



**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Maestría en ciencias (hidrología  
Ambiental)**

Evaluación de deterioro en patrimonio cultural por  
fenómenos hidrometeorológicos. (Zona de Kohunlich).

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el  
Grado de Maestro en ciencias (Hidrología Ambiental)

**Presenta**

Ing. Miguel Angel Sánchez Quijano

**Dirigido por**

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López



**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Maestría en ciencias (hidrología Ambiental)**

Evaluación de deterioro en patrimonio cultural por fenómenos hidrometeorológicos. (Zona de Kohunlich).

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en ciencias (Hidrología Ambiental)

Presenta

Ing. Miguel Angel Sánchez Quijano

Dirigido por

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López

Sinodales:

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López

Presidente

Firma

Dr. Josué de Jesús Trejo Alonso

Secretario

Firma

Mtra. Verónica Leyva Picaso

Vocal

Firma

M.C. Sebastián Fuentes Castros

Suplente

Firma

M.C. Enrique Montoya Morado

Suplente

Firma

## DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

*A mis padres Pilar Quijano y Celso Sánchez por la vida y por enseñarme a vivirla. Su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades y así lograr la educación y ética que poseo.*

*A mis docentes, mi cuerpo de sínodos y en especial a mi director de tesis el Dr. M. Alfonso Gutiérrez López por su ayuda, paciencia, dedicación e incluso por los conocimientos brindados que sin ellos no se habría logrado desarrollar esta investigación.*

*A mi hermana Katia por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.*

*A mis compañeros y amigos del posgrado Ana, Fernando, Edoardo y Rubén por apoyarme en todo este tiempo, compartir las mismas experiencias conmigo y brindarme su apoyo y dedicación.*

*A mis compañeros y amigos de otras generaciones Sebastián, Pablo, Josué, Olga, Iliana y Sandy, los cuales fueron importantes para este proyecto y a pesar de no estar juntos de manera académica, también estuvieron acompañando este trabajo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que forman a la Universidad Autónoma de Querétaro, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo.

De igual manera, mis agradecimientos a la toda la Facultad de Ingeniería, a mis profesores en especial al Dr. Josué de Jesús Trejo Alonso, Dr. Carlos Chávez, Dr. Eusebio Ventura y Dr. Francisco Aparicio Mijares quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

También es importante mencionar el agradecimiento al Consejo de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio para realizar esta investigación que es parte de mi tesis.

Agradezco infinitamente a la Mtra. Verónica Leyva Pica, M.C. Sebastián Fuentes Castros y M.C. Enrique Montoya Morado por haber guiado en las correcciones y adecuaciones en este documento.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. M. Alfonso Gutiérrez López, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

## ÍNDICE

CAPITULO I. ANTECEDENTES .....	1
I.1. Breve historia de la gestión legal del patrimonio cultural.....	1
I.1.1 Principales puntos de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicos, Artísticos e Históricos (LFMZAAH).....	1
I.2. Investigaciones recientes .....	3
I.2.1 Humedad Relativa .....	4
I.2.2 Humedad por capilaridad.....	4
I.2.3 Precipitación, disolución y erosión hídrica .....	6
CAPITULO II. JUSTIFICACIÓN .....	8
CAPITULO III. INTRODUCCIÓN .....	10
III.1. Significado de diagnóstico y uso para la prevención de patrimonio cultural .....	11
III.2. Planteamiento del problema.....	12
III.2.1 Ubicación del área de estudio.....	12
CAPITULO IV. HIPÓTESIS .....	15
CAPITULO V. OBJETIVOS.....	15
V.1. Objetivo General .....	15
V.2. Objetivos Específicos.....	15
CAPITULO VI. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	16
VI.1. Características métricas.....	16
VI.1.1 Curva hipsométrica .....	17
VI.2. Clima.....	19
VI.3. Hidrología.....	21
VI.4. Morfología .....	22

VI.5. Geología .....	23
VI.6. Edafología.....	24
VI.7. Uso de suelo .....	27
VI.8. Flora.....	29
VI.9. Fauna.....	30
CAPITULO VII. BREVE ANALISIS DE LLUVIAS EN LA REGION .....	31
VII.1. Estimación Precipitación anual y diaria por medio de imágenes satelitales .....	31
VII.2. Ubicación de estaciones climatológicas de CONAGUA cercanas a la zona de estudio.....	34
CAPITULO VIII. FACTORES DE RIESGO .....	37
VIII.1. Procesos Físicos.....	37
VIII.2. Procesos Químicos .....	38
VIII.3. Procesos Biológicos.....	39
CAPITULO IX. MARCO TEÓRICO.....	42
IX.1. Conceptos Básicos .....	42
IX.1.1 Humedad relativa. ....	42
IX.1.1.1. Humedad patológica.....	42
IX.1.2 Precipitación.....	43
IX.1.3 Características de Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	44
IX.1.4 Características de Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	45
IX.1.5 Características de Ozono (O <sub>3</sub> ) .....	45
IX.1.6 Características de Ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> ) .....	46
IX.2. Análisis de Serie de tiempo.....	46
IX.2.1 Técnicas de Predicción .....	47

IX.2.2 Proceso estocástico y estacionariedad .....	48
IX.3. Comunes modelos estocásticos de series de tiempo .....	50
IX.3.1 Modelos Autorregresivos (Modelos AR) .....	51
IX.3.1.1. Particularidades de los modelos AR(p) .....	53
IX.3.2 Modelos de Medias Móviles (Modelos MA) .....	54
IX.3.2.1. Particularidades del modelo MA (q) .....	56
IX.3.3 Modelos ARMA .....	58
IX.3.3.1. Particularidades del modelo ARMA(p,q) .....	59
IX.3.4 Modelo ARIMA (p,d,q) .....	60
IX.3.4.1. Modelos ARIMA estacionales .....	63
IX.3.5 Comprobación de autocorrelación.....	64
IX.3.5.1. Ecuaciones de la autocorrelación simple (ACF) .....	65
IX.3.5.2. Ecuaciones de la autocorrelación parcial (PACF).....	65
IX.4. Modelo de disolución de rocas calizas.....	66
IX.4.1 Obtención de Ácido Nítrico .....	67
IX.4.2 Valores típicos de las velocidades de deposición seca de SO <sub>2</sub> . .....	67
IX.4.3 Valores típicos de las velocidades de deposición seca de HNO <sub>3</sub> .....	68
IX.4.3.1. Valores de deposición recomendados de SO <sub>2</sub> y HNO <sub>3</sub> .....	69
CAPITULO X. METODOLOGIA.....	70
X.1. Recopilación de información .....	70
X.1.1 Recolección de estimaciones satélites .....	70
X.1.1.1. Humedad Relativa y Temperatura (AIRS) .....	70
X.1.1.2. Precipitación (GPM IMERG) .....	72
X.1.1.3. Dióxido de Azufre SO <sub>2</sub> (MERRA-2).....	75

X.1.1.4. Dióxido de Nitrógeno NO <sub>2</sub> (OMI/Aura L3) .....	76
X.1.1.5. Ozono O <sub>3</sub> (OMI/Aura L2) .....	77
X.1.2 Caracterización de rocas y suelos de la región .....	78
X.1.2.1. Interpretación visual de la roca para su caracterización .....	78
X.2. Monitoreo y evaluación experimental de materiales del inmueble arqueológico.....	82
X.2.1 Características de sensor ARDUINO. ....	82
X.2.2 Periféricos para utilizar .....	85
X.2.2.1. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22.....	85
X.2.2.2. Módulo reloj en tiempo real DS3 231 .....	86
X.2.2.3. Modulo Micro SD Card MOD-MSDC.....	87
X.2.2.4. Sensor de presión atmosférica Sensor BME280. ....	88
X.2.2.5. Sensor de dióxido de carbono MQ-135 .....	89
X.2.3 Resumen de los Sensores utilizados .....	89
X.2.4 Programación del sensor.....	92
X.2.5 Inspección higrotérmica mediante termohigrómetro (ARDDUINO) de lectura instantánea .....	94
X.3. Estimación del Modelo de Predicción .....	96
CAPITULO XI. RESULTADOS .....	99
XI.1. Calidad de datos de la estación ARDUINO.....	99
XI.1.1 Comparativa contra estación estatal de CONAGUA .....	101
XI.2. Calidad de los datos recopilados .....	103
XI.3. Pronostico en el tiempo de datos obtenidos de las series de tiempo recopilada.....	106
XI.3.1 Cálculo de coeficiente de Akaike.....	106

XI.3.2 Pronóstico de Precipitación .....	108
XI.3.3 Pronóstico de Humedad .....	110
XI.3.4 Pronóstico de Temperatura .....	113
XI.3.5 Pronóstico de Dióxido de Azufre .....	116
XI.3.6 Pronóstico de Dióxido de Nitrógeno .....	119
XI.3.7 Pronóstico de Ozono .....	122
XI.4. Cálculo de Disolución.....	125
CAPITULO XII. CONCLUSIONES .....	129
XII.1. Recomendaciones .....	130
CAPITULO XIII. REFERENCIAS .....	131
CAPITULO XIV. ANEXOS .....	141
XIV.1. Código Fuente de estación Arduino .....	141
XIV.2. Código fuente de modelos ARIMA .....	145

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Pirámide de Kohunlich (National Geographic, 2019).....	13
Figura 2.- Microcuenca de la zona de estudio. (Elaboración propia) .....	14
Figura 3.- Curva Hipsométrica. ....	19
Figura 4.- Clima de la Microcuenca de la ZA (Elaboración Propia).....	20
Figura 5.- Red de drenaje hidrológico de la subcuenca H33Ad (Elaboración propio) .....	21
Figura 6.- Red de drenaje hidrológico de la microcuenca. (Elaboración propia)....	22
Figura 7.- Geología de la Microcuenca de la ZA (Elaboración Propia) .....	23
Figura 8.- Edafología de la subcuenca 33Ad (Elaboración Propia).....	26
Figura 9.- Tipos de suelo en la zona de estudio (En orden de izquierda a derecha: Gleysol, Vertisol y Redzina) (Bautista, 2021).....	27
Figura 10.- Mapa de Uso de suelo y vegetación de la zona de estudio (INEGI, 2016).....	28
Figura 11.- Pronostico de precipitación anual para la zona de estudio (DAYMET, 2020).....	32
Figura 12.- Pulsos de precipitación para 1984.....	33
Figura 13.- Pulsos de precipitación para 2003.....	33
Figura 14.- Mapa de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la Zona Arqueológica. ....	35
Figura 15.-Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de Temperatura (AIRS)....	71
Figura 16.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de Humedad Relativa (AIRS) .....	72
Figura 17.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de precipitación acumulada (MERRA-2) .....	74
Figura 18.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de SO <sub>2</sub> (MERRA-2).....	75
Figura 19.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de NO <sub>2</sub> (OMI/Aura L2).....	77
Figura 20.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de O <sub>3</sub> (OMI/Aura L2) .....	78
Figura 21.- Diagrama de Equipo Arduino Uno con modulo bluetooth. ....	83
Figura 22.- Ejemplo de Estructura Arduino. ....	85

Figura 23.-Conexión del sensor para la propuesta de micro estación .....	91
Figura 24.- Sensores a manejar.....	91
Figura 25.- Plataforma ARDUINO IDE.....	93
Figura 26.- Monitorio serie con el arranque del prototipo.....	94
Figura 27.- Termohigrómetro típico de elaboración propia, utilizado en la inspección higrotérmica, y método de toma.....	95
Figura 28.-Mapa de pasos para la estabilidad de un modelo de series tiempo. ....	98
Figura 29.- Mediciones de las variables de la estación para fecha 7 al 28 de agosto del 2020, A) Temperatura (°C), B) Humedad Relativa (%), C) Presión Atmosférica (hPa), D) Punto de Roció (°C), E) Dióxido de carbono (PPM), F) Humedad del suelo (w) .....	100
Figura 30.- Mediciones de las variables de la estación para fecha 4 al 20 de septiembre del 200, A) Temperatura (°C), B) Humedad Relativa (%), C) Presión Atmosférica (hPa), D) Punto de Roció (°C), E) Dióxido de carbono (PPM), F) Humedad del suelo (w) .....	101
Figura 31.- Datos recopilado de Precipitación, Humedad Relativa, Temperatura, Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) y Ozono (O <sub>3</sub> ).....	104
Figura 32.- Ejemplo del calculo de las modelo y sección del mejor mediante el coeficiente de Akaike. ....	107
Figura 33.-Correlograma de ACF y PACF de precipitación con d=0 y D=1 y frecuencia de 24. ....	109
Figura 34.- ARIMAs propuestas para precipitación: A) ARIMA(0,0,3)(2,0,0)[24], B) ARIMA(3,1,2), C) ARIMA(1,0,1)(2,1,0)[24], D) ARIMA(0,1,2)(2,1,0)[24], E) ARIMA(0,2,3)(1,1,0)[24] y F) ARIMA(3,1,)(2,1,0)[24]. ....	110
Figura 35.-Correlograma de ACF y PACF de Humedad Relativa con d=0 y D=1 y frecuencia de 24. ....	111
Figura 36.- ARIMAs propuestas para Humedad relativa: ARIMA(1,0,0)(1,0,0)[24] pero sin media en residuos en cero, ARIMA(4,1,0)(1,0,0)[24], ARIMA(0,0,1)(2,1,0)[24], ARIMA(3,1,0)(2,1,0)[24], ARIMA(4,2,0)(1,1,0)[24] y ARIMA(3,1,0)(2,2,0)[24]. ....	112

Figura 37.-Correlograma de ACF y PACF de temperatura con $d=1$ y $D=1$ y frecuencia de 24. ....	114
Figura 38.- ARIMAs propuestas para Temperatura: $ARIMA(3,0,1)(1,0,0)[24]$ sin media en cero en los residuos, $ARIMA(2,1,2)(0,0,1)[24]$ , $ARIMA(1,0,1)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(0,2,3)(1,1,0)[24]$ y $ARIMA(3,1,)(2,1,0)[24]$ . ....	115
Figura 39.-Correlograma de ACF y PACF de $SO_2$ con $d=1$ y $D=1$ y frecuencia de 24.....	117
Figura 40.- ARIMAs propuestas para $SO_2$ : $ARIMA(1,0,2)(2,0,0)[24]$ , $ARIMA(1,1,2)(2,0,0)[24]$ , $ARIMA(1,0,2)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(0,1,4)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(0,2,3)(1,1,0)[24]$ y $ARIMA(3,1,)(2,1,0)[24]$ . ....	118
Figura 41.-Correlograma de ACF y PACF de $NO_2$ con $d=1$ y $D=1$ y frecuencia de 24.....	120
Figura 42.- ARIMAs propuestas para $NO_2$ : $ARIMA(1,0,2)(2,0,0)[24]$ , $ARIMA(0,1,2)(2,0,0)[24]$ , $ARIMA(1,0,1)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[24]$ , $ARIMA(4,2,0)(0,1,1)[24]$ y $ARIMA(0,1,1)(2,2,0)[24]$ . ....	121
Figura 43.-Correlograma de ACF y PACF de Ozono con $d=0$ y $D=1$ y frecuencia de 24.....	123
Figura 44.- ARIMAs propuestas para $O_3$ : $ARIMA(2,0,2)$ , $ARIMA(0,1,0)(2,0,0)[12]$ , $ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[24]$ , $ARIMA(0,1,2)(2,1,0)[12]$ , $ARIMA(3,2,0)(2,1,0)[12]$ y $ARIMA(0,1,1)(2,2,0)[12]$ .....	124
Figura 45.- Disolución anual para la ZA de Kohunlich .....	128

