	Valor p
-4,59	230	0,000

Siendo el valor p un valor menor a nivel de significancia 0,05, se concluye que se rechaza la hipótesis nula, por lo que existe diferencia significativa en la velocidad del viento promedio de lo simulado con lo observado.

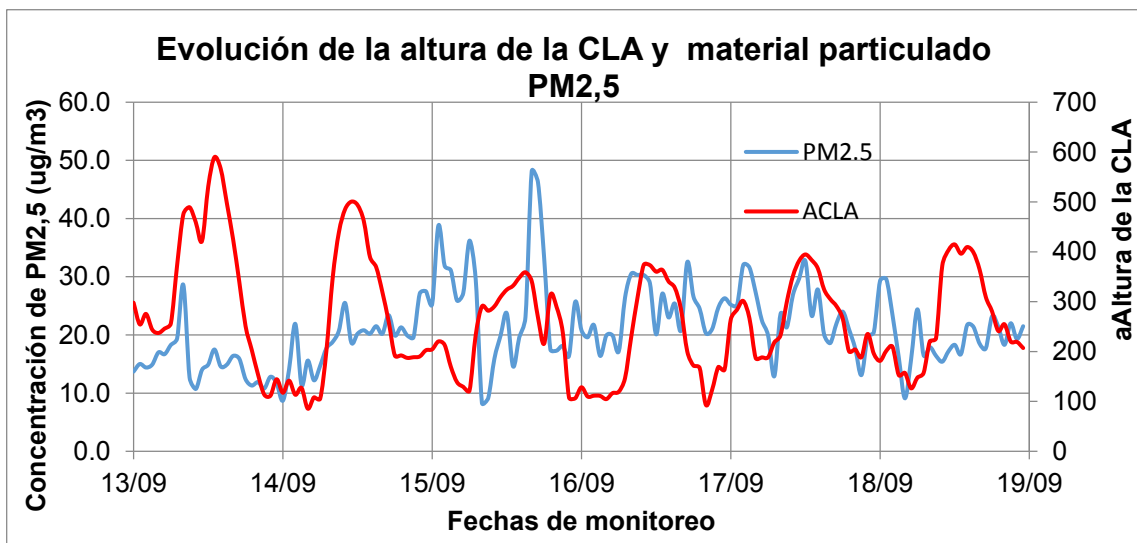
5.4. Altura de la CLA y la calidad del aire

5.4.1. Material particulado

El comportamiento del material particulado $PM_{2,5}$ y la altura de la CLA siguieron un comportamiento variable durante los días de monitoreo (Figura 10).

Figura 10

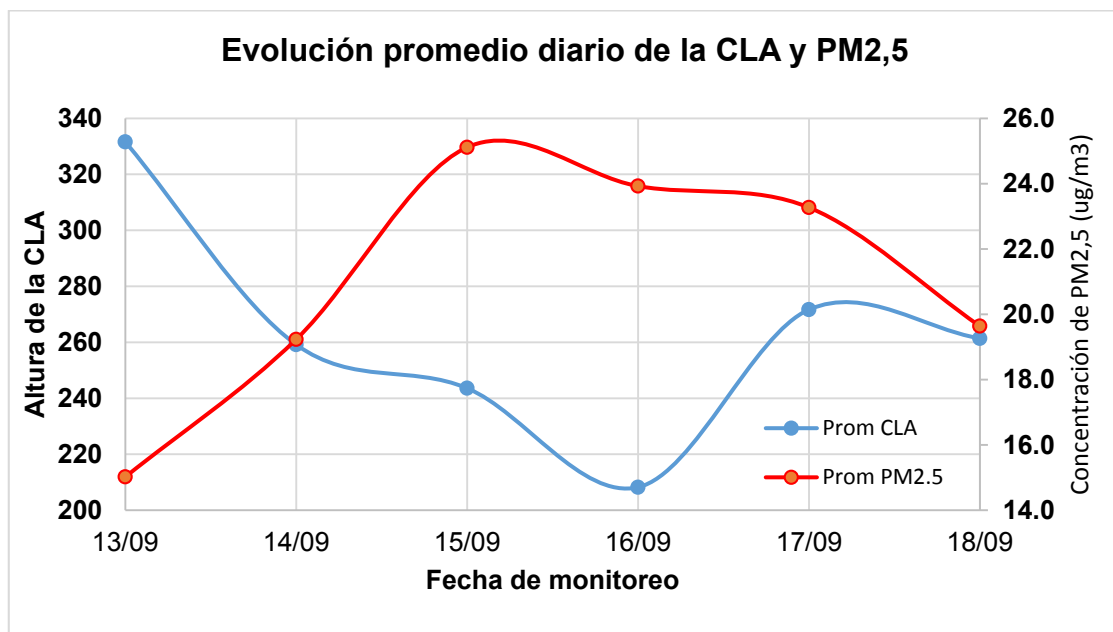
Evolución de la altura de la CLA y material particulado $PM_{2,5}$.



En la Figura N 11, se puede apreciar el comportamiento promedio diario, tanto de la altura de la CLA y la concentración de $PM_{2,5}$ para los días 13 al 18 de septiembre, observándose que los valores más altos de concentración de material particulado fueron los días 15 y 16 de septiembre, siendo estos los días con menor altura en la CLA.

Figura 11

Evolución de la altura de la CLA y material particulado $PM_{2,5}$.