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características morfo-métricas .....	17
Tabla 2.- Datos de curva hipsométrica .....	18
Tabla 3.- Datos de áreas de los tipos de suelos de la zona arqueológica de Kohunlich .....	26
Tabla 4.- Uso de suelo del Área de estudio. ....	29
Tabla 5.- Datos de precipitación anual para un punto específico de estudio .....	31
Tabla 6.- Resumen de algunos efectos de los microorganismos a los materiales de las ZAs (de Turris et al., 2013).....	40
Tabla 7.- Porcentaje de aparición de las humedades según su tipo. (Broto, 2005). .....	43
Tabla 8.- Similitudes entre los modelos AR(p) y MA(q) .....	57
Tabla 9.- Velocidades típicas de deposición seca de SO <sub>2</sub> (máxima, en condiciones de luz diurna) .....	68
Tabla 10.- Niveles típicos de concentración de contaminantes del aire y tipos de fuentes .....	69
Tabla 11.- Tasa de deposición de SO <sub>2</sub> (V <sub>ds</sub> ) y HNO <sub>3</sub> (V <sub>dN</sub> ) medida en pruebas de exposición de campo (Sabbioni, 2003). ....	69
Tabla 12.- Tabla de dureza de Mohs (Tarbuck y Lutgens, 1999).....	81
Tabla 13.- características de los sensores utilizados.....	89
Tabla 14.- Estadísticos de las variables medibles. ....	99
Tabla 15.- Modelo ANOVA de comparativa de medias para las estaciones hidroemetrologicas.....	101
Tabla 16.- Datos anuales estimados por los datos imágenes satelitales.....	105
Tabla 17.- Datos estadísticos base de precipitación (mm) .....	108
Tabla 18.- Parámetros de ARIMA(1,0,1)(2,1,0)[24] .....	110
Tabla 19.- Datos estadísticos base de humedad relativa (%) .....	111
Tabla 20.- Parámetros de ARIMA(0,0,1)(2,1,0)[24] .....	113
Tabla 21.- Datos estadísticos base de temperatura (K).....	113
Tabla 22.- Parámetros de ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24] .....	116

Tabla 23.- Datos estadísticos base de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	116
Tabla 24.- Parámetros de ARIMA(0,1,4)(0,1,1)[24] .....	119
Tabla 25.- Datos estadísticos base de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....	119
Tabla 26.- Parámetros de ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[24] .....	121
Tabla 27.- Datos estadísticos base de Ozono (O <sub>3</sub> ).....	122
Tabla 28.- Parámetros de ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[12] .....	124
Tabla 29.- Datos Estimados y pronosticas de las variables (2003-2035) .....	125
Tabla 30.- Datos pronosticados con los modelos ARIMAS.....	126
Tabla 31.- Datos de disolución estimados y pronosticados para la zona arqueológica .....	126

## RESUMEN

Humedad relativa, intensidad de precipitación y gases contaminantes son los causantes de las problemáticas en una estructura arqueológica. El agua es capaz de presentarse en las obras mediante filtraciones, capilaridad, evaporación y secado que combinado con contaminantes como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) llegan a ocasionar diversos procesos de deterioro como disolución de materiales, desarrollo de microorganismos y erosión hídrica. Por lo tanto, una alternativa en cuestión de prevención es el uso de la estimación de variables con periodos de tiempo largos, mediante técnicas estadísticas estocásticas del manejo de series temporales, conocido como modelos autoregresivos (ARIMA) que son capaces de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro de los datos. Además de incluir el modelo de Lipfert que permita conocer la disolución de rocas kársticas. No obstante, para poder obtener la base de datos necesarios para las estimaciones se debe de emplear dos alternativas, la elaboración de una microestación ARDUINO con sensores DHT22, FC-28, MQ-135, BME280 con el fin de obtener los valores de temperatura, humedad relativa, humedad de suelo, dióxido de carbono, presión atmosférica, y por su parte la recopilación de datos de dependencias como la NASA cuya información es de uso libre y posee un periodo de tiempo más largo de estimación. Como resultado, se tiene que los efectos de los gases de efecto invernadero y las variaciones de las intensidades de lluvia ocasionan un proceso de disolución del  $460.2279 \mu\text{m}$  en un periodo de 15 años.

**Palabras Claves:** Zona Arqueológica, deterioro, disolución, contaminación, precipitación.

## ABSTRACT

Relative humidity, intensity of precipitation and polluting gases are the cause of the problems in an archaeological structure. Water can present itself in the works through filtrations, capillarity, evaporation and drying, which combined with pollutants such as nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) cause various processes of deterioration such as dissolution of materials, development of microorganisms and water erosion. Therefore, an alternative in terms of prevention is the use of the estimation of variables with long periods of time, through stochastic statistical techniques of time series management, known as autoregressive models (ARIMA) that can find patterns for a prediction. into the future of data. In addition to including the Lipfert model that allows knowing the dissolution of karstic rocks. However, in order to obtain the necessary database for the estimates, two alternatives must be used: the development of an ARDUINO microstation with DHT22, FC-28, MQ-135, BME280 sensors in order to obtain the temperature values, relative humidity, soil moisture, carbon dioxide, atmospheric pressure, and on the other hand the collection of data from agencies such as NASA whose information is free to use and has a longer period of time for estimation. As a result, the effects of greenhouse gases and variations in rainfall intensities cause a dissolution process of 460.2279  $\mu\text{m}$  over a period of 15 years.

**Keywords:** Archaeological Zone, deterioration, dissolution, contamination, precipitation.

## **CAPITULO I. ANTECEDENTES**

### **I.1. Breve historia de la gestión legal del patrimonio cultural.**

El general Lázaro Cárdenas, en el año de 1938, planteó una decisión con base en la ley en convertir el Departamento de Monumentos Artísticos, Arqueológicos e Históricos de la Secretaría de Educación Pública, esto fue necesario debido a que no se le estaba dando el valor a los muebles e inmuebles históricos de la nación al Congreso de la Unión, fue así como se creó en 1939, lo que hoy conocemos como el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), de las cuales sus funciones son encontrar áreas, proteger y restaurar sitios arqueológicos, realizar investigaciones científicas y publicar productos académicos. (Herrera, et al; 2017).

A pesar de la creación de la institución, no fue hasta la primera ley que le ofrecieron un ordenamiento mexicano a el Patrimonio Cultural Arqueológico, esta es la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (LFMZAAH) publicada en 28 de abril de 1972 (Herrera, et al; 2017). Este instrumento legal le da valor al nacionalismo mexicano que pretende realizar las medidas preventivas y de conservación de forma administrativa y así ser los principales conservadores de la identidad nacional, dando una calidad de defensores reglamentarios, asumen únicamente a los profesionales y a los interesados en la protección.

#### **I.1.1 Principales puntos de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (LFMZAAH)**

Es importante conocer y establecer el manejo de esta ley, puesto que desde un principio se realizarán pruebas que puede considerarse importantes para la Zona Arqueológica (ZA), por lo que el uso de estas leyes nos da el conocimiento de lo que se puede realizar o no en dichos lugares.

- **En el artículo 1º.-** Se funda que el objetivo de la ley debe para uso social y de nivel público.

- **En el artículo 2º.-** Los objetivos para la investigación arqueológica o una de sus ramas son los estudios en contexto cultural y ambiental, la protección, conservación y difusión de las sociedades existentes en el territorio nacional, y los conocimientos adquiridos sobre los monumentos y zonas arqueológicas.
- **En el artículo 3º.-** Se señala que es necesaria la responsabilidad de la correcta planeación y regulación de las rutas de investigación arqueológica a realizarse en México y puede recomendar y/o encomendar investigaciones y actividades encaminadas a promover el conocimiento, protección, conservación y difusión de la arqueología nacional.
- **En el artículo 5º.-** Se determina que puede conservarse cualquier estructura o elemento con las características arqueológicas, artísticas, históricas y monumentales exigidas por la ley, así también que pueden ser declarados los bienes como Patrimonio Arqueológico a petición de las partes.
- **En el artículo 6º.-** Los propietarios de inmuebles de tipo histórico, artístico o arqueológicos deberán conservarlos y, en su caso, obtener la autorización previa del organismo competente.

Ahora bien, la administración pública desde hace 20 años tiene en concepto como fuente de atractivos turísticos al patrimonio arqueológico, en tanto captador de divisas, es en definitiva un ente sociopolítico capaz de restringir actividades y ejercer control y sanción sobre las actividades cerca de las ZAs. (Cámara de Diputados del Congreso de la unión, 1972).

Con el fin de mejorar la calidad de los inmuebles es recomendable buscar alternativas que se tenga un propósito de previsión de estas ZAs con el uso de técnicas de análisis de desgaste o disolución, así como la comprensión de los fenómenos hidrológicos, mediante uso de herramientas modernas que permitan

no alterar o afectar al patrimonio y así cumplir con las leyes propuestas por el gobierno mexicano.

## **I.2. Investigaciones recientes**

La humedad y precipitación existen antes del surgimiento de la vida en el planeta y tienden a ser de gran importancia para los procesos hidrometeorológicos de una cuenca (Science & Board, 1991). A pesar de ello, estas condiciones de la atmósfera generan complicaciones en estructuras hechas por el ser humano, dándole importancia a realizar medidas necesarias para evitarlo (Niroumand et al., 2016).

Por ende, el Patrimonio Cultural (PC) está involucrado por este tipo de deterioros. En los últimos seis años, específicamente en Europa, el sector del PC toma conciencia de los problemas potenciales relacionados con los impactos del cambio climático en los materiales que constituyen el PC. En efecto, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) menciona por primera vez el tema del “Patrimonio Cultural” en su quinto Informe de Evaluación, así como también se aborda en otra presentación, la protección de este frente a desastres naturales y el cambio climático (European Commission Staff, 2016; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Sin embargo, en países latinoamericanos y más específico en el sur de México, no se tienen una base sólida que permita un análisis riguroso con el fin de conocer las características de deterioro en el PC. Además, una de las dificultades actuales en los estudios es la falta de información y bancos de datos por lo que es probable que sean uno de los principales problemas a resolver en las próximas décadas en el país (Harrigan et al., 2020).

La Coordinación Nacional de Conservación de Patrimonio Cultural (CNCPC) del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) identifican problemáticas asociadas a fenómenos hidrológicos en algunos de los sitios arqueológicos del sur del país entre los que se encuentran: Tulum, XelHa, Muyil, Tancah, Dzibanché,

Kohunlich, El Meco, Cobá, San Cervasio (Quintana Roo), Ek'Balam (Yucatán), Calakmul, Becán, Chicanná y Balamkú (Campeche).

Cuando estos sitios fueron abandonados por los diversos grupos culturales, las construcciones de roca kárstica estaban cubiertas de tierra y vegetación por muchos años hasta ser encontradas (Ramírez-Vázquez, 2017). Por lo que, por su antigüedad, el abandono que sufrieron por siglos, el deterioro generado por sus contextos naturales y sumado a las intervenciones de conservación a las que son sometidos, sufrieron una serie de modificaciones que inciden directamente en el funcionamiento original.

### **I.2.1 Humedad Relativa**

En los últimos años, se tiene un interés progresivo en el estudio de la humedad relativa (HR), puesto que es la principal variable para la creación de hongos, los cuales ocasionan desgaste en las estructuras y a su vez, a las pinturas rupestres y tallados de roca en ZAs. Estos fenómenos se presentan con mayor intensidad en temporadas de calor como se demuestra mediante un análisis del comportamiento de la humedad en el ambiente en múltiples periodos de tiempo y su respectivo daño en la ciudad de Mérida, Yucatán (Ponce-Caballero et al., 2013). Aunque, se lleva a cabo por más de 70 años la búsqueda de materiales basados en sales, cales, silicios, entre muchos otros, que permitan reducir este fenómeno, aún no se tiene una solución óptima (Stokes & Robinson, 1949). Para estudio adicional, en el corto periodo de tiempo se presentan investigaciones que se tiene en cuestión el desarrollo de materiales con base en marcos metálicos y orgánicos (Qin et al., 2020) y de diatomita (Hu et al., 2017; Yang et al., 2018; Zheng et al., 2017) con el fin de tener una vigilancia de la humedad en el interior de las estructuras, donde se logra reducir este fenómeno sin alterar el confort térmico y el uso estructural.

### **I.2.2 Humedad por capilaridad**

Las investigaciones demuestran que otro problema presente en monumentos históricos es la capilaridad y un útil ejemplo es el estudio por parte del físico de la

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Arturo Menchaca, quien puntea la existencia de un proceso de degradación en la Pirámide del Sol debido a distintos niveles de humedad por capilaridad que afectan los montículos de tierra con los que está constituida la edificación (Zavala, 2019). De forma semejante, De la Peña González (2014) plasma un estudio en la plaza histórico de la capital Santiago de Cuba del municipio de mismo nombre, ubicado en el país de Cuba. En el que se determina la atribución de las variables ambientales, la cuales tienen relación al daño capilar en las edificaciones a través de herramientas que permiten la investigación y el monitoreo, tomando como ejemplo las casas coloniales. Como consecuencia se comprueba que la profundidad del manto freático es concluyente en la manifestación siempre y cuando se encuentre a tres metros de profundidad. Por otro lado, Loayza Briceño & Zavaleta Caballero (2017) interpretan el presente riesgo de deterioro por el efecto capilar de sales en la provincia de Trujillo de Perú, con la evaluación de la vulnerabilidad y reducción de resistencia a cual están expuestas las edificaciones usando la Ley de Jurin (Koshkin N. I., et al., 1975).

Lo previo implica que se debe de buscar maneras de reducir este fenómeno, llegando a existir múltiples estudios que determinen ecuaciones para coeficientes de adsorción en piedras y morteros, capaces de poder reflejar, de forma física y numérica, el comportamiento del agua (Cardoso et al., 2016). Además, están presentes las modelaciones de cesión de calor en el secado de materiales sólidos porosos (Enrique & Leonel, 2016), y técnicas constructivas como cámaras de aireación utilizados en edificios coloniales de la Ciudad de Madrid de España para el control de la capilaridad (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2017).

Como se menciona en la guía para control de humedad de la Environmental Protection Agency (EPA) del 2016, los daños en la edificación causados por la humedad relativa y capilar pueden ser extremadamente caros y más si son inmuebles del PC. Puesto que no cualquier método de solución es útil en este tipo de estructuras, por lo tanto; la recomendación es realizar un pronóstico-prevención a esta manifestación (U.S Environmental Protection Agency, 2016).

### **I.2.3 Precipitación, disolución y erosión hídrica**

La precipitación y la contaminación son también factores intensamente relacionados con en el estudio de deterioro de estructuras arqueológicas, se demuestra que la urbanización permite el desarrollo en la atmosfera de gases como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) de los cuales al reaccionar con la humedad y precipitar pueden causar un desgaste en calizas (Allen et al., 2000; Lewry et al., 1994). Para poder cuantificar el efecto de estos contaminantes se plantea el uso de pronósticos que interpretan la disolución por medio de la integración de estos, el modelo matemático más conocido y utilizado es la ecuación de Lipfert, la cual tiende a cuantificar la disolución de la roca por los fenómenos atmosférico (Lipfert, 1989<sup>a</sup>, 1989b; Saba et al., 2018). Ciudades como el Cairo y Londres, empezaron a monitorear este tipo de contaminantes con el fin de tener los pronósticos necesarios para considerar la prevención de deterioro de los edificios y construcciones históricas de cada región. Se indica entre sus resultados que la disolución de las rocas calizas es un hecho innegable en el proceso de deterioro. Además, el aumento de los gases contaminantes del medio ambiente en las grandes ciudades complicará el fenómeno en un corto periodo de tiempo (Basu et al., 2020; El-Metwally & Bakr Ramadan, 2004). Un caso en la región de estudio es la intervención y monitoreo en la Ciudad de México, donde se implementa la cartografiar de zonas de la húmeda, la precipitación y los contaminantes del aire urbano como  $\text{SO}_2$  y  $\text{HNO}_3$ , los cuales están generando una disolución en el patrimonio cultural presente (Castillo-Miranda et al., 2017).

Otro tipo de deterioro que afecta a estructuras arqueológicas formadas de barro es la erosión hídrica y evidencia de ello es la evaluación realizada en Kibbutz Gvulot, en el sur de Israel en los edificios de adobe en un ambiente árido (Niroumand et al., 2016) y el diagnóstico realizado por Luo et al. en (2019) en los monumentos de Fujian Tulou en China, donde se obtiene la pérdida anual del 8% de capa superficial en milímetros. Cada uno de estos estudios obtienen sus resultados mediante el modelo de Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (K. G.

Renard & Ferreira, 1993; Kenneth G Renard et al., 1991) en el que interviene factores de lluvia, erosión, viento y cobertura del área de afectación. A pesar de ser un modelo sencillo, una de las características fundamentales es la cantidad de datos del sitio a estudiar. Lobo & Bonilla (2018) presentan una ecuación estadística para calcular la agresividad de la lluvia basada en eventos bajo patrones cambiantes de precipitación utilizando la menor cantidad de información posible.

Hasta la fecha se ha desarrollado varios métodos para cuantificar el daño generado en ZAs y unas de ellas son las imágenes satélites y fotogrametría, de manera que son técnicas innovadoras y económicas que da prestaciones útiles en el análisis de daños a futuro por advenimientos de humedad y precipitación en las ruinas (Orihuela, 2019). Además, otras de las herramientas para poder pronosticar son los estimadores de variables como los modelos estadísticos autorregresivos y de media móvil (ARIMA) (Arumugam & Saranya, 2018; Karimi, 2019; Renderos & Molina, 2008).