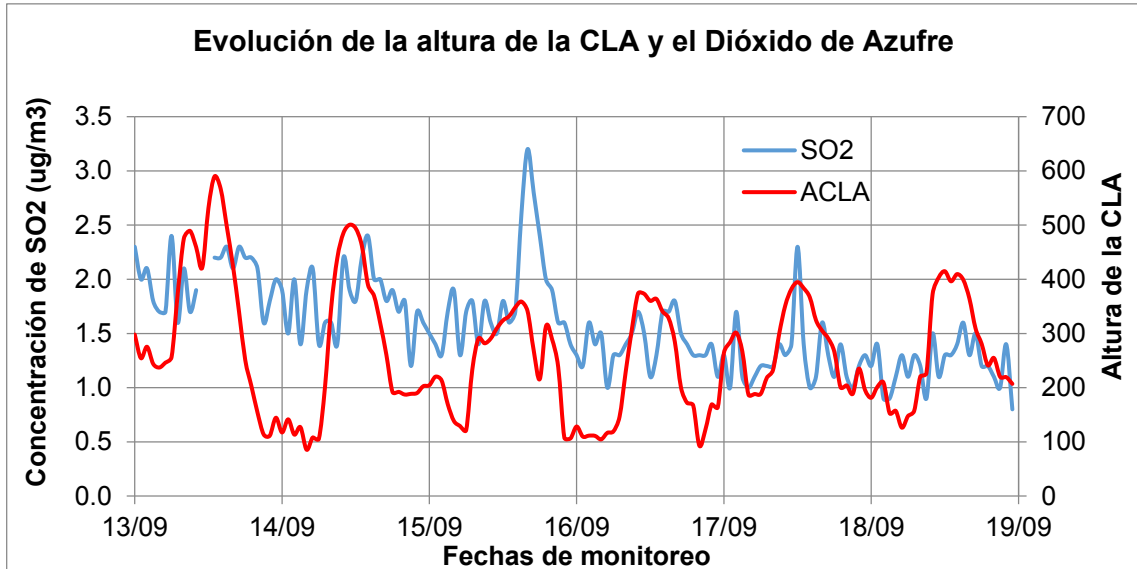


5.4.2. Dióxido de azufre

El comportamiento del dióxido de azufre y la altura de la CLA siguieron un comportamiento variable durante los días de monitoreo (Figura 12).

Figura 12

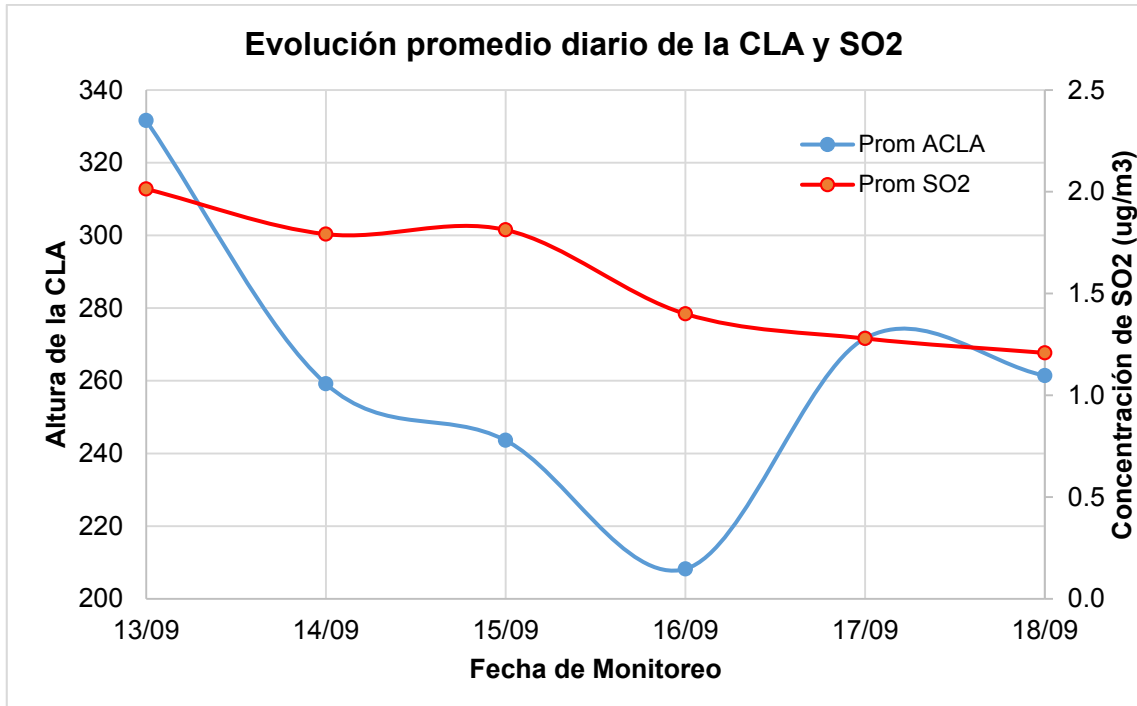
Evolución de la altura de la CLA y el dióxido de azufre.



En la Figura 13, se puede observar el comportamiento promedio diario tanto de la altura de la CLA y la concentración de dióxido de azufre SO₂ para los días 13 al 18 de septiembre, observándose que los valores más altos de concentración de SO₂ fueron los días 13,14 y 15 de septiembre, sin embargo, los valores menores de la altura de la capa limite fueron los días 15 y 16 de septiembre.

Figura 13

Evolución de la altura de la CLA y concentración de SO₂.