Pese lo presentado con anterioridad, no se tiene realizada una metodología formal para las ZAs del sureste de México, que permita establecer un pronóstico que manera física y química el deterioro de estas obras por fenómenos hidrológicos de precipitación y humedad en conjunto con la contaminación. Por lo que es objetivo del presente trabajo, el desarrollar un pronóstico-prevención de disolución y erosión de rocas en la ZA de Kohulich usando herramientas estadísticas ARIMA. y los modelos matemáticos de Lipfert. Además, para solucionar la escasez de información, se planea la programación y uso de sensores de bajo costo para la recopilación de datos de humedad, temperatura, gases de efecto invernadero requeridos en la investigación, al igual que el uso de los modelos estimadores de imágenes satelitales de dominio público.

## **CAPITULO II. JUSTIFICACIÓN**

El agua tiene un papel fundamental en cualquiera de sus manifestaciones, estado material y cantidad. Lluvia, humedad relativa, mantos freáticos, agua contenida en suelos, cuerpos de agua naturales y/o artificiales, entre otros diversos factores puede presentar problemáticas en una estructura arquitectónica de carácter arqueológico y por lo tanto en sus acabados. Las filtraciones, la capilaridad, el impacto directo de la lluvia, la evaporación y el secado son los mecanismos a través de los cuales incide en el patrimonio, llegando a ocasionar diversos procesos de deterioro tales como disolución de materiales, desarrollo de microorganismos y erosión hídrica, por mencionar sólo algunos, los cuales pueden llevar a la pérdida parcial o total de elementos como relieves en piedra en fachadas, pintura mural con soportes de tierra o cal.

Si lo consideramos de una manera económica, la situación es reflejada en cuidado y mantenimiento, y esto implica a elevados costos. Por lo que, decir consérvalos sitia que sean de una responsabilidad común, pues se puede establecer que dichos bienes están comprometidos al goce del interés colectivo y de la fuerza simbólica del imaginario social y la memoria histórica.

Existe la complejidad de la investigación debido a la aplicación de procedimiento y metodologías que dan como resultado una evaluación del peligro de deterioro en las ZAs debido a las condiciones de las regiones de estudios, las cuales son propensas a tener efecto de capitación de sales por el manto freático elevado y lluvias prácticamente todo el año, lo que ocasiona los fenómenos de erosión y disolución.

La investigación se respalda socialmente porque facilitará una opción más adecuada para afrontar el problema del deterioro de las ZA, ocasionado por la disolución del material kárstico por medio de contaminantes y se propondrán alternativas de medición estimadas del daño presente en la estructura que sean menos agresivas con la zona y de esta manera contribuir al cuidado y tiempo de vida a la estructura de forma que más personas puedan disfrutar del patrimonial.

Actualmente, desde la CNCPC-INAH, algunos de los sitios que se intervienen en los que se han identificados problemáticas asociadas a fenómenos hidrológicos son: Tulum, XelHa, Muyil, Tancah, Dzibanché, Kohunlich, El Meco, Cobá, San Cervasio (Quintana Roo), Ek'Balam (Yucatán), Calakmul, Becán, Chicanná, Balamkú (Campeche).

No obstante, con el fin de poder realizar las pruebas de forma completa y óptima, es necesario delimitar el estudio en la ZA de Kohunlich y tomando únicamente las variables de disolución por efectos de la precipitación y contaminantes de efecto invernadero dado que eso puede ser proporcionados por dependencia que poseen recopilaciones de registro de distintos datos para el estudio.

### **CAPITULO III. INTRODUCCIÓN**

En la presente tesis, el cual se expone como requisito para obtener el grado en Maestro en Ciencias en la rama de Hidrología Ambiental, Se toma un área de estudio de la disciplina que abarca el comportamiento de la atmosfera en el deterioro de patrimonio cultural de la nación. A través del documento se tiende a buscar formas de conocer y establecer alternativas que permitan el diagnóstico y prevención de deterior del patrimonio cultural inmueble del país.

Se puede mencionar que las ZAs fueron durante un periodo de 1200 a.C. a 1600 d.C., los lugares de concentración de muchos de nuestros antepasados, por lo que en la actualidad nos identifica como nación y cultura.

La república mexicana tiene bajo su territorio un total de 193 ZAs y una paleontológico, de los cuales posee a su prevención por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) junto con la Coordinación Nacional de Conservación de Patrimonio Cultural (CHCPC), (INAH, 2016). Además, La mayoría de estos se encuentra abierto al público.

Cuando estos sitios fueron abandonados por los diversos grupos indígenas debido a múltiples factores, las majestuosas construcciones de roca que actualmente podemos apreciar estaban cubiertas por tierra y vegetación y por lo consecuente pudieron sobrevivir hasta nuestros días (Ramírez-Vázquez, 2017).

No obstante, por su gran atractivo turístico, las ZAs, como se comentó con anterioridad, suelen ser de uso público y están expuesta por completo a la intemperie debido a su manipulación y muestra. Es así como, por su antigüedad, el abandono que sufrieron por siglos, el deterioro generado por sus contextos naturales, sumado a las intervenciones arqueológicas y de conservación a las que son sometidos desde su descubrimiento, han sufrido una serie de modificaciones que inciden directamente en el funcionamiento original del diseño.

El agua desplegada en la atmosfera en forma de humedad y precipitación puede ser perjudicial en las estructuras de la ZA; por lo consiguiente se puede definir el

resultado del fenómeno de humedad por absorción capilar o también conocido como humedad por capilaridad, la cual se considerada como una amenaza constante para el área, hasta llegar al punto de causar, en la mayoría de los casos, su deterioro y pérdida del patrimonio.

En la actualidad, la Industria Mexicana demanda una mayor cantidad de energía para su funcionamiento, aprovechando los combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo; que, al quemarse, generan compuestos como CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>2</sub>, los cuales una vez liberados a la atmósfera, se convierten en precursores de fenómenos como el efecto invernadero y la lluvia ácida. Los mayores contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida son los SO<sub>2</sub>, y NO<sub>2</sub>.

Con lo anterior mencionado, un aspecto que se debe de considerar es la buena calidad de los combustibles presentes en las circunstancias modernas. Debido a que estos puedan ocasionar en el momento de su combustión que las emisiones de gases como los ascendentes de fenómenos como el efecto invernadero y las lluvias ácidas a la atmósfera, se reduzcan de manera considerable. Sin embargo, esto es un proceso de largo plazo y muy probablemente se tenga un cambio significativo dentro de un periodo de 50 años.

Además, la precipitación presentada en forma de lluvia, puede ocasionar fenómenos de erosión y disolución en los materiales constructivos dando pauta a buscar alternativas de diagnóstico que analicen este proceso y a su vez el daño, por lo que como resultado se tendrá ZAs más longevas y por lo tanto más gente podrá disfrutar y apreciar de estas.

### **III.1. Significado de diagnóstico y uso para la prevención de patrimonio cultural**

Podemos establecer que un diagnóstico, se refiere a un conjunto de métodos de múltiples resultados que buscan las causas que generan un determinado daño. Incluso se puede comentar que algunos artículos lo comparan con casos policiales

y criminales (García Mendoza, D. B., 2018; Huitron, A. G., 2022; Mataoui, N. M., 2019).

Si se piensa desde la perspectiva de una estructura arqueológica, cada uno de estos edificios se considera un caso especial, y la clasificación general se considera un área donde la civilización indígena se convirtió en una sociedad próspera. Sin embargo, estos núcleos de urbanización difieren en cuanto a sistemas constructivos y condiciones internas y externas, usos, etc. Además, la causa de la lluvia y el factor de humedad no son correctos en todos los casos. Por esta razón, el término se aplica a las estructuras arqueológicas solo por analogía.

La importancia del diagnóstico en las construcciones del patrimonio cultural surge de la necesidad de comprender los factores que componen el valor de una determinada solución utilizada en un momento dado, a partir de intervenciones adecuadas.

Para que el diagnóstico sea factible se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Cierta comprensión de la causa subyacente (es decir, patología conocida) de ciertos síntomas.

2. Los síntomas en las estructuras pueden detectarse con la fiabilidad. No es necesario identificar todos los síntomas, basta con aquellos que permitan la identificación inequívoca de la patología.

Es posible establecer unas soluciones a estos fenómenos teniendo información de los pasos a seguir que mejoren las condiciones de estas, de tal manera que se pueda tener resultados óptimos y poder salvaguardar el patrimonio.

## **III.2. Planteamiento del problema**

### **III.2.1 Ubicación del área de estudio**

Como se mencione en el anterior apartado, el sitio de estudio propuesta es la ZA de Kohunlich, este se encuentra ubicado en la entidad federativa de Quintana Roo, considerando al municipio de Othón P. Blanco y poco más de 52 km de la

capital del estado Chetumal, y es selecta con respecto a otras dieciocho zonas, debido a que se encuentra en un área cuyo clima es tropical subhúmedo con lluvias todo el año.

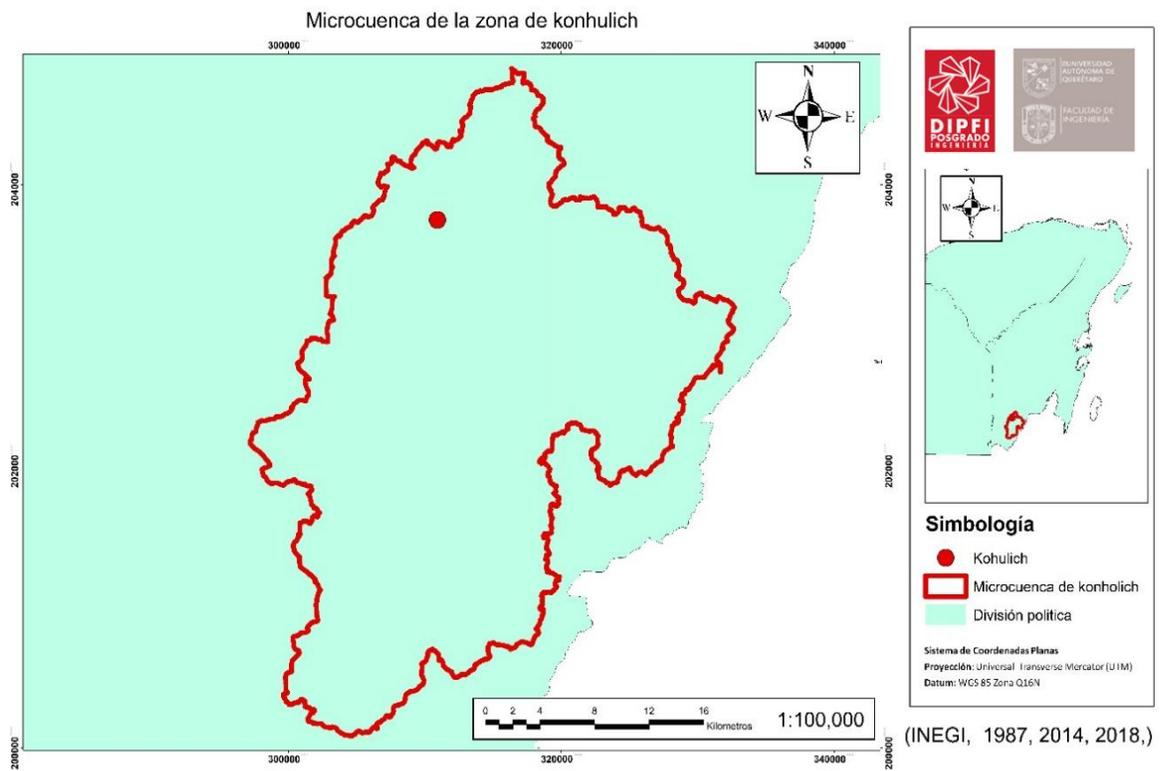
Además, al estar a una elevación topográfica de 20 msnm, se tiene presencia de manto freático somero. Por lo tanto, posee las características necesarias para realizar el estudio correspondiente de humedad y disolución.



**Figura 1.- Pirámide de Kohunlich (National Geographic, 2019)**

La ZA está ubicado en distribución, según la proyección geográfica de UTM, en la región Q16N con coordenadas geográficas 310934.00 Este y 2037496.00 Norte.

Para llegar a la ZA de Kohunlich se toma la carretera federal con clasificación 186 (Chetumal-Escárcega) hasta llegar al pueblo de Francisco Villa, luego se desvía por 9 kilómetros hasta la ZA.



**Figura 2.- Microcuenca de la zona de estudio. (Elaboración propia)**

## **CAPITULO IV. HIPÓTESIS**

Se obtiene un pronóstico del deterioro de la zona arqueológica de Kohunlich en cuestión de humedad, precipitación y gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NHO}_3$ ) que ocasionan el fenómeno de disolución, con el fin de generar medidas destinadas para la conservación del recinto.

## **CAPITULO V. OBJETIVOS**

### **V.1. Objetivo General**

Obtener un diagnóstico estimado y pronosticado de disolución que permita, de manera física y química, comprender el comportamiento de los procesos hidrológicos con el fin de cuantificar el deterioro de los inmuebles establecidos en la zona arqueológica.

### **V.2. Objetivos Específicos**

- Recopilar informaciones útiles para el proceso de estudio de región de dominio público.
- Realizar la caracterización de la cuenca de la zona de estudio y su comportamiento hidrológico.
- Obtener informaciones geoespaciales de las variables meteorológicas para los fenómenos de estudios.
- Programación de estación hidrometeorológica con el fin de evaluar la confiabilidad de los datos geoespaciales.
- Estimar mediante modelos ARIMAS la estimación a futuro de las variables hidrometeorológicas.
- Calcular los factores de disolución por medio de la teoría de Lipfert (1989) para los valores del registro histórico y estimados para la serie de tiempo.

## **CAPITULO VI. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En este capítulo del documento se explicará la zona a trabajar con los procesos hidrológicos previamente indicados.

se verán reflejadas las características de la microcuenca donde se encuentra ubicada la ZA Kohunlich, junto con sus propiedades Climatología, Hidrología, Edafología, Geología, Usos de suelo, variables ambientales como la fauna y flora de la locación.

Esto es con el afán que de que el lector tenga las bases para la comprensión de la zona de estudio, así como de la caracterización necesaria para entablar la teoría y la metodología planteada.

### **VI.1. Características métricas**

La microcuenca de la ZA de Kohunlich posee una superficie de 86144 hectáreas, un contorno de 196.77 Kilómetros, si se considera el factor de Gravelious ( $K_c$ ) se tiene una estructura muy ensanchada, con un rango de elevación que se encuentra entre los tres hasta los doscientos cuarenta metros sobre el nivel de mar y un ancho de 29.31 kilómetros, además de un largo de 48.90 kilómetros. Es importante aclarar que es un sitio donde se practica un sistema de proceso agrícola de caña de azúcar predominando en las costas de la bahía de Chetumal. Además, la mayoría de la cuenca tiene a poseer regiones de selva tropical subhúmeda.

El factor forma ( $K_f$ ) es de 0.36, debido a que es menor a 1, se puede entender que la microcuenca es muy larga y el río principal es corto, por lo que el escurrimiento superficial tiende a concentrarse, se reducción la sedimentación y el deterioro del ambiente hídrico e inundaciones son relativamente bajas.

El coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) para el área de la microcuenca es de 1.87, lo que muestra poca tendencia a concentrar grandes escurrimientos. Cuando el factor es 1, es una cuenca circular imaginaria. Cuanto más cerca este a uno este

valor al coeficiente, mayor será la tendencia de una gran cantidad de flujo de salida a concentrarse.

**Tabla 1.- Características morfo-métricas**

<b>Parámetro</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
<b>Área de la cuenca (A)</b>	86144	Ha
<b>Medida con respecto a otras cuencas</b>	Intermedio-Grande	
<b>Coeficiente de Gravelius (Kc)</b>	1.87	
<b>Coeficiente de circularidad (Cc)</b>	0.28	
<b>Coeficiente de Forma (Kf)</b>	0.36	
<b>Forma</b>	Muy alargada	
<b>Perímetro de la Cuenca (P)</b>	196.77	Km
<b>Largo de la Cuenca (L)</b>	48.90	Km
<b>Ancho de la cuenca (w)</b>	29.31	Km
<b>Longitud del Cauce Principal (Lp)</b>	16.18	Km
<b>Densidad de Drenaje</b>	Baja	
<b>Rango de elevación</b>	3-235	msnm
<b>Cota Inicial Cauce Principal</b>	235	msnm
<b>Cota Final Cauce Principal</b>	3	msnm
<b>Longitud del Cauce (Lt)</b>	379.36	Km
<b>Pendiente Media (Pm)</b>	4.47	%
<b>Número de Corrientes</b>	1256	U
<b>Precipitación</b>	1327.4	mm/año
<b>Temperatura</b>	18-33	°C
<b>Tiempo de concentración (Tc)</b>	2.96	Horas

### **VI.1.1 Curva hipsométrica**

La curva hipsométrica para la microcuenca de ZA de Kohunlich, posee una variabilidad en la elevación que va oscilando entre la orilla del mar como el punto más bajo hipsométricamente y los 235 metros sobre el nivel de mar (msnm) a la zona más alta.

La curva es considerada con concavidad, y se determina que es una cuenca micro sedimentaria de etapa final. Estas características sugieren que en esta microcuenca se ha reducido su capacidad de erosión.

Del gráfico podemos ver que el área de captación tiene su mayor porcentaje de concentración por debajo de la elevación media, que ronda los 33.5 metros sobre el nivel del mar.

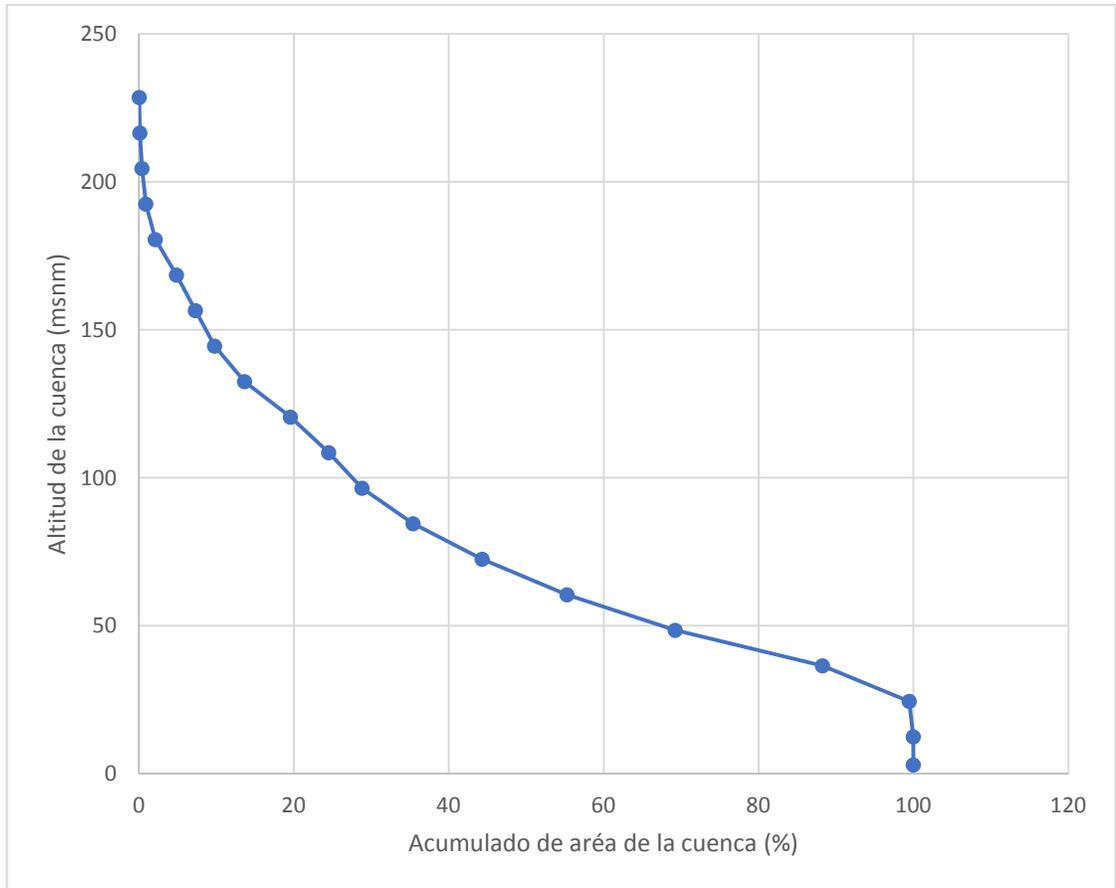
Como se muestra en la Figura 3, la pendiente empinada en la parte superior indica un peligro de inundaciones. Sin embargo, este tipo de zonas inundables representan un área muy pequeña (menos de diez por ciento de la superficie de la microcuenca), lo que da a entender que la cantidad de agua que se puede concentrar en esta área es pequeña y no representa un riesgo significativo para la zona de estudio. La lluvia normal en la parte baja de la cuenca de la microcuenca.

En la región central tenemos una evolución constante del gradiente hipsométrico, lo que muestra que la brecha no cambia significativamente y se mantiene constante hasta alcanzar a la parte inferior de la microcuenca.

**Tabla 2.- Datos de curva hipsométrica**

NUMERO	MIN	MAX	PROMEDIO	AREA ENTRE CURVAS	ACUMULADO	% ACUMULADO
1	0	6	3	0.019940129	861.44	100
2	7	18	12.5	4.505309925	861.42	100
3	19	30	24.5	96.52622457	856.91	99
4	31	42	36.5	163.8392322	760.39	88
5	43	54	48.5	120.3681272	596.55	69
6	55	66	60.5	94.36179309	476.18	55
7	67	78	72.5	76.88171923	381.82	44
8	79	90	84.5	56.80270455	304.94	35
9	91	102	96.5	37.09466902	248.13	29
10	103	114	108.5	42.57750901	211.04	24
11	115	126	120.5	50.99664897	168.46	20
12	127	138	132.5	33.3197243	117.46	14
13	139	150	144.5	21.35100944	84.14	10
14	151	162	156.5	21.05028447	62.79	7
15	163	174	168.5	23.64644294	41.74	5
16	175	186	180.5	10.49407273	18.10	2

<b>17</b>	187	198	192.5	4.276925886	7.60	1
<b>18</b>	199	210	204.5	2.290564395	3.33	0
<b>19</b>	211	222	216.5	0.727814722	1.03	0
<b>20</b>	223	234	228.5	0.306753385	0.306753385	0

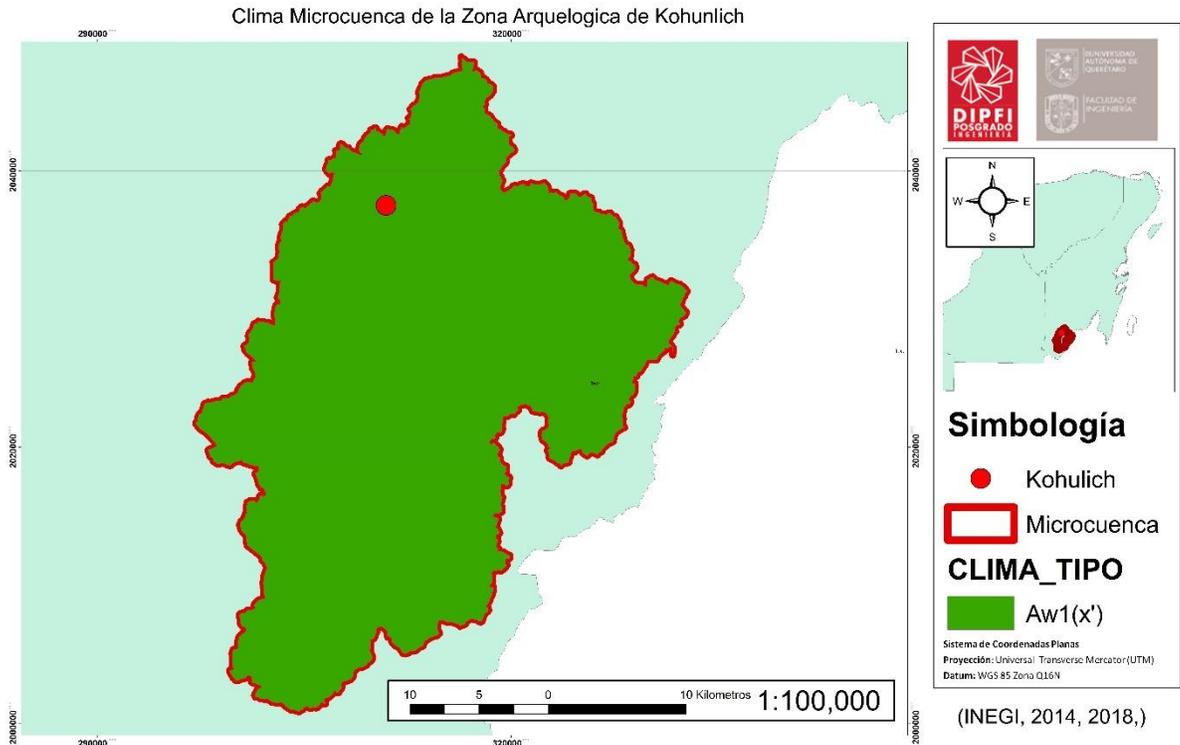


**Figura 3.- Curva Hipsométrica.**

## **VI.2. Clima**

La subcuenca hidrológica HR33Ad así como la microcuenca, donde se encuentra la ZA de Kohunlich, tiene como principal y único tipo de clima conocido como Cálido subhúmedo, cuya temperatura media anual ronda los 33° C y los días más fríos no reduce a menos de 18 ° C, como se ve en la Figura 4 con la nomenclatura

de Aw1(x'), Al ser un clima tropical tiene tendencias a presentar altos niveles de saturación de humedad.



**Figura 4.- Clima de la Microcuenca de la ZA (Elaboración Propia)**

Hay que tener en cuenta que la temporada de lluvias inicia en mayo y concluye en noviembre, llegando a tener una precipitación pluvial media anual de 1327.4 mm. Esta zona es afectada por los ciclones tropicales, que aumentan la acumulación de precipitación pluvial sobre todo en el verano. Dichos fenómenos generan un peligro en la zona debido a la fuerza del viento y caída de las gotas de lluvia que puede ocasionar erosión a los centros de inmuebles cultural de la región, en nuestro caso la ZA de Kohulich, combinado con los procesos de disolución por las lluvias que poseen concentraciones de contaminantes como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NHO}_3$  emitidos por procesos naturales (Incendios forestales) o antropogénicos (quema de combustibles y la emisión de gases de fábricas cercanas).

### VI.3. Hidrología

Además, es importante aclarar que la ZA se encuentra en la península de Yucatán y debido a ello, la red de drenaje RH33Ad presenta únicamente dos cuerpos fluviales de toda la región RH33, los cuales son considerados como Río Hondo (divisor de la República Mexicana con el país de Belice), y río escondido, el cual es intermitente y solo se presenta en temporadas de lluvia (Figura 5).

La mayoría de las redes de drenaje presentes en la Figura 5 no son visibles en la zona y se consideran redes de drenaje intermitentes dado que solo se presentan en temporada de lluvias de la región.

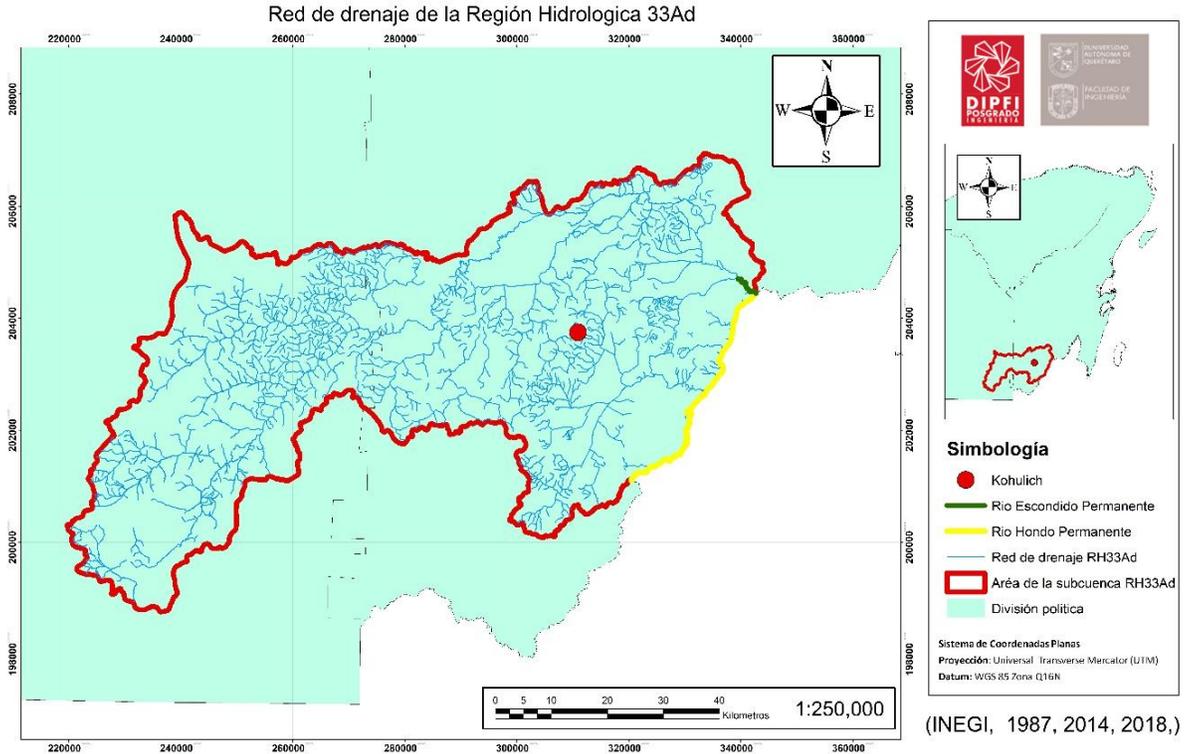


Figura 5.- Red de drenaje hidrológico de la subcuenca H33Ad (Elaboración propio)

## VI.4. Morfología

La morfología tanto de la subcuenta RH33Ad como de la microcuenca interna, se consideran de tipo exorreica, debido a que los ríos previamente mencionados tienen una sola salida, cabe destacar que ser una superficie plana, es complicada tener una interpretación exacta de la red debido al cambio repentino del drenaje presente en la región. Sin embargo, de manera representativa se puede obtener los resultados del drenaje mostrados en la Figura 6. La microcuenca donde se encuentra localizada la ZA, tiene una superficie total de 86143 hectáreas, y con orden de escurrimiento de valor seis según la clasificación de Strahler.

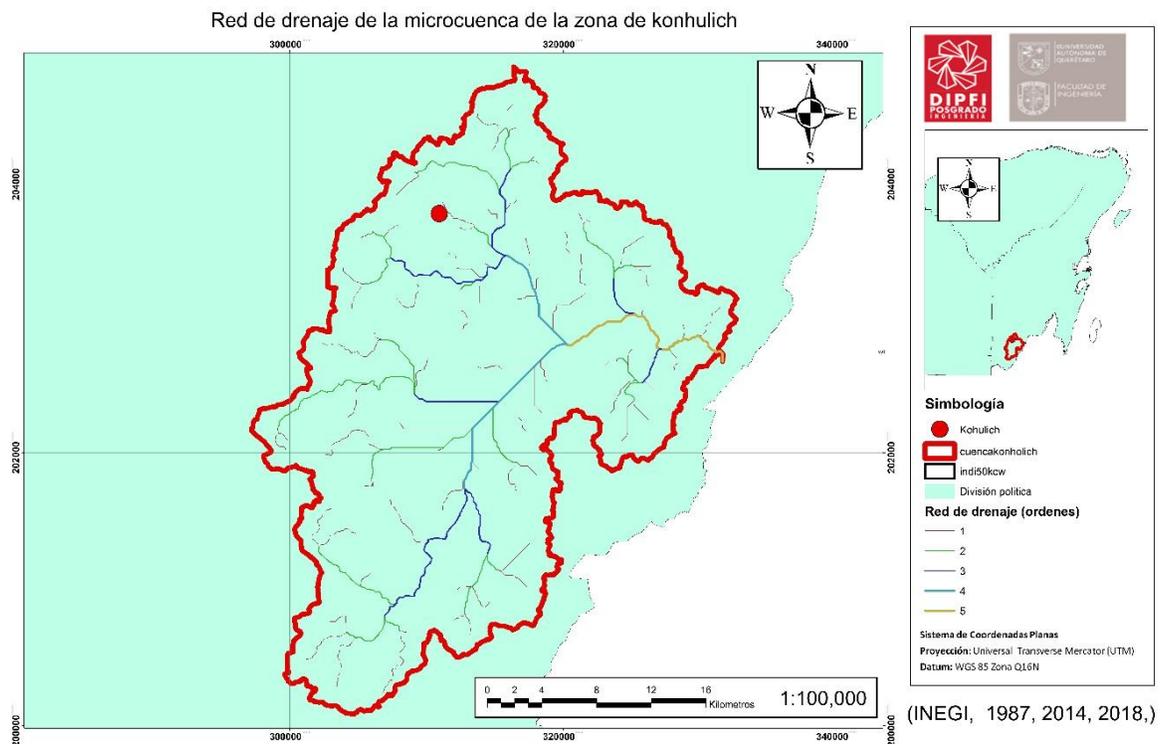


Figura 6.- Red de drenaje hidrológico de la microcuenca. (Elaboración propia)

## VI.5. Geología

El desarrollo terrestre de la Península de Yucatán se formó en el Terciario Superior, con el surgimiento de cadenas carbonatadas, las cuales sufrieron una intensa disolución para formar un relieve rocoso caracterizado por la presencia de cuevas rocosas, cenotes y pasadizos subterráneos (G. García & Graniel, 2010).