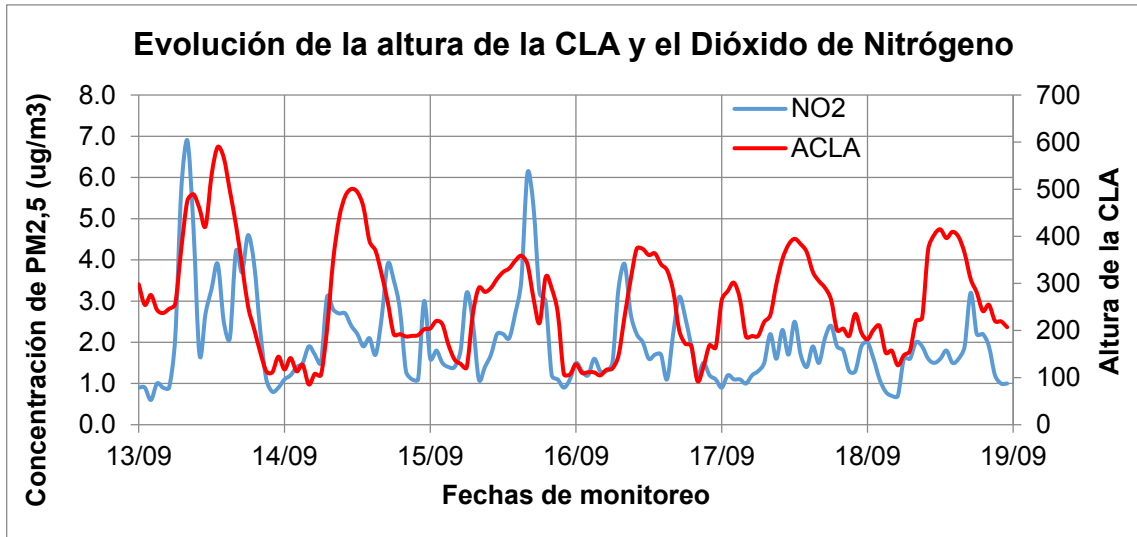


5.4.3. Dióxido de nitrógeno

El comportamiento del dióxido de nitrógeno y la altura de la Capa Límite Atmosférica (CLA), siguieron un comportamiento variable durante los días de monitoreo (Figura 14).

Figura 14

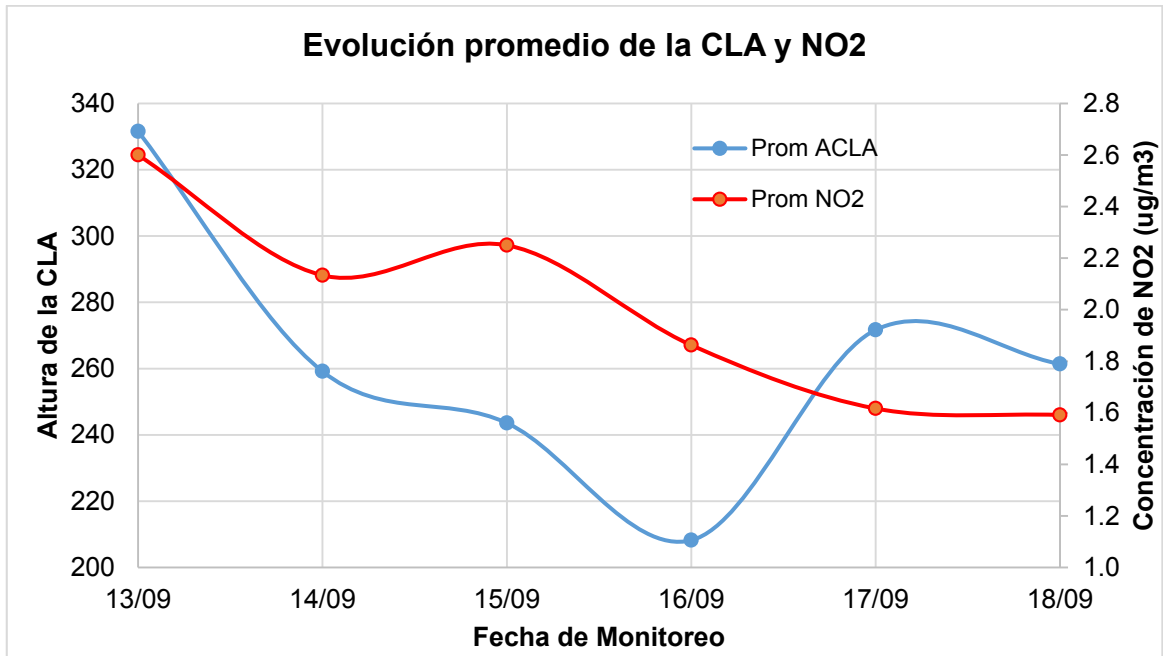
Evolución de la altura de la CLA y el dióxido de nitrógeno.



En la Figura 15, se puede observar el comportamiento promedio diario tanto de la altura de la CLA y la concentración de dióxido de azufre NO₂ para los días 13 al 18 de septiembre, observándose que los valores más altos de concentración de NO₂ fueron los días 13 y 15 de septiembre, sin embargo, los valores menores de la altura de la capa límite fueron los días 15 y 16 de Septiembre.

Figura 15

Evolución de la altura de la CLA y concentración de NO₂.



CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La altura de la CLA representado por el esquema BouLac como se observa en la Figura 5, aumenta en el transcurso del día, presentando su máximo valor alrededor del mediodía y posteriormente va decreciendo al atardecer y se mantiene por toda la noche, este comportamiento diurno de la CLA cumple el patrón explicado por Gassmann, M. (1998), así como también se explica el comportamiento diurno de la altura de la CLA en la tesis doctoral titulado: "Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna, realizado por Nuñez S (2001).

Por otro lado, la temperatura del aire siguió las tendencias de ascenso al medio día y el descenso con el transcurrir del día presentándose valores bajos en horas de la madrugada tanto para lo simulado como lo observado.

El comportamiento de la CLA vs la concentración de material particulado PM_{2,5}, así como también la CLA vs la concentración del dióxido de azufre SO₂, tuvieron variaciones durante el día, observándose que el mayor valor de PM_{2,5} y SO₂, fue en el mismo día 15 de septiembre a las 16:00 horas con 48,1 ug/m³ y 3,2 ug/m³ respectivamente. Con respecto al comportamiento de la CLA vs la concentración del dióxido de nitrógeno NO₂ se presentó el mayor valor de concentración el día 13 de septiembre a las 09:00 horas con 6,9 ug/m³.

Con respecto a los estadísticos de error utilizados (coeficiente de correlación de Pearson, sesgo fraccional, factor de 2, vías promedio, según Gross G. (1194) y la técnica de Pielke (2002), se pudo verificar y evaluar cuantitativamente la performance del modelo, ya que toda validación de un modelo debe ser realizada de forma cuantitativa a través de parámetros de validación, Galmarini (2003).

CONCLUSIONES

1. El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) permitió simular la variable Capa Límite Atmosférica (CLA), utilizando el esquema Boulac teniendo una resolución horizontal de 3 km, esto favoreció realizar un mejor análisis del comportamiento de la CLA en la ciudad de Ite – Tacna.
2. Para la variable de temperatura del aire, el modelo representa una buena correlación con lo observado, adicionalmente tiene un buen ajuste y representa correctamente la magnitud de la variable temperatura del aire, sin embargo, el modelo subestima los valores simulados. Con respecto a la variable de humedad relativa del aire, el modelo representa una buena correlación con lo observado a pesar de sobreestimar los valores, así mismo tiene un buen ajuste, sin embargo, el modelo no representa correctamente la magnitud debido al incumplimiento de la segunda condición establecida por Pielke (2002). Por último, la variable velocidad del viento, no representa una correlación con lo observado, así mismo no presenta un buen ajuste, el modelo sobreestima la variable y no representa correctamente la magnitud debido al incumplimiento de la primera y segunda condición establecida por Pielke (2002).
3. La relación que existe entre la altura de la CLA y la calidad del aire, dependió de la variable en estudio. Para el caso del material particulado (PM_{2,5}), existe una relación inversa con la altura de la CLA, debido a que menor altura de la CLA se registraba una mayor concentración de material particulado PM_{2,5}. Para el caso de del dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) no se puede concluir que existe un tipo de relación con respecto la altura de la CLA, debido a la aleatoriedad de ambas variables. Se concluye que la configuración del modelo puede representar correctamente la relación inversa entre la altura de la CLA y el material particulado (PM 2,5).

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar el modelo WRF para aplicaciones de seguimiento, control y monitoreo de material particulado (PM_{2,5}), ya que en el estudio realizado la variable PM_{2,5} representó correctamente con respecto a la altura de la CLA.
2. Se recomienda realizar dicha investigación en lugares más críticos donde se pueda registrar valores más altos en cuanto a SO₂ y NO₂, para así poder así analizar la relación que existe con la altura de la capa límite.
3. Para el cálculo de la CLA se recomienda utilizar el modelo WRF utilizando el esquema Boulac para realizar estudios relacionados a la calidad del aire.
4. Para solicitar la data de los monitoreos, se recomienda solicitarlos con anticipación al Gobierno Regional, en nuestro caso nos derivaron a la municipalidad de Ite para solicitar la información.
5. Se recomienda de preferencia tener una PC exclusivo para las simulaciones y no interrumpir o hacer uso del mismo cuando se realiza los cálculos.
6. Se recomienda, a las autoridades encargadas del control y monitoreo de la calidad del aire, utilizar el modelo WRF y analizar el comportamiento de la altura de la capa límite atmosférica como una herramienta para el seguimiento y la toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arya, S. (2001) *Introduction to Micrometeorology (2nd Edition)*. International Geophysics Series. Academic Press, London, 307 pp.
- Beljaars, A. (1992) *The Parameterization of the Planetary Boundary – Layer*. Lecture series. ECMWF, 73pp.
- Bougeault, P. y Lacarrère, P. (1989). *Parameterization of orographic induced turbulence in a mesobeta scale model*.
- Businger (1982) *Spectral Characteristics of the Convective Boundary Layer Over Uneven Terrain*.
- Carlson M. & Stull R. (1986). *Subsidence in the Nocturnal Boundary Layer*. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol 25, pp 1088- 1099.
- Castro M., González y A. Portela (1991). *Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico*. *Física de la Tierra*.
- EUMETCAL, (2010). *Learning Module: Forecat Verification*. Retrieved from <http://www.eumetcal.org/resources/ukmeteocal/verification/www/english/courses/msgcrs/index.htm>
- Fisher, et al. (1998). *Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for Report*. *Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models*.
- Gassmann, M. (1998). *Potencial de contaminación atmosférica en la República Argentina*.
- Gobierno Regional de Tacna GORE (2014). *Mejoramiento del servicio de monitoreo e información ambiental*.
- Gross, G. (1994). *Statistical evaluation of the mesoscale model results*, *Meteorol. Monogr. 57, Am. Meteorol. Soc., 9*, in: R.A. Pielke, R.T. Pearce, Editors, *Mesoscale Modeling of the Atmosphere (1994)*, pp. 137–154.