Con posterioridad, la cuenca sufrió muchos cambios durante el Cuaternario, en principio en la generación de expansiones lagunares y pantanosas y la petrificación y acumulación de sedimentos ocasionados por fenómenos eólicos (de viento), y más recientemente la construcción de sedimentos costeros. Por lo tanto, se define por el pedestal metamórfico del Paleozoico, sobre el cual se desarrollaron una serie de sedimentos con un espesor de más de 3000 m desde el Jurásico hasta la época moderna (G. García & Graniel, 2010).

La mayor parte de las rocas corresponden a unidades litológicas calizas, y la parte inferior está expuesta como un cuerpo de coquinífero, poco compacto y cubierto por esquistos estratificados.

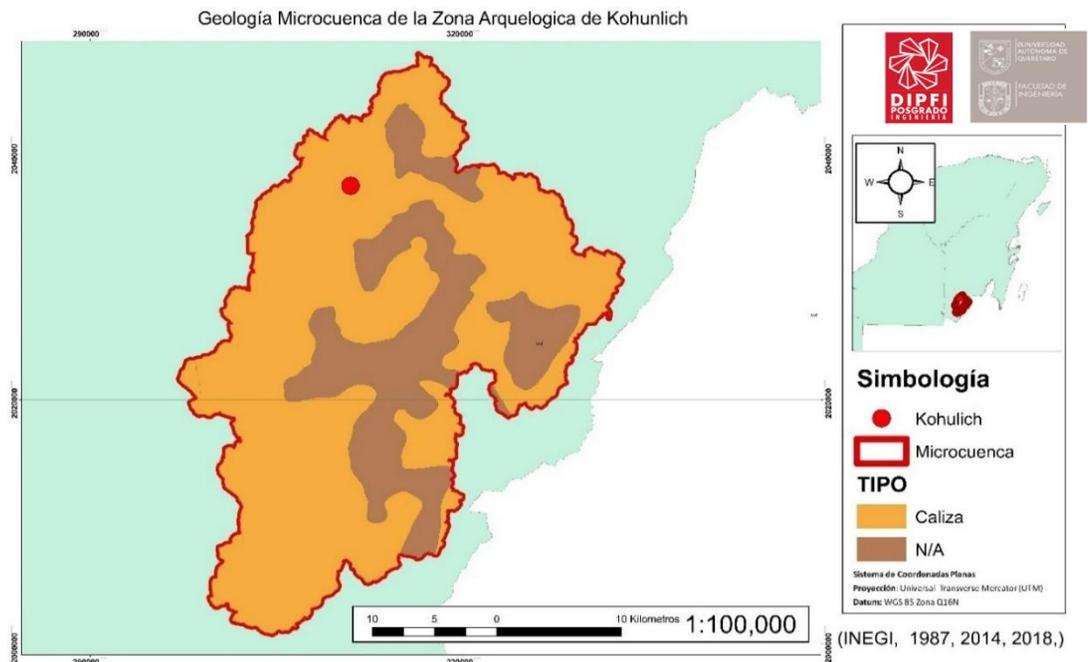


Figura 7.- Geología de la Microcuenca de la ZA (Elaboración Propia)

Según el Plan de desarrollo Urbano (PDU) del Municipio de Othón P. Blanco, la capa horizontal observada está formada por calizas de varios centímetros de profundidad. Estos suelen estar intercalados de rocas con mayor contenido de arcilla. De todos los materiales sedimentarios de calcita contenidos en estas piedras, algunas presentan grietas y orificios de diversos tamaños, en los que se han encontrado lajas muy finas de óxido de hierro y siderita; además, existen algunas impurezas de sedimento y material arcilloso de color marrón claro. El aspecto de la meseta en la que se encuentra la comuna corresponde al período Triásico-Jurásico. La microtopografía varía de 1 m a 2 m sobre el nivel del mar, comenzando con elevaciones leves desde la periferia exterior del terreno hasta el centro, donde se observan elevaciones de 2m.

#### **VI.6. Edafología**

En la cuenca del sitio arqueológico de Kohunlich existen varios tipos de suelo, pero predominan esencialmente los Vertisoles Rendzinas y Pélicos. Los suelos de Rendzina se califican como Tzekel en la lengua maya.

El Tzekel, un suelo presente en la Bahía de Chetumal está formado por material de bosques enterrados con una capa de soporte, según el mapa de suelos del INEGI a escala 1:250.000. En la zona de estudio, los suelos poco profundos generalmente consisten en capas muy delgadas, con un promedio de entre 25 y 50 cm de profundidad, formadas sobre piedra caliza que continúa elevándose sobre la superficie (Bautista, 2021). El drenaje de estos suelos se caracteriza por ser deficiente, también se definen por una acumulación de agua durante la época de lluvias, textura fina, alto contenido de cuerpos orgánicos y una estructura compuesta por bloques rectangulares de tamaño mediano, a veces con grietas de inclusión a través de las cuales puede pasar el material superficial.

En segundo lugar, sin embargo, encontramos que el material Vertisol Pélico se caracteriza por numerosas grietas en la textura. Así, la palabra vertisol procede del

latín "vértebra", que simboliza agitar, en alusión a los efectos de impacto y mezcla provocados por la presencia de arcilla expandible.

Los metales base consisten en depósitos con los productos de meteorización de las rocas que los componen o de una gran cantidad de arcillas esmécticas .

Los vertisoles se tornan muy flexibles en la estación lluviosa y muy rígidas en la estación seca. La agricultura es muy difícil, excepto por la breve transición entre temporadas (Bautista, 2021). Con un manejo adecuado, estos son suelos muy productivos.

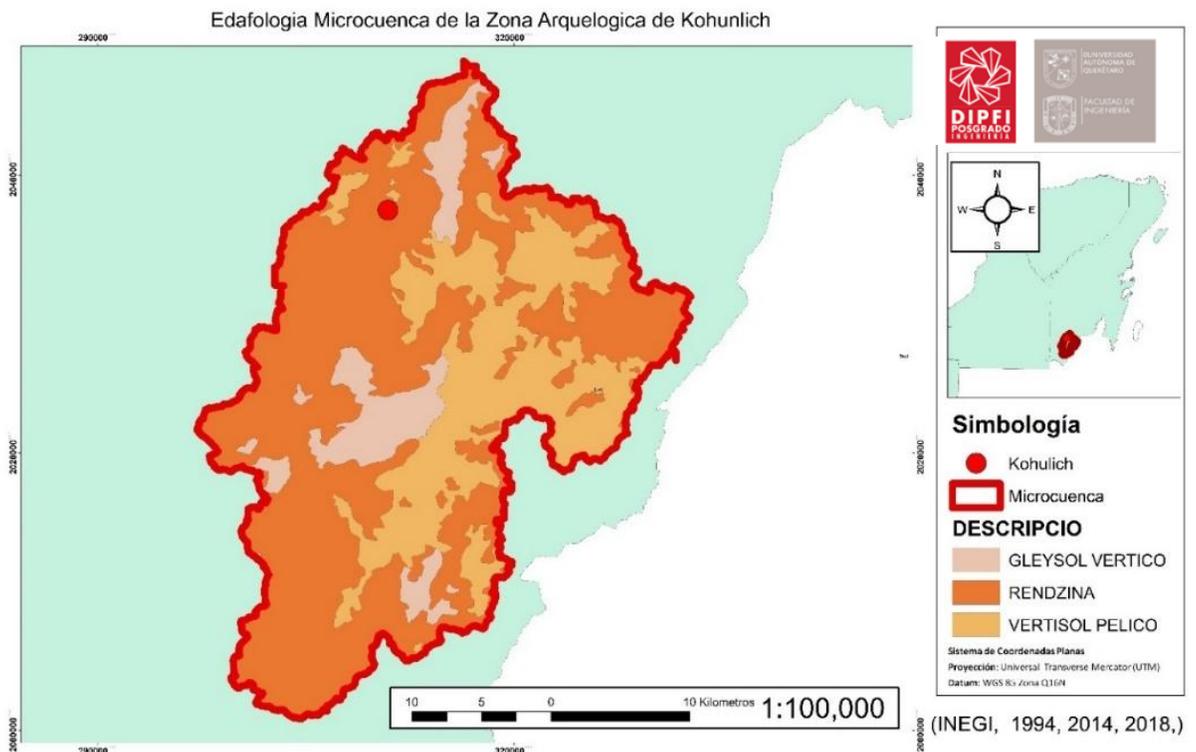
El perfil es de tipo ABC, la alternancia entre la expansión y la contracción de la arcilla crea fracturas profundas en la estación seca y forma superficies comprimidas y agregados en forma de cuña en el subsuelo.

Si lo vemos desde su caracterización de pélico. Este presenta una intensidad de color en húmedo de 3.5 o menos en la matriz del suelo, de los 30 cm superiores, y una pureza de 1.5 o menor.

Esto se refleja en matrices de suelo de 30 cm o más, intensidad de color en húmedo de 3.5 o menos y pureza de 1.5 o menos.

Por último, el suelo Gleysol Vertico derivado de la palabra rusa "gley", que significa terrón de lodo, refiriéndose a su exceso de humedad.

El material original consiste en una variedad de materiales sueltos, principalmente de sedimentos del Pleistoceno u Holoceno, sedimentos marinos o fluviales. Los minerales pueden ser ácidos o alcalinos. Se encuentran en esta zona debido a la presencia de napas freáticas.



**Figura 8.- Edafología de la subcuenca 33Ad (Elaboración Propia)**

El perfil es ABgCr o HBgCr considerados como gleysoles, aunque el horizonte Bg puede no existir. La evidencia de un proceso de reducción con o sin división de compuestos de hierro es característica en los 50 cm superiores del suelo.

La humedad es la principal limitación para los Gleysoles primarios; a menudo se cubren con vegetación natural pantanosa inútil o se usan para pastoreo extensivo. Después del drenaje, se pueden utilizar para cultivos, agricultura de subsistencia o huertos. En las regiones tropicales y subtropicales, se utilizan en la mayoría de las zonas para cultivar caña de azúcar.

**Tabla 3.- Datos de áreas de los tipos de suelos de la zona arqueológica de Kohunlich**

Descripción	Números de Áreas	Área total (Hec)
<b>CUERPO DE AGUA</b>	4	922.388535
<b>GLEYSOL VERTICO</b>	29	95451.4449
<b>RENDZINA</b>	106	268322.455

VERTISOL PELICO	14	128318.715
-----------------	----	------------



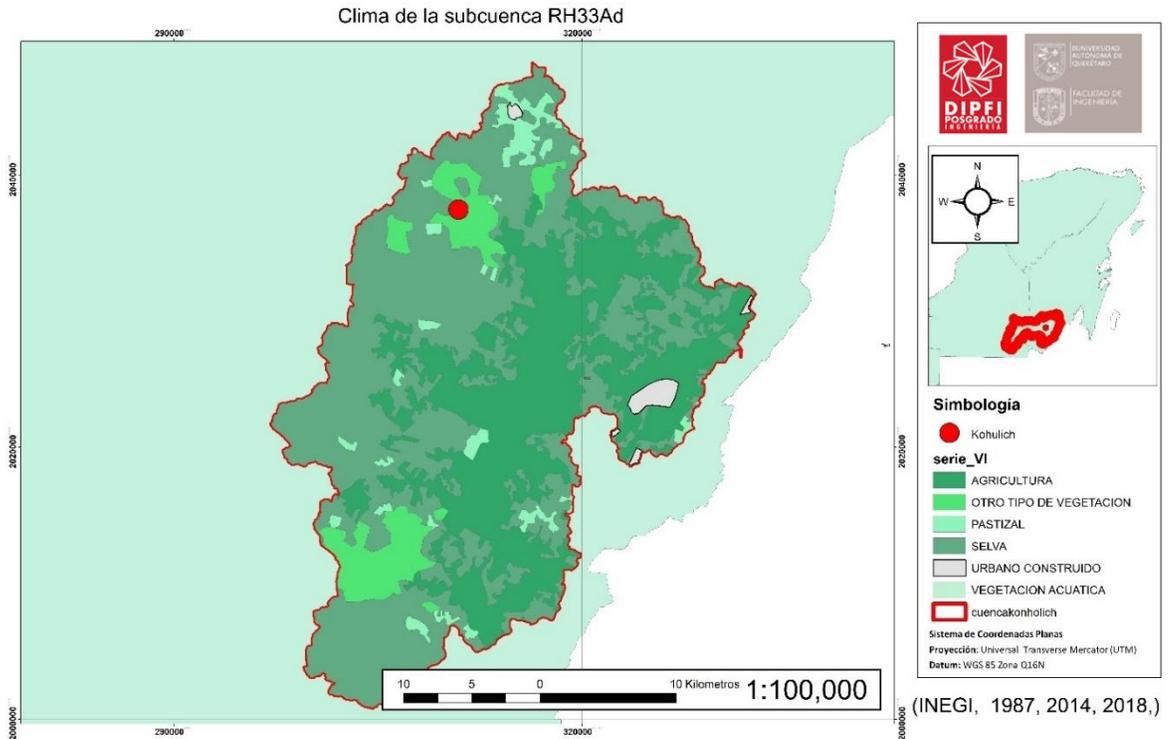
**Figura 9.- Tipos de suelo en la zona de estudio (En orden de izquierda a derecha: Gleysol, Vertisol y Redzina) (Bautista, 2021)**

#### **VI.7. Uso de suelo**

Según la capa de la INEGI de la serie VI del 2016, se puede apreciar las proporciones de vegetación que existen en la región de estudio, si bien la mayoría del territorio de Quintana Roo sigue siendo natural y existe pocas zonas de poblaciones grandes y la mayoría de la gente ubicada en el municipio está en la ciudad de Chetumal, es esta sección del estado se puede apreciar una proporción casi equivalente entre la agricultura y selva. Sin embargo, en la parte donde se encuentra ubicado la ZA de Kohulich, no posee una clasificación, es recomendable realizar una visita para establecer una categoría apropiada para dicho lugar.

Es importante aclarar que la agricultura realizada en la región se basa prácticamente en cultivo de caña de azúcar, debido a las propiedades del suelo y

la cercanía con la bahía debido a las condiciones climáticas que son benéficas para el óptimo desarrollo del cultivo.



**Figura 10.- Mapa de Uso de suelo y vegetación de la zona de estudio (INEGI, 2016)**

Uso de Suelo (Serie VI)	Cantidad	Área (Ha)
AGRICULTURA	1	31387.45584
OTRO TIPO DE VEGETACION	1	6319.440646
PASTIZAL	1	2918.804655

<b>SELVA</b>	2	44483.77808
<b>URBANO CONSTRUIDO</b>	1	795.7263848
<b>VEGETACION ACUATICA</b>	1	1.064014623

En toda la cartografía existe dos regiones de población los cuales son Morocoy y Albaro Obregón, lo cual es significativo para conocer la distribución del agua en la región, lo cual se puede observar en la Tabla 4 las áreas representativas de cada uso de suelo clasificado por el INEGI.