- Hernandez, et. al. (2014). *Metodología de la Investigación. Sexta Edición.*
- Jacobson, M. (2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling (Second.)*. New York: Cambridge University Press. 813p
- Jiménez M. y J. Cuxart (2005). *Large-eddy simulations of the stable boundary layer using the standard Kolmogorov theory: Range of applicability. Bound. - Layer Meteor., 115, 241 – 261.*
- Kistler, R., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Kalnay, E., et al. (2001). *The NCEP–NCAR 50–Year Reanalysis: Monthly Means CD–ROM and Documentation. Bulletin of the American Meteorological Society, 82(2), 247-267.*
- Matveichuk, A. (2004). *Intersection of Oil Parallels: Historical Essays.*
- Ministerio del Ambiente MINAM (2015). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013 -2014.*
- Ministerio de Salud MINSA (2011). *Política nacional de salud ambiental 2011 - 2020.*
- National Center for Atmospheric Research NCAR (2009). *Advance Research WRF version 3 Modelling System User's guide.*
- Nuñez S. (2001). *Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. Tesis Doctoral.*
- Pearson H., Putlock J. y Hunt J. (1983). *A statical model of fluid – element motions and vertical diffusion in a homofeneous stratified turbulent flow. J. Of Fluid Mechanics 90, 33-49.*
- Pielke, R. A. (2002). *Mesoscale Meteorological Modeling. (A. Press, Ed.) International Geophysics Series (Second., p.676).*

- Sales M. J. (2016). *Modelización de la Capa Límite Planetaria bajo condiciones de forzamiento atmosférico mesoescalar. Análisis de sensibilidad de diferentes parametrizaciones y esquemas numéricos.*
- Schmitz, R., Falvey, M., y Coper, M. J. (2008). *Implementación de un Modelo Fotoquímico de alta resolución para la Macrozona Central del País Informe Final Resumen Ejecutivo.*
- Seibert et al., (1998) *Mixing layer depth determination for dispersión modelling.*
- Seibert, P., Beyrich, S. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen & P. Tercier (2000). *Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmos. Environ., 34, 1001-1027.*
- Stull, R. (1991) *Static Stability – An Update. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 72, Nr. 10, 1521 – 1529.*
- Stull, R. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Atmospheric Sciences library. Kluwer Academic Publishers, 666 pp.*
- Stull, R. (1989) *Boundary Layer Meteorology.*
- Weston (1999) *Una invitación a la filosofía medioambiental.*
- World Meteorological Organization WMO (2008) *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Sixth edition. World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland. WMO N° 08*

ANEXOS

ANEXO 1: FICHA DE MONITOREO MATERIAL PARTICULADO 2,5 MICRAS (PM2,5)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Método y muestreo: Método de microbalanza oscilatoria (Automático)				Tipo de data: Horario		
Equipo de monitoreo: Monitor TEOM 1405 DF				Unidad: ug/m ³		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				ECA: 25 ug/m ³ para 24 horas (Vigente en ese momento)		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	13,7	8,7	25,3	20,8	25,2	29,3
1	15,0	14,1	38,8	19,6	25,1	29,6
2	14,4	21,9	31,9	21,7	32,0	23,4
3	14,9	11,4	31,1	16,4	31,6	16,2
4	17,0	15,6	25,9	19,9	27,3	9,1
5	16,7	12,2	27,2	19,9	22,5	15,9
6	18,3	14,7	36,2	17,2	19,9	24,4
7	19,4	17,7	29,5	26,4	12,9	16,5
8	28,6	18,8	8,3	30,5	23,6	17,9
9	12,7	20,7	9,1	30,3	21,3	16,4
10	10,7	25,5	15,9	30,3	26,9	15,4
11	14,0	18,7	19,9	28,9	29,7	17,2
12	14,9	20,2	23,7	20,1	32,7	18,3
13	17,5	20,8	14,6	27,1	23,3	16,7
14	14,6	20,2	19,6	23,0	27,8	21,7
15	14,9	21,5	23,1	25,4	20,1	21,4
16	16,4	20,2	48,1	20,8	18,6	18,5
17	15,9	23,4	46,3	32,5	22,0	17,7
18	12,4	19,9	33,2	26,6	24,0	23,2
19	11,3	21,3	17,5	24,5	21,0	21,4
20	11,9	19,9	17,3	20,3	17,7	18,3
21	10,8	19,6	18,1	21,0	13,1	22,0
22	12,8	27,1	16,4	24,7	19,7	19,3
23	11,7	27,5	25,7	26,3	20,5	21,5