**Tabla 4.- Uso de suelo del Área de estudio.**

### **VI.8. Flora**

El área está prácticamente desprovista de vegetación debido al desarrollo urbano y rural de los humanos por lo cual han sido reemplazados por agricultura e infraestructura. No obstante, en tierras deshabitadas, los tipos de comunidades de vegetación que existen son bosques semiperennifolios altamente variables con una amplia variedad de árboles, arbustos y pastos en capas. En las ciudades es común ver árboles ornamentales o frutales plantados por los nativos, representados por tulipanes (*Hibiscus rosa-sinensis*), celidonia (*Crotos sp.*) y pastos de jardín (*Sporobolus virginicus*). Las especies con mayor número de ejemplares observados en el contexto de vegetación secundaria fueron *Talisia olivaeformis* (Huaya), *Piscidia piscipula* (Habin) y *Sideroxylon foetidissimum* (Caracolillo). En las zonas costeras, las especies arbóreas dominantes son *Coccoloba uvifera* (uva de playa) y *Conocarpus erectus* (manglar), esta última protegida por la Ley Común de Manejo Forestal.

En la Bahía de Chetumal existe una vegetación marina muy baja por no decir nula, encontrándose únicamente violetas filamentosas (algas marinas), *Thalassia testudinum*, macroalgas *Batophora oerstedii* y grupos de *Chlorophytas* (algas verdes) y *Phaeophytas* (algas pardas).

## **VI.9. Fauna**

La fauna es megadiverso, entre las que destaca el manatí, un mamífero marino que vive en bahías y lagunas costeras y que se encuentra protegido por las leyes y se ha transformado en un emblema de la región. Además, se encuentra otros tipos de especies: jabalíes, ciervos blancos, nutrias, tortugas y aves.

Es importante aclarar que el manatí (*Trichchus manatus*) es un animal con gran valor histórico y cultural en la bahía de Chetumal y de alto valor ecológico debido a su característica de especie protegida.

## **CAPITULO VII. BREVE ANALISIS DE LLUVIAS EN LA REGION**

### **VII.1. Estimación Precipitación anual y diaria por medio de imágenes**

#### **satelitales**

Si tomamos en cuenta las imágenes satelitales de la Versión 3 de ORNL DAAC con una cuadrícula de 1 km para América del Norte, y la georreferencia referida en el apartado III.2.1, se puede tener un punto específico para el control de descarga de información de DAYMET el cual es un producto de datos derivado de un conjunto de algoritmos y software informático diseñado para interpolar y extrapolar las observaciones meteorológicas diarias para generar estimaciones cuadriculadas de los parámetros meteorológicos diarios.

La información consta de 39 años de estimación de precipitación por día, vía satelital en todos los 365 días del año, de la cual se obtiene el acumulado de los datos de cada año obteniendo la Tabla 5 y Figura 11.

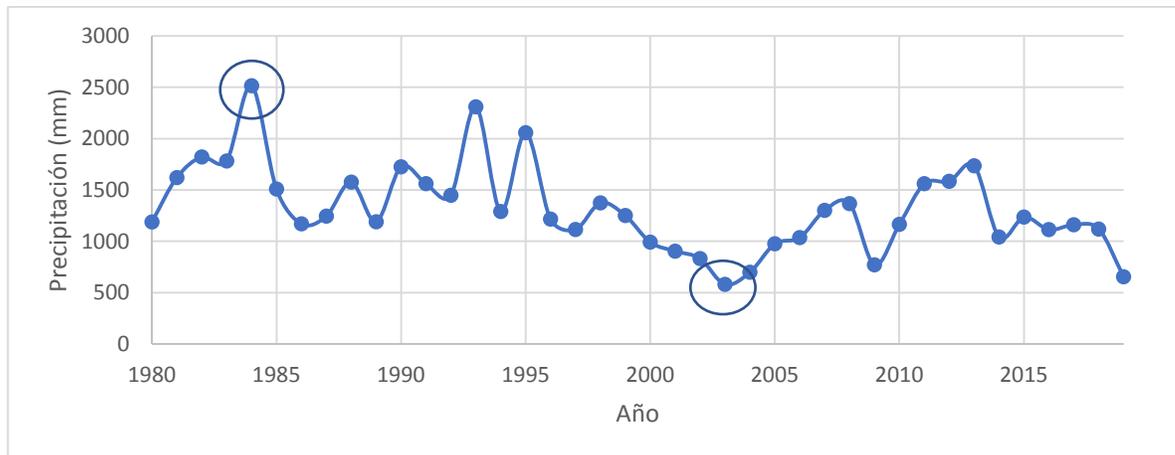
Sin embargo, hay que tener en cuenta que la temporada de lluvias abarca la mitad de los años, entre los meses de mayo a noviembre, teniendo precipitaciones más intensas durante verano y necesario mencionar la presencia de eventos extraordinarios como tormentas tropicales y huracanes.

**Tabla 5.- Datos de precipitación anual para un punto específico de estudio**

<b>Año</b>	<b>Pre. A. (mm/año)</b>	<b>Año</b>	<b>Pre. A. (mm/año)</b>
1980	1189	2000	993
1981	1621	2001	905
1982	1822	2002	833
1983	1783	2003	582
1984	2515	2004	700
1985	1510	2005	977
1986	1171	2006	1037
1987	1246	2007	1302
1988	1577	2008	1368

1989	1191	2009	772
1990	1726	2010	1166
1991	1562	2011	1562
1992	1449	2012	1585
1993	2310	2013	1736
1994	1291	2014	1043
1995	2058	2015	1237
1996	1217	2016	1115
1997	1116	2017	1162
1998	1375	2018	1120
1999	1252	2019	656

Calculando la media estándar de los datos de la Tabla 5, se obtiene el valor de 1322.225 mm de precipitación media anual, cumpliendo con lo anteriormente dicho en el apartado.

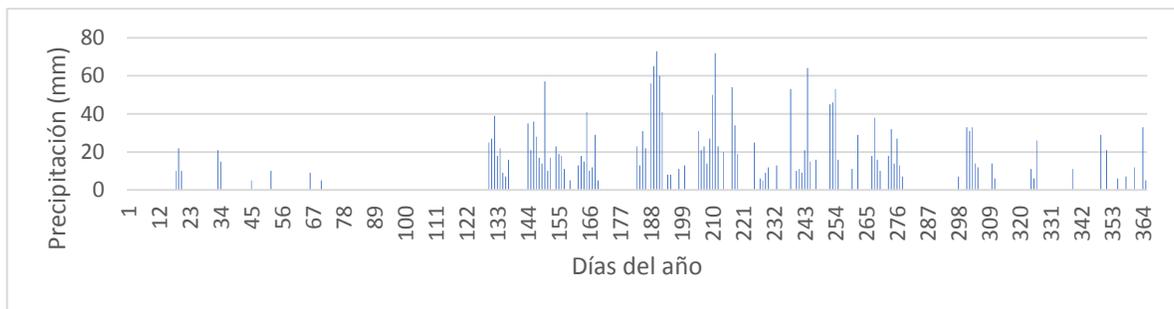


**Figura 11.- Pronostico de precipitación anual para la zona de estudio (DAYMET, 2020)**

Como se puede apreciar el año con mayor precipitación es en el 1984 y el de menor es en el año 2003 con 2572 mm y 582 mm de lluvia acumulada respectivamente, lo que indica que existe una variación en los pulsos de precipitación que puede ocasionar un cambio en el comportamiento en la

vegetación de la región. Sin embargo, al no ser un clima cálido subhúmedo y que tienen un manto freático somero es factible la subsistencia de plantas con alto nivel de área foliar debido a la poca profundidad del agua en el suelo por su fenómeno de capilaridad. En la Figura 12 y la Figura 13 se puede apreciar el comportamiento de los pulsos de precipitación en el punto de estudio para los años 1984 y 2003.

En total la temporada de lluvias abarcan 184 días, no obstante no todas tuvieron presencia de precipitación en cada uno de ellos, es así que podemos obtener la separación entre pulsos dividiendo entre los días que si llovieron y días totales de la temporada, que prácticamente son 74 y 40 para los años indicados, obteniendo así valores de  $\lambda_{1984} = 0.40 d^{-1}$  y  $\lambda_{2003} = 0.22 d^{-1}$  con una media de precipitación diaria entre pulso de  $\alpha_{1984} = 24.20 mm$  y  $\alpha_{2003} = 11.76 mm$ , lo que indica que no solo llueve más días, sino que también con mayor intensidad, lo que puede implicar además de superar la cantidad necesaria de agua para la vegetación, tener altos niveles de escurrimientos superficiales en el área de estudio.



**Figura 12.- Pulsos de precipitación para 1984.**



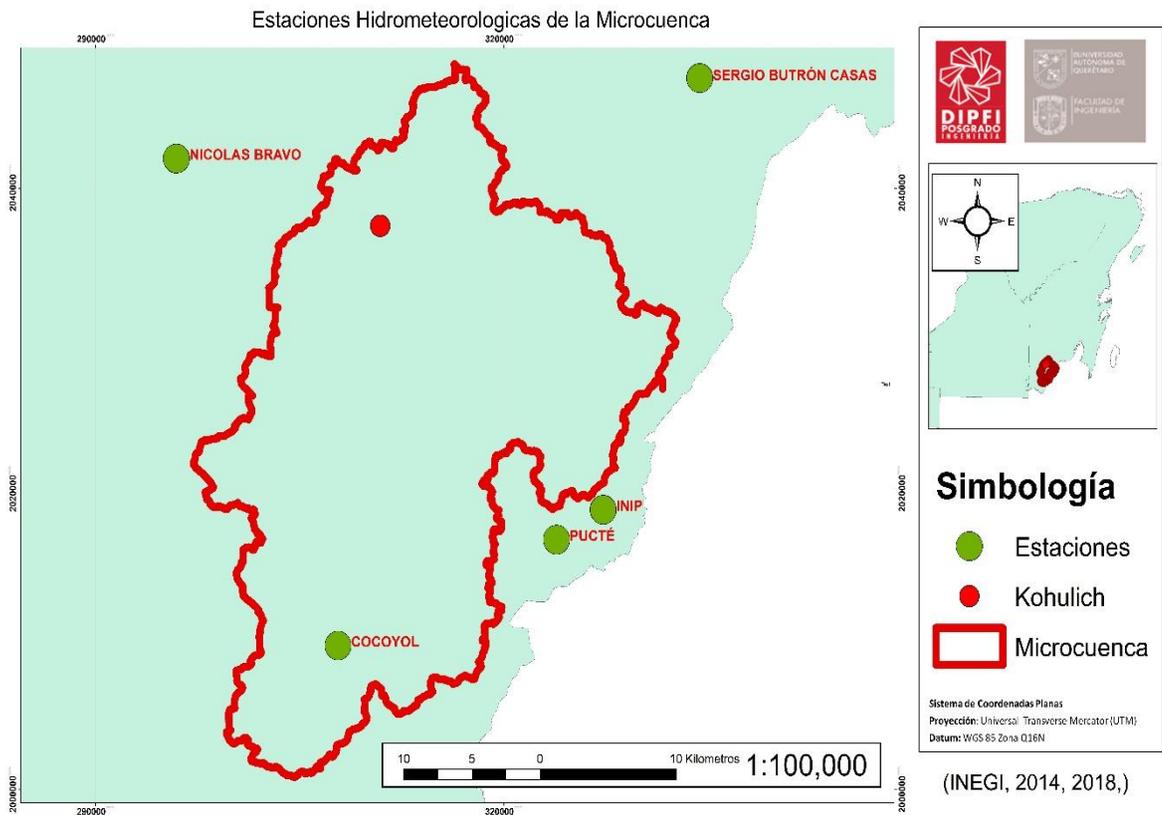
**Figura 13.- Pulsos de precipitación para 2003.**

Como se puede entender, hay una reducción significativa entre ambos años, incluso en 1984 existe presencia de precipitaciones a finales de años teniendo un comportamiento normal de temporada de lluvias entre abril y enero, pero en el 2003 sucede una situación poco común de bajas precipitaciones en diciembre, situación que en la región no es habitual.

Sin embargo, si lo tomamos para consideración del deterioro de la ZA, es necesario aclarar que lluvias más intensas o con un mayor valor acumulativo puede generar erosión y disolución respectivamente. Inconveniente, estos daños no se pueden cuantificar de forma diaria, semanal o mensual. Esto es debido que los fenómenos son procesos que conllevan un periodo de tiempo amplio en principio a cuestiones anuales, además que entre los resultados se tendrían con métrica en nanómetros y no es tan significativo y visible para el ser humano. Así que, se recomienda ser más específicos a periodos anuales, dado que el deterioro que se puede ocasionar en un año de lluvia y contaminantes acumulados, donde si se tiene valores con unidades de micrómetros.

## **VII.2. Ubicación de estaciones climatológicas de CONAGUA cercanas a la zona de estudio**

La cuenta tiene alrededor de su área de estudio un conjunto de estaciones hidrometereológicas. No obstante, solo una tiene la posibilidad de esta dentro del área, por lo que es recomendable tomar los datos de todos los posibles para una mejor comprensión del fenómeno de lluvia en la región de estudio.



**Figura 14.- Mapa de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas en la Zona Arqueológica.**

Entre las estaciones EMAs que se pueden apreciar en la Figura 14, se encuentran las:

- Nicolas Bravo
- Sergio Butron Casas
- Cocoyol
- Pucté
- INIP

Administradas por la organización de cuencas CONAGUA y orientación local, involucra aproximadamente 5000 registros diarios de precipitaciones de 24 horas y temperaturas mínimas y máximas, reportadas por cinco estaciones meteorológicas, y para casos que abarcan 10 años, se calculan indicadores

climáticos, extremos y se realizan estadísticas mensuales. Todos estos están disponibles a través de tablas en el servidor de mapas.

Desgraciadamente, las variables medidas con las estaciones de CONAGUA se encuentra incompletas o con faltantes que puede alterar de proceso de pronóstico en el estudio, no es recomendable combinarlas con los valores estimados de la base de observaciones de otras fuentes.

## **CAPITULO VIII. FACTORES DE RIESGO**

Es este capítulo se busca explicar los fenómenos que afecta en manera de deterioro o degradación a la ZA, teniendo en cuenta los factores físicos, químicos, biológicos y ambientales.

La conceptualización sirve para tener en cuenta estos temas al momento de aplicar el marco teórico y metodología en la investigación con el interés de tener el resultado más acertado a la hora de generar la conservación del recinto.

Es importante aclarar que existe un proceso por el cual todas las sustancias cambian, se degradan o se descomponen según su estructura química y su entorno.

Entre los procesos más común que degradan a un Edificio y en este caso en un ZA. Se encuentra la disolución hídrica, patología, humedad por medio ambiente y erosión.

### **VIII.1. Procesos Físicos**

El componente usual de todos los procesos involucrados en la meteorización física es crear una tensión lo suficientemente grande, ya sea hidrodinámica o debido al sistema de carga en la roca, para causar la fractura de estas. Entonces, si la roca se rompe paralela al plano de falla, se forman bloques o placas, pero si las rayas débiles se ubican en las conexiones de los minerales, se formará el material específico con el tamaño de los granos del lecho rocoso. Sin embargo, se pueden obtener tamaños más pequeños si los minerales están atravesados por grietas microscópicas. Generalmente, la meteorización física provoca grietas, fallas, desintegraciones, derrumbes y otros efectos de deterioro (Vergès-Belmin, V, 2008).

## VIII.2. Procesos Químicos

Es común que la mayoría de las edificaciones generadas en la etapa mesoamericana de la región del sur del país, estén formados por rocas calizas esto se puede confirmar si se toma la Sección Geología de este documento.

La piedra caliza se considera una roca sedimentaria cuyos componentes químicos principales calcio, carbono y oxígeno se componen para la creación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita, aunque en otras ocasiones engloban trazas de magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y otras sales de carbonato (C. Klein, et. Al., 1998; Mainou, L, 2012).

Es por lo que, la disolución de la calcita es la causa principal de la meteorización química. Esto significa que estas sustancias son solubles en agua debido a la hidratación del atmosférico dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que a diferencia de otros gases estándar en la atmósfera que producen ácido carbónico, este es el más soluble de todos. Después de la reacción,  $\text{CO}_2 \text{ (aq)} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$  (ácido carbónico) se disocia, formando  $\text{H}^+$ ; Otros ácidos pueden aumentar la cantidad de estos iones porque el efecto complejante puede aumentar la disolución de estos pétreos. El ácido carbónico se descompone para constituir iones  $\text{H}^+$  y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), que luego pueden descomponer nuevamente para crear protones y iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

El pH del agua dentro la piedra caliza oscila entre 6.5 y 8.9. Además, toda el agua que se encuentre en el exterior de la atmósfera regularmente contará con varios carbonos inorgánicos disueltos, ya sea que tengan o no rocas carbonatadas en los cuerpos de agua.

La reacción de disolución de la piedra calcita en agua acidificada con dióxido de carbono se resume como sigue:



Es importante aclarar que el suelo contiene grandes cantidades de dióxido de carbono, generalmente como resultado del proceso respiratorio en principio de organismo microscópicos como actinomicetos, bacterias, y hongos, incluso de igual forma a las plantas, la fauna en el suelo que componen al suelo.

El principal mecanismo de estratificación es la disolución de la caliza y su posterior recristalización, provocando unos efectos macroscópicos en la roca.

### **VIII.3. Procesos Biológicos**

Cabe aclarar que las estructuras de la ZA y todos los materiales que la componen pueden ser colonizados y poblados por microorganismos al poco tiempo de su exposición al agua natural y a la atmósfera, lo que puede reducir la durabilidad de estos en poco tiempo.

El deterioro de materiales de las construcciones de las ZAs comienza tan pronto como se extrae el material de la cantera o se vierte el mortero en el edificio. Esto se debe a que los elementos naturales como el viento, la luz solar, la lluvia, etc. descomponen gradualmente la materia en partículas más pequeñas y eventualmente se convierten en minerales. Sin embargo, la actividad microbiana puede tener un impacto significativo en la durabilidad de los materiales de construcción, y es importante comprender la operación para seleccionar el tratamiento adecuado y la estrategia de control para la reparación y restauración de edificios y monumentos del patrimonio cultural. (Saiz-Jimenez, SF; Gaylarde C, el. at, 2003).

Entre las biopelículas encontrada en los materiales de la ZA, Se han identificado diversas especies de microorganismos que pueden decolorar sus superficies y aumentar el desgaste abiótico por efectos fisicoquímicos (Tabla 6). (de Turrís et al., 2013)

Todos los materiales de construcción son heterogéneos y consisten en varios materiales similares que contienen compuestos como silicato de calcio y alúmina. Sin embargo, en cuestión de ZA la mayoría de los materiales tienen

comportamiento homogéneo pues son tallados a manos de rocas extraídas de canteras en base de carbonatos de calcio como se explica en la sección 7.2. Aunque exista diferencia entre material constructivos modernos y de la época mesopotámica, Son mineralmente similares y pueden ser atacados por los mismos microorganismos utilizando las mismas composiciones (Gaylarde C, el. at, 2003).

**Tabla 6.- Resumen de algunos efectos de los microorganismos a los materiales de las ZAs (de Turris et al., 2013)**

<b>Actividad</b>	<b>Efecto(s)</b>	<b>Material</b>	<b>Microorganismo</b>
<i>Presencia física</i>	Decoloración, Retención de Agua	Todos	Todos
<i>Presencia física</i>	Incremento del crecimiento de organismos heterotróficos	Cualquier superficie limpia	Algas, bacterias fotosintéticas
<i>Enzimas hidrolíticas</i>	Ruptura de componentes, degradación de aditivos de cadena corta	Madera, superficies pintadas, polímeros, mortero	Hongos, Bacterias Hongos filamentosos
<i>Crecimientos filamentosos</i>	Disgregación de materiales	Piedra, mortero, madera	Hongos, actinomicetos, cianobacterias, algas
<i>Producción de ácidos</i>	Degradación	Piedra, mortero, madera	Hongos, Bacterias
<i>Movilización de iones</i>	Debilitamiento y disolución	Piedra, mortero, madera	Todos
<i>Quelación de iones constituyentes</i>	Debilitamiento y disolución	Piedra, mortero	Productores de ácidos orgánicos (Por ejemplo, hongos)
<i>Captura de iones H+ por las células</i>	Degradación alcalina	Piedras	Algas, cianobacterias
<i>Liberación de Polioles (Por ejemplo: glicerol, polisacáridos)</i>	Disrupción de capas de silicatos	Piedras silíceas	Todos

La acidólisis (intercambio catiónico-protónico) implica la actividad de microorganismos quimiotróficos, como las bacterias, cuya composición química se

basa en los ácidos nítrico y sulfúrico. Debido a que estas bacterias requieren humedad y nutrientes específicos, su actividad a menudo ocurre en edificios expuestos a condiciones de temperatura y humedad relativa(de Turrís et al., 2013).

## **CAPITULO IX. MARCO TEÓRICO.**

### **IX.1. Conceptos Básicos**

#### **IX.1.1 Humedad relativa.**

La definición más simple que se usa con más frecuencia para expresar la cantidad de humedad relativa (HR) en una medición en porcentaje de la presión de vapor observada con respecto a la presión de vapor saturada en relación con el agua a la misma temperatura y capacidad. (Organizacion Meterología Mundial, 2010).

Además de la humedad relativa, las unidades y símbolos comúnmente utilizados para representar las cantidades más usualmente asociadas con el vapor de agua atmosférico son los siguientes:

- Relación de mezcla  $r$  y humedad específica  $q$  (en kg/kg);
- Presión de vapor  $e'$ ,  $e'w$ ,  $e'i$  y presión  $p$  (en hPa) en el aire;
- Temperatura,  $T$ , temperatura de punto de rocío  $T_d$ , temperatura de bulbo húmedo  $T_w$ .
- Humedad relativa,  $U$  (porcentaje).

##### **IX.1.1.1. Humedad patológica.**

Es importante mencionar que la humedad patológica es la presencia indeseable de agua líquida en diferentes lugares o momentos (Broto, 2005). Esta humedad no deseable puede provocar síntomas muy comunes como cambios de color, manchas, hongos, pudrición del material, erosión, deformación, etc. Pero indirectamente, también provocan daños estructurales más graves.

Si analizamos las fuentes de humedad en relación con los problemas de construcción, esto se puede identificar específicamente en dos grandes grupos de afecciones mostrado en la Tabla 7.

**Tabla 7.- Porcentaje de aparición de las humedades según su tipo. (Broto, 2005).**

<i>Tipo de naturaleza de afectación</i>	<i>%</i>
<i>Humedad de condensación (Humedad relativa)</i>	44
<i>Humedad de penetración (Capilaridad)</i>	52
<i>Humedades accidentales</i>	4

Como se puede ver en la tabla anterior, los dos tipos de humedad, que se ven afectados principalmente por el ambiente atmosférico, representan el 96% de las condiciones dentro de la envolvente del edificio que se manifiestan de diferentes maneras.

### **IX.1.2 Precipitación**

Esta puede ser considerada por la Organización Mundial de Meteorología como la cantidad total de agua en un período de tiempo definido que llega a la tierra, expresada como la profundidad que alcanzará en la proyección horizontal del área terrestre. La precipitación juega un papel importante en el ciclo hidrológico, proporcionando agua dulce a las protuberancias de la corteza terrestre, beneficiando así la vida en nuestro planeta, incluidas las plantas y los animales puesto que estos necesitan de este elemento para sobrevivir, Para que sean válidos, los valores de precipitación deben compararse científicamente.

La precipitación se puede medir con pluviómetros y pluviógrafos, incluso con equipos más avanzados como las estaciones hidrometeorológicas automatizadas, que se utilizan para determinar la precipitación de alta intensidad a corto plazo. Estos dispositivos deben instalarse en un lugar adecuado, que no se vea afectado por características topográficas como edificios, árboles o rocas sobresalientes.

La precipitación se mide en milímetros y es teóricamente el espesor de la capa de agua que se forma sobre una superficie plana e impermeable, que es exactamente 1 litro de agua por metro cuadrado de terreno ( $l/m^2$ ).

La medición de la precipitación mediante el radar meteorológico o imágenes satelitales se ha vuelto cada vez más popular desde la década de 1960 y, a menudo, está directamente relacionada con modelos matemáticos que pueden determinar la intensidad de la precipitación y la precipitación acumulada con un determinada en tiempo real.

Como se menciona en la sección VIII.2, El fenómeno químico de disolución de rocas calcitas en agua de lluvia con dióxido de carbono y acidificada se puede resumir de la siguiente forma:



Es importante aclarar que el suelo contiene grandes cantidades de dióxido de carbono, generalmente como resultado del proceso respiratorio en principio de organismos microscópicos como actinomicetos, bacterias, y hongos, incluso de igual forma a las plantas, la fauna en el suelo que componen al suelo.

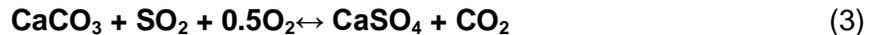
### **IX.1.3 Características de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)**

Es un gas incoloro con un olor acre. Es un agente reductor que se reacciona rápidamente en trióxido de azufre con el tiempo cuando se expone al aire y la humedad. La velocidad de esta reacción en condiciones normales es lenta. Esta forma molecular se deriva principalmente de la combustión de combustibles fósiles que contienen sulfuro (petróleo crudo, combustibles sólidos), principalmente en procesos industriales de alta temperatura y generación de energía.

Se vuelve altamente corrosivo en presencia de humedad y las temperaturas por debajo del punto de rocío. Se comporta de forma diferente a los metales a altas temperaturas, atacando al aluminio y sus aleaciones, y al cobre y sus aleaciones. (INRS, 2006).

Entre sus propiedades físicas se encuentra el peso molecular de 64.06 g y el factor de conversión 1 ppm = 2.64 mg/m<sup>3</sup> (20°C y 101,3 kPa), Punto de ebullición en -10°C y punto de fusión de -72 a -75.5°C.

La reacción total de sulfatación en piedras calizas en términos químicos es:



Donde podemos apreciar que no es necesario un elemento como el agua que cause efecto en el fenómeno. La deposición de partículas contaminantes en la superficie de la roca depende de la concentración de impurezas, el contenido de humedad, la rugosidad y la afinidad química del sustrato este valor puede ser consultado en la sección IX.4.2 para el  $\text{SO}_2$ .

#### **IX.1.4 Características de Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )**

El dióxido de nitrógeno u óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es un compuesto gaseoso que consta de un átomo de nitrógeno y dos átomos de oxígeno y de color marrón amarillento. Es un gas venenoso e irritante producto de erupciones volcánicas o incendios forestales. También se produce naturalmente al descomponer los nitratos orgánicos. La cantidad total de producción natural es mucho menor que la producida por el hombre mediante el uso de vehículos, la quema de combustible y la manufactura en fábricas.

Sus propiedades físicas incluyen un peso molecular de 46.01 g y un factor de conversión de 1 ppm = 1.91 mg/m<sup>3</sup> (20°C y 101,3 kPa) , además de punto de ebullición -9.3°C y punto de fusión 21.2 °C.

#### **IX.1.5 Características de Ozono ( $\text{O}_3$ )**

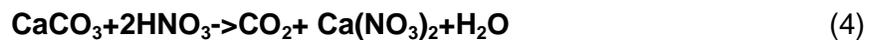
Al contrario de los anteriores elementos moleculares, El ozono ( $\text{O}_3$ ) se forma de mayor parte de manera natural, cuando una molécula de oxígeno se excita lo suficiente como para romperse en dos átomos de oxígeno de diferentes energías, la colisión entre los diferentes átomos produce ozono. Es una forma alotrópica de oxígeno que resulta del reordenamiento de los átomos de oxígeno cuando se descarga la molécula. Por lo tanto, es la representación más activa de oxígeno.

Entre sus propiedades físicas destacan un factor de conversión de 1 ppm = 1.91 mg/m<sup>3</sup> (20°C y 101,3 kPa) y un peso molecular de 48 g, un punto de ebullición de -119.5 °C y un flujo de punto caliente -192.5 °C.

### **IX.1.6 Características de Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>)**

El ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) es un tipo de líquido viscoso y altamente corrosivo que puede causar quemaduras graves a organismos vivos y animales. Por lo general, diferentes impurezas darán un color amarillo-marrón. Libera vapor amarillo a temperatura ambiente.

Cuando, el NO<sub>2</sub> entra en contacto con oxidantes como el ozono (O<sub>3</sub>) mencionados en los apartados IX.1.4 y 0, formándose NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub>, y a partir de éste HNO<sub>3</sub>. Aunque es altamente corrosivo, este ácido tiene menos efecto sobre las rocas que el SO<sub>2</sub>. A pesar de lo anterior, este provoca cambios en la superficie y acelera las reacciones de otros compuestos que pueden afectar la degradación de las rocas, especialmente la degradación de carbonatos. Cuando el carbonato de calcio y el ácido nítrico están en contacto genera reacción que producirá sales de nitrato de calcio:



La deposición de partículas de contaminación en la superficie de la roca depende de la concentración de impurezas, el contenido de humedad, la rugosidad y la afinidad química del sustrato, este valor puede ser consultado en la sección IX.4.3 para el HNO<sub>3</sub>.

### **IX.2. Análisis de Serie de tiempo**

Una serie de tiempo es un proceso ordenado de análisis relacionadas con un punto particular en el tiempo, y al menos una variable debe ser monitoreada continuamente y de igual duración. Se pueden encontrar ejemplos de series de tiempo en la mayoría de los campos de la ciencia. En economía, cuando se busca datos para estudiar la conducta de las variables económicas y sus relaciones con

otras variables, estos datos suelen presentarse como series temporales. Por lo tanto, podemos pensar en rangos como el precio diario de las acciones, la exportación mensual, el consumo mensual, las ganancias trimestrales, etc. En marketing, las series de ventas semanales o mensuales son de las mayormente estudiadas y estimadas (Yan & Chen, 2018). En Demografía se estudian las series de población total, tasas de natalidad, enfermedades, etc (Aslam, 2020). Pero si lo enfocamos en Meteorología e Hidrología, tenemos series temporales de temperatura, cantidad de lluvia caída en la región, velocidades del viento, gases de efecto invernadero, etc (Arumugam & Saranya, 2018; Renderos & Molina, 2008).

### **IX.2.1 Técnicas de Predicción**

La predicción se basa en el uso de datos del pasado de una variable para predecir su respuesta en el futuro. Por lo tanto, los datos de investigación de este estudio generalmente se presentan como una serie de tiempo. En la aplicación de técnicas de pronóstico, la suposición básica es que los datos del pasado continuarán surgiendo en el futuro cercano. La evidencia empírica muestra que esta suposición es cierta en muchas situaciones del mundo real, particularmente cuando las series de tiempo se presentan sobre la historia a largo plazo de las variables que se analizan. El pronóstico de las variables de estudio se considera como un conjunto de pasos que incluye el proceso de recopilar datos relacionados con la predicción de variables, luego analizar y procesar la información para obtener un pronóstico.

Cada una de las técnicas de pronóstico se caracteriza por dos bases fundamentales:

- La forma de procesar la información de la base mediante un procedimiento establecido.
- La manera en que se prepara la base de datos.

Las rutinas que siguen al procesamiento de la información se pueden dividir en métodos subjetivos y métodos objetivos. En esta investigación se utilizará el método objetivo. Según Aznar, en el enfoque objetivo, la base de información se proporciona como una variable que toma los valores de una serie de épocas al inicio de la previsión. Por lo tanto, una representación de la realidad de forma abstracta escrita y analizada en lenguaje matemático que contiene aspectos fundamentales de un aspecto predicho es un conocimiento relacionado en base al modelo estadístico. En estos modelos estocásticos, es importante saber la diferencia de los modelos paramétricos y no paramétricos. En el primer método, el cual determina una estructura poblacional aleatoria y se supone que se recolectaron observaciones de las variables que componen la base de información. Al contrario de este, en las características no paramétricas no se menciona la estructura.

### IX.2.2 Proceso estocástico y estacionariedad

Basándose en distribuciones de probabilidad, se puede lograr hallar patrones regulares en diferentes partes de la serie temporal, también podemos describirlos usando patrones. Una serie ordenada de variables aleatorias  $X(t)$  y sus distribuciones de probabilidades asociadas se denominan procesos estocásticos. Por tanto, un proceso estocástico es un modelo matemático de una serie de tiempo, definida como un proceso lineal lógico si cada  $Y_t$  observado se puede escribir como:

$$Y_t = \mu + u_t + \Psi_1 u_{t-1} + \Psi_2 u_{t-2} + \dots + \Psi_i u_{t-i} \quad (4)$$

donde  $\mu$  y  $\Psi_i$  son valores desconocidos y  $u_{t-i}$  es una secuencia de ruidos aleatorios idénticos e independientemente distribuidos con una varianza media con tendencias a cero  $\sigma_u^2$ , en este caso, donde la serie de la variable aleatoria (proceso aleatorio) muestra expectativa cero, con constancia en la varianza y covarianza cero para diferentes valores de  $t$ , se considera como **ruido blanco**.