ANEXO 2: FICHA DE MONITOREO DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Método y muestreo: Método Quimioluminiscencia				Tipo de data: Horario		
Equipo de monitoreo: Thermo Scientific – Analizador 42i				Unidad: ug/m ³		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				ECA: 200 ug/m ³ para 24 horas (Vigente en ese momento)		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	0,9	1,1	1,6	1,5	0,9	2,0
1	0,9	1,2	1,8	1,3	1,2	1,6
2	0,6	1,4	1,5	1,2	1,1	1,1
3	1,0	1,5	1,4	1,6	1,1	0,8
4	0,9	1,9	1,4	1,3	1,0	0,7
5	0,9	1,7	1,8	1,3	1,2	0,7
6	2,1	1,5	3,2	1,5	1,3	1,6
7	5,7	3,1	2,5	3,3	1,5	1,6
8	6,9	2,8	1,1	3,9	2,2	2,0
9	4,8	2,7	1,4	2,7	1,6	1,9
10	1,7	2,7	1,7	2,2	2,3	1,6
11	2,7	2,4	2,2	2,0	1,7	1,5
12	3,3	2,2	2,2	1,6	2,5	1,6
13	3,9	1,9	2,1	1,7	1,7	1,8
14	2,5	2,1	2,7	1,7	1,4	1,5
15	2,1	1,7	3,5	1,1	1,9	1,6
16	4,2	2,6	6,1	2,2	1,5	1,9
17	3,7	3,9	5,3	3,1	2,1	3,2
18	4,6	3,5	3,2	2,6	2,4	2,2
19	3,9	2,8	3,0	1,9	1,9	2,2
20	2,3	1,3	1,2	1,2	1,8	1,9
21	1,1	1,1	1,1	1,5	1,3	1,2
22	0,8	1,1	0,9	1,2	1,3	1,0
23	0,9	3,0	1,1	1,1	1,9	1,0

ANEXO 3: FICHA DE MONITOREO DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Método y muestreo: Método Fluorescencia UV				Tipo de data: Horario		
Equipo de monitoreo: Thermo Scientific – Analizador 450i				Unidad: ug/m ³		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				ECA: 20 ug/m ³ para 24 horas (Vigente en ese momento)		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	2,3	1,9	1,5	1,3	1,3	1,2
1	2,0	1,5	1,4	1,2	1,0	1,4
2	2,1	2,0	1,3	1,6	1,7	0,9
3	1,8	1,4	1,7	1,4	1,1	0,9
4	1,7	1,9	1,9	1,5	1,0	1,1
5	1,7	2,1	1,3	1,0	1,1	1,3
6	2,4	1,4	1,7	1,3	1,2	1,1
7	1,6	1,6	1,8	1,3	1,2	1,3
8	2,1	1,6	1,4	1,4	1,2	1,2
9	1,7	1,4	1,8	1,5	1,4	0,9
10	1,9	2,2	1,6	1,7	1,3	1,5
11	*	1,9	1,5	1,5	1,4	1,1
12	*	1,8	1,8	1,1	2,3	1,3
13	2,2	2,2	1,6	1,3	1,4	1,3
14	2,2	2,4	1,7	1,7	1,0	1,4
15	2,3	2,0	2,6	1,7	1,1	1,6
16	2,1	2,0	3,2	1,8	1,6	1,3
17	2,3	1,8	2,8	1,5	1,3	1,5
18	2,2	1,9	2,4	1,4	1,1	1,2
19	2,2	1,7	2,0	1,3	1,4	1,2
20	2,1	1,8	1,9	1,3	1,1	1,1
21	1,6	1,2	1,6	1,3	1,0	1,0
22	1,8	1,7	1,6	1,4	1,2	1,4
23	2,0	1,6	1,4	1,1	1,3	0,8

*Verificación del equipo

ANEXO 4: FICHA DE MONITOREO – SENSOR DE TEMPERATURA DEL AIRE (°C)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Equipo de muestreo: Sensor de temperatura del aire PR20/HC2S3				Tipo de data: Horario		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				Unidad: °C		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	15,2	15,5	16,0	15,5	15,7	15,8
1	15,0	15,5	15,6	15,1	15,6	15,7
2	15,0	15,4	15,1	14,8	15,5	15,7
3	15,1	14,9	14,9	14,9	15,6	15,8
4	15,2	13,8	14,8	15,0	15,4	15,8
5	15,4	13,7	14,9	15,2	15,4	15,5
6	15,5	13,7	15,1	15,1	15,1	15,6
7	15,8	14,8	15,3	15,3	15,3	16,0
8	16,1	17,0	15,4	16,3	15,7	16,2
9	17,0	18,6	17,3	18,2	16,3	16,7
10	17,6	18,4	19,0	17,9	17,0	17,3
11	17,9	18,5	19,3	18,1	17,8	17,6
12	18,3	18,6	19,9	18,6	17,6	18,2
13	18,4	18,8	19,9	18,4	17,8	17,9
14	18,6	18,6	19,3	18,1	17,7	17,4
15	17,9	18,4	18,3	17,9	17,6	16,7
16	17,5	17,7	17,9	17,1	17,3	16,5
17	16,9	17,1	17,3	16,7	16,8	16,2
18	16,4	16,8	16,9	16,4	16,3	16,1
19	16,2	16,3	16,8	16,2	16,3	16,1
20	16,0	16,0	16,7	16,1	16,3	16,0
21	15,5	15,9	16,6	16,0	16,3	16,0
22	15,3	15,8	16,5	15,8	16,3	16,0
23	15,6	15,6	15,9	15,8	16,0	16,0

ANEXO 5: FICHA DE MONITOREO – HUMEDAD RELATIVA (%)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Equipo de muestreo: Sensor de humedad relativa – HC2S3				Tipo de data: Horario		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				Unidad: %		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	82,1	72,0	71,6	85,4	81,2	81,3
1	83,5	73,1	82,4	89,1	82,6	79,9
2	79,8	70,8	84,1	89,8	81,8	80,6
3	79,6	73,4	82,5	89,8	80,6	77,8
4	76,6	77,1	82,4	90,3	81,2	76,7
5	76,5	76,2	83,4	85,1	79,1	75,7
6	76,8	77,3	83,2	85,8	79,4	81,0
7	71,3	67,9	79,6	84,5	76,4	79,9
8	66,7	58,5	76,5	76,8	76,7	76,0
9	61,0	58,9	64,8	68,8	75,6	74,9
10	58,5	57,5	63,7	72,4	68,4	71,2
11	59,2	60,9	60,5	71,1	69,7	67,9
12	59,5	63,3	62,3	69,8	68,8	68,5
13	62,4	63,3	62,2	69,3	69,7	66,7
14	60,4	67,2	69,5	69,8	71,7	69,2
15	64,8	67,4	72,9	71,4	69,6	73,0
16	64,0	73,3	78,1	76,5	72,2	74,1
17	67,6	73,4	80,2	77,7	77,1	76,7
18	70,4	74,8	80,6	79,2	77,5	81,2
19	73,0	77,9	81,5	80,5	77,0	82,2
20	72,8	79,7	80,8	80,5	77,0	81,5
21	72,6	79,9	81,2	80,6	75,3	82,8
22	72,8	81,2	82,6	80,0	77,2	80,3
23	71,4	81,5	83,4	81,3	78,6	79,3

ANEXO 6: FICHA DE MONITOREO – VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)

FICHA DE MONITOREO						
Ciudad: Ite, Tacna				Periodo: 13 al 18 de septiembre		
Ubicación: Planta de tratamiento de agua potable				Año: 2016		
Equipo de muestreo: Velocidad del aire WINDSONIC I				Tipo de data: Horario		
Coordenadas UTM: 291837E, 8024172N				Unidad: m/s		
Fecha de Monitoreo						
HORA	13/09/2016	14/09/2016	15/09/2016	16/09/2016	17/09/2016	18/09/2016
0	0,5	0,9	1,2	0,6	0,5	0,7
1	1,1	1,8	1,3	0,8	0,8	0,5
2	1,0	4,0	1,4	1,3	0,6	0,6
3	0,7	2,4	2,0	1,4	0,6	0,8
4	0,6	0,6	1,7	1,0	1,0	0,7
5	0,3	0,6	1,5	1,0	1,3	1,4
6	0,6	0,7	1,1	0,4	2,9	0,7
7	0,5	0,7	1,6	0,4	1,7	0,9
8	0,4	1,2	1,8	1,0	0,8	1,2
9	0,6	2,9	2,1	1,4	0,9	1,2
10	0,8	1,7	1,5	1,8	1,3	1,2
11	1,8	1,7	1,8	2,0	1,7	1,8
12	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,8
13	2,0	1,8	1,8	1,7	1,8	2,1
14	2,0	1,9	2,1	1,8	1,7	2,4
15	1,9	1,8	1,7	1,7	1,8	1,7
16	1,6	1,6	1,7	1,9	1,7	1,6
17	1,6	1,5	1,5	1,4	1,6	1,5
18	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3	1,2
19	0,7	0,9	1,3	1,1	1,1	0,9
20	0,6	0,6	1,4	1,1	0,8	0,9
21	1,3	1,0	1,3	1,4	0,8	0,9
22	1,0	0,7	1,1	1,2	0,8	1,1
23	0,6	0,5	0,9	0,8	0,6	0,7

ANEXO 7: SCRIPT PARA EXTRAER DATOS DE LA ALTURA DE LA CAPA LÍMITE AMTOSFÉRICA

'reinit'

'open wrfout_d03_2016-09.ctl'

'set lat -17.8586'

'set lon 288.035'

*'set t 294 438'

to=294

while to<=438

'set t ' to

'd pblh'

temp1=sublin(result,1)

temp2=subwrđ(temp1,4)

b=temp2

write ('C:\datos_tesis/pblh.txt', b)

to=to+1

endwhile

ANEXO 8: SCRIPT PARA EXTRAER DATOS DE TEMPERATURA DEL AIRE

'reinit'

'open wrfout_d03_2016-09.ctl'

'set lat -17.8586'

'set lon 288.035'

*'set t 294 438'

to=294

while to<=438

'set t ' to

'd mag(u,v)'

temp1=sublin(result,1)

temp2=subwrd(temp1,4)

b=temp2

write('C:\datos_tesis/temp.txt', b)

to=to+1

endwhile

ANEXO 9: SCRIPT PARA EXTRAER DATOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO

'reinit'

'open wrfout_d03_2016-09.ctf'

'set lat -17.8586'

'set lon 288.035'

*'set t 294 438'

to=294

while to<=438

'set t ' to

'd mag(u,v)'

temp1=sublin(result,1)

temp2=subwrd(temp1,4)

b=temp2

write('C:\datos_tesis/vel_mag.txt', b)

to=to+1

endwhile

ANEXO 10: SCRIPT PARA EXTRAER DATOS DE HUMEDAD RELATIVA

'reinit'

'open wrfout_d03_2016-09.ctl'

'set lat -17.8586'

'set lon 288.035'

*'set t 294 438'

to=294

while to<=438

'set t ' to

'd rh'

temp1=sublin(result,1)

temp2=subwrd(temp1,4)

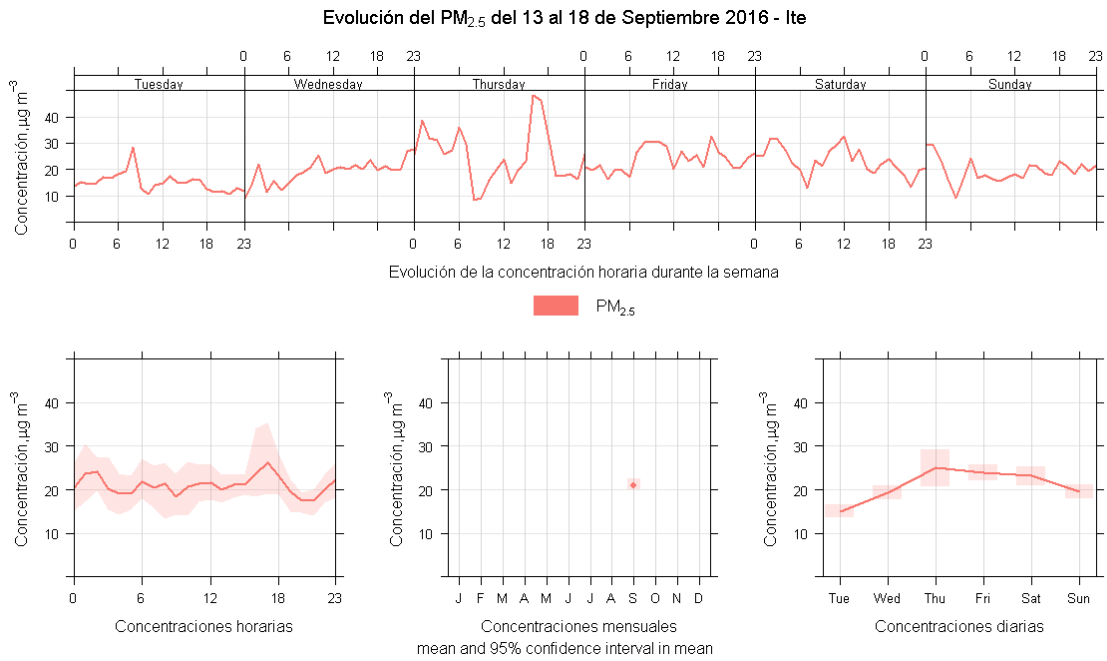
b=temp2

write('C:\datos_tesis/rh.txt', b)

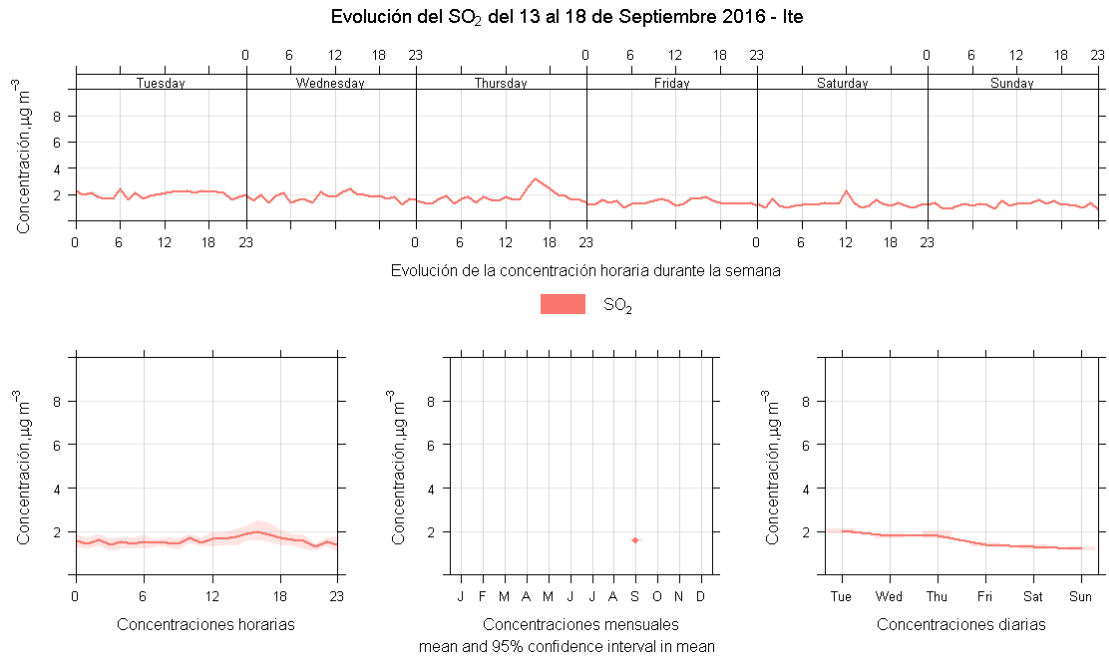
to=to+1

endwhile

ANEXO 11: GRÁFICA DE MATERIAL PARTICULADO PM_{2,5} – EVOLUCIÓN DIARIA, CONCENTRACIONES HORARIAS, CONCENTRACIÓN MENSUAL Y CONCENTRACIONES DIARIAS.



ANEXO 12: GRÁFICA DE DIÓXIDO DE AZUFRE SO₂ – EVOLUCIÓN DIARIA, CONCENTRACIONES HORARIAS, CONCENTRACIÓN MENSUAL Y CONCENTRACIONES DIARIAS.



ANEXO 13: GRÁFICA DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO NO₂ – EVOLUCIÓN DIARIA, CONCENTRACIONES HORARIAS, CONCENTRACIÓN MENSUAL Y CONCENTRACIONES DIARIAS.