La principal desventaja de modelar procesos estocásticos es que para ajustar la variable de investigación  $Y$  a partir de una sola serie de tiempo, se deben hacer algunas simplificaciones en la estructura de probabilidad del proceso  $Y_t$  de donde se infiere  $Y$ , y por lo tanto se puede inferir de una sola serie de tiempo. La solución a este problema es establecer un supuesto de reposo que tenga las siguientes propiedades teóricas:

- **Estacionariedad:** el equilibrio estadístico caracteriza la evolución en el tiempo de los procesos aleatorios que componen la variable y su serie de tiempo.
- **Media:** Un valor constante de tiempo que mide qué tan bien crece un proceso estocástico estacionario.
- **Varianza:** Un valor constante de tiempo que mide el grado de desviación o variabilidad en la evolución en el tiempo de un proceso estocástico estacionario alrededor de su media estándar.
- **Autocorrelación:** Un valor constante en el tiempo el cual mide el nivel de correlación lineal separados por diferentes intervalos de tiempo o retrasos, en cada uno de los conjuntos de pares de bloques de un proceso estocástico estacionario.

Otro inconveniente es que la mayoría de las series de tiempo no pueden considerarse establecidas por procesos estocásticos estáticos y por lo tanto no son estacionarios. Esto se debe a que muestran algunas tendencias distintas en la evolución del tiempo y, por lo tanto, no muestran algunos valores de afinidad constantes que varían con el tiempo porque su variación no es permanente ni estacional. La solución a este inconveniente es refrescar la serie original. Esto significa que una serie temporal no estacionaria puede transformarse adecuadamente en una serie temporal con aspectos estáticos. La serie

transformada se puede utilizar para construir modelos estadísticos que se ajusten a la suposición de estabilidad. Las transformaciones con más frecuencia en uso en la manera que se procesa los datos para que puedan ser convertidos en series temporales no estacionarias en estáticas son las llamadas transformaciones regulares, logarítmicas y estacionales.

### **IX.3. Comunes modelos estocásticos de series de tiempo**

Se debe considerar diferentes modelos alternos para tener en forma la característica describir la atribución y reflejo de los eventos pasados en la actualidad y, por lo tanto, mediante los procesos estocásticos en el futuro.

Otro enfoque es hacer que el valor presente del proceso dependa linealmente del valor pasado del proceso mismo, así como de las perturbaciones aleatorias para que el modelo sea desconocido:

$$Y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + u_t + \delta \quad (5)$$

Se determina a la expresión como "autoregresión" porque este es un modelo de regresión del proceso propio.

Otra forma de expresar la relación de la variable con el pasado es cavilar el valor presente tomando el resultado de una composición de una serie de factores aleatorios autónomas (modelo de ruido blanco). También que, con los modelos de recuperación automática, se deben agregar ruidos aleatorios al modelo para garantizar su aleatoriedad:

$$Y_t = \mu + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (6)$$

Esta expresión se llama "media móvil".

Para reducir el índice de tiempo en una unidad  $LY_t = Y_{t-1}$  se emplea el operador diferido  $L$ , el cual se manipula bajo las condiciones de un proceso estocástico, y

por ende es un apartado de gran jerarquía en el análisis de estos modelos lineales.

### IX.3.1 Modelos Autorregresivos (Modelos AR)

El modelo de regresión autorregresivo o automática de orden  $p$ , abreviado como  $AR(p)$ , se establece como:

$$Y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + u_t + \delta \quad (7)$$

Teóricamente, no existe un límite para el número de relaciones pasadas en las que podemos influir en el valor presente del proceso, pero tal enfoque conduce a problemas no probados de hecho, es decir, en realidad, solo se observan los datos más recientes, es común que los coeficientes de regresión infinita cuando se presentan valores no se deban estimar. Por lo tanto, la Ecuación 2 se puede abreviar como:

$$\phi(L)y_t = \delta + u_t \quad (8)$$

Donde  $\phi(L)$  es el operante de rezago polinomial, considerando  $\phi(L) = 1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p$ . Estos modelos deben estar sujetos a la estabilidad. Pero no está sujeto a que un modelo autorregresivo cualquier orden sea estacionario sin embargo se busca que lo sea, por lo tanto, se establece que:

$$\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p < 1 \quad (9)$$

Satisfaciendo la hipótesis estacionaria, la expectativa matemática está dada por:

$$E(Y_t) = \mu = \frac{\delta}{1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p} \quad (10)$$

La varianza

$$\gamma_0 = \phi_1\gamma_1 + \phi_2\gamma_2 + \dots + \phi_p\gamma_p + \sigma_u^2 \quad (11)$$

La Ecuación de autocovarianzas

$$\gamma_j = \phi_1\gamma_{j-1} + \phi_2\gamma_{j-2} + \dots + \phi_p\gamma_{j-p} \quad \text{para } j > 0 \quad (12)$$

Tomando en cuenta a  $\gamma_0$  y  $\gamma_j$  para  $j = 1, 2, 3, \dots, p$  se determina la matriz de ecuaciones de  $p + 1$ :

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \phi_1\gamma_1 + \phi_2\gamma_2 + \dots + \phi_p\gamma_p + \sigma_u^2 \\ \gamma_1 &= \phi_1\gamma_0 + \phi_2\gamma_1 + \dots + \phi_p\gamma_{p-1} \\ \gamma_2 &= \phi_1\gamma_1 + \phi_2\gamma_0 + \dots + \phi_p\gamma_{p-2} \\ &\quad \dots \dots \dots \\ \gamma_p &= \phi_1\gamma_{p-1} + \phi_2\gamma_{p-2} + \dots + \phi_p\gamma_0 \end{aligned} \quad (13)$$

Si se tiene el valor conocido de los parámetros  $\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p$  y  $\sigma_u^2$ , puede calcular la varianza y la autovarianza en el orden del proceso. Partiendo del orden dado, es decir, para  $j > p$ , obtenemos la autovarianza recursivamente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \gamma_{p+1} &= \phi_1\gamma_p + \phi_2\gamma_{p-1} + \dots + \phi_p\gamma_1 \\ \gamma_{p+2} &= \phi_1\gamma_{p+1} + \phi_2\gamma_p + \dots + \phi_p\gamma_2 \\ \gamma_{p+3} &= \phi_1\gamma_{p+2} + \phi_2\gamma_{p+1} + \dots + \phi_p\gamma_3 \end{aligned} \quad (14)$$

La autocorrelación del modelo se obtiene del proceso divisible por la función de autocovarianzas,  $\gamma_0$ , dando como resultado:

$$\rho_j = \phi_1\rho_{j-1} + \phi_2\rho_{j-2} + \dots + \phi_p\rho_{j-p} \quad \text{para } j > 0 \quad (15)$$

Directamente de la función de autocorrelación se obtiene las ecuaciones de Yule-Walker, por lo tanto son:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \phi_1 + \phi_2\rho_1 + \dots + \phi_p\rho_{p-1} \\ \rho_2 &= \phi_1\rho_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p\rho_{p-2} \\ &\quad \dots \dots \dots \\ \rho_p &= \phi_1\rho_{p-1} + \phi_2\rho_{p-2} + \dots + \phi_p \end{aligned} \quad (16)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para  $\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p$  y representa en forma de matrices se llega a:

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \dots \\ \phi_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \dots & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_p \end{pmatrix} \quad (17)$$

Ecuación de Autocorrelación Parcial

$$\phi_{jj} = \begin{cases} \rho_1 & \text{para } j = 1 \\ \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} = \phi_2 \left[ \frac{(1 - \phi_2)^2 - \phi_1^2}{(1 - \phi_2)^2 - \phi_1^2} \right] & \text{para } j = 2 \\ \dots & \dots \\ \frac{\rho_{p-1} \rho_{p-2} \dots \rho_1 \rho_p}{1 - \rho_1^2 - \rho_2^2 - \dots - \rho_{p-1}^2} & \text{para } j = p \\ 0 & \text{para } j > p \end{cases} \quad (18)$$

### IX.3.1.1. Particularidades de los modelos AR(p)

**Estacionariedad:** La raíz del polinomio autorregresivo  $(L) = 1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p = 0$  con raíces en el complejo plano fuera del círculo unitario (totalmente más grande que las unidades en el módulo) es la circunstancia suficiente y necesaria para la estabilidad del modelo AR (p).

**Invertibilidad:** El modelo AR(p) es siempre invertible.

**Correlograma simple:** Un gráfico de correlación simple del modelo AR(p) produce infinitos coeficientes de correlación distintos de cero que disminuyen las sinusoides exponenciales amortiguadas que la componen.

**Correlograma parcial:** El gráfico de correlación parcial del modelo AR (p) tiene un primer coeficiente de correlación  $\rho^k$  distinto de cero (desde  $k = 1$  hasta  $k = p$ ), y está vacío o nulo para  $k = p + 1$ .

### IX.3.2 Modelos de Medias Móviles (Modelos MA)

El patrón conocido como media móvil de factor q representado por (MA(q)) se concreta:

$$Y_t = \mu + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (19)$$

Entre ellas, las variables  $Y_t$  en estudio se observan durante un período de tiempo,  $\mu$  esperado del modelo matemático, parámetro  $\theta_i$  o coeficiente desconocido del modelo de promedio móvil de orden q, la variable aleatoria  $u_t$  tiene media en cero con distribución independiente e idéntico y varianza  $\sigma^2$ .

Lo manifestado en la ecuación 18 se puede simplificar a  $y_t = \mu + \theta(L)u_t$ , del cual  $\theta(L)$  es el operador de retardo polinomial definido como  $\theta(L) = 1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_p L^p$  donde L es el operador de retraso, por lo que su valor exponencial representa el orden de retraso de la variable que está multiplicando, por lo tanto,  $L^s y_t = y_{t-s}, \forall s \geq 0$ .

El modelo siempre estará en un proceso estacionario, con restricciones  $\Psi_i = 0, \forall i \geq q, \Psi_i = -\theta_i, \text{ para } 1 \leq i \leq q$  y  $\Psi_0 = 1$  debido a su particularidad del proceso aleatorio discreto general definido en la ecuación (1), obteniendo:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \Psi_i = 1 - \theta_1 - \theta_2 - \dots - \theta_q = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \theta_i = k \quad (20)$$

El cual q el número de parámetros de media móvil y k es una constante de estacionalidad.

$$\sum_{i=0}^{\infty} \Psi_i^2 = 1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2 < \infty \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{\infty} \Psi_i \Psi_{i+j} &= \Psi_0 \Psi_j + \Psi_1 \Psi_{j+1} + \Psi_2 \Psi_{j+2} + \dots + \Psi_{q-j} \Psi_q \\ &= -\theta_j + \theta_1 \theta_{j+1} + \theta_2 \theta_{j+2} + \dots + \theta_{q-j} \theta_q < \infty \end{aligned} \quad (22)$$

También es importante mencionar que otra forma de escribir el modelo de medias móviles es mediante un análisis autorregresivo de orden infinito, es reversible, cuyo origen  $\theta(L) = 1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_p L^p$ , fuera del círculo unitario, debe ser satisfecho, dicho de otra manera, si  $L_1, L_2, \dots, L_q$ , son q raíces, sus valores absolutos deben ser mayores que uno si la raíz es real y el módulo tiene que ser mayor que la unidad si la raíz es compleja.

La expectativa matemática de la MA(q) de un modelo de media móvil viene dada por la fórmula:

$$E(Y_t) = \mu \quad (23)$$

La varianza del modelo MA (q)

$$\gamma_0 = \sigma_u^2 (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2) \quad (24)$$

La ecuación de autocovarianzas

$$\gamma_j = \begin{cases} (-\theta_j + \theta_1 \theta_{j+1} + \theta_2 \theta_{j+2} + \dots + \theta_{q-j} \theta_q) \sigma_u^2 & \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, q \\ 0 & \text{para } j > q \end{cases} \quad (25)$$

Y la fórmula de autocorrelación

$$\rho_j = \begin{cases} \frac{(-\theta_j + \theta_1 \theta_{j+1} + \theta_2 \theta_{j+2} + \dots + \theta_{q-j} \theta_q)}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2} & \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, q \\ 0 & \text{para } j > q \end{cases} \quad (26)$$

En conclusión, La ecuación de autocorrelación parcial

$$\begin{aligned} \phi_{11} &= \rho_1 \\ \phi_{22} &= \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\phi_{33} = \frac{\rho_1^3 + \rho_1\rho_2(2 - \rho_2) - \rho_2(1 - \rho_1^2)}{1 - \rho_2^2 - 2\rho_1^2(1 - \rho_2)}$$

...

$$\phi_{jj} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-2} & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{p-3} & \rho_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \dots & \rho_1 & \rho_p \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-2} & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{p-3} & \rho_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \dots & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}}$$

### IX.3.2.1. Particularidades del modelo MA (q)

**Estacionariedad:** Siempre estará estacionario la media móvil de orden q y cumple las tres condiciones de general estacionario.

**Reversibilidad:** el proceso de media móvil siempre es reversible, es decir, siempre que la raíz de la ecuación  $\theta(L) = 0$  esté fuera del círculo unitario, se puede escribir como un modelo  $AR(\infty)$ , en el que

$$\theta(L) = 1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_p L^p = 0 \quad (28)$$

**Correlograma simple:** Un gráfico de proceso simple MA(q) tiene los iniciales coeficientes de correlación  $\rho^k$  de  $k = 1$  a  $k = q$ , estos coeficientes no son nulos y los coeficientes restantes son cero. Esto significa que cuando el desfase temporal considerado es mayor que el pedido modelo, la variación automática se cancela. Por tanto, se dirá que el orden q es igual al proceso la memoria de proceso de la media móvil.

**Correlograma parcial:** el gráfico de correlación parcial del proceso MA(q) consta de un número infinito de coeficientes de correlación distintos de cero que decaen porque se suprime la combinación de funciones exponenciales y sinusoidales. Esto significa que la autocorrelación parcial no se anula y muestra un comportamiento sinusoidal que tiende a cero (raíces complejas).o un

comportamiento de amortiguamiento que de igual forma tiende a ser cero (raíces reales).

Al prestar atención en las características de los modelos  $AR(p)$  y  $MA(q)$ , se puede notar una cierta simetría llamada dualidad, porque el mismo proceso se puede representar como autorregresivo o promedio móvil, en términos de  $AR(p)$  se puede expresar como  $MA(\infty)$  y  $MA(q)$  se pueden expresar como  $AR(\infty)$ , lo importante es estas consiente de usar el modelo que más se acomode. La ventaja de utilizar una representación adecuada en cada caso es que se tiene un modelo de múltiples disposiciones.

En conclusión, la relación respectiva de los dos modelos se muestra en la tabla 8:

**Tabla 8.- Similitudes entre los modelos  $AR(p)$  y  $MA(q)$**

<b>Concepto</b>	<b><math>AR(p)</math></b>	<b><math>MA(q)</math></b>
<i>Expresión</i>	$\phi(L)y_t = \delta + u_t$	$y_t = \mu + \theta(L)u_t$
<i>Condición de estacionariedad</i>	Raíces de $\phi(L)$ en módulos mayores que 1	Siempre es estacionario
<i>Condición de invertibilidad</i>	Siempre es invertible	Raíces de $\theta(L)$ en módulo mayores que 1
<i>Correlograma simple</i>	Infinitos valores no nulos decreciendo según mezcla de exponenciales y sinusoidales amortiguadas	Coefficientes no nulos hasta el retardo q, el resto nulos
<i>Correlograma parcial</i>	Coefficientes no nulos hasta el retardo p, el resto nulos	Sinusoidales y Amortiguadas, además de infinitos valores no nulos decreciendo según mezcla de exponenciales.
<i>Modelo Dual</i>	$MA(\infty)$	$AR(\infty)$

### IX.3.3 Modelos ARMA

El modelo mixto con autorregresión parcial y media móvil ARMA (p, q) parciales se expresa de la siguiente manera:

$$Y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + u_t + \delta + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (29)$$

Y como en el caso anterior, se puede representar simplemente usando el polinomio rezagado:

$$\phi(L)y_t = \delta + \theta(L)u_t \quad (30)$$

Debido a que la mayoría de las veces los procesos estocásticos cubren una sección AR y una sección MA, debe satisfacer las circunstancias de estabilidad y reversibilidad como ya se había comentado en cada una de ellas. Esto quiere decir que su sección AR es estacionaria y su sección MA se dice que es irreversible. El patrón es fijo y reversible si su raíz  $\phi(L) = 1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p$  y las de  $\theta(L) = 1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_q L^q$  está fuera del círculo unitario. El patrón de promedio móvil autorregresivo mixto de cualquier orden es estacionario y reversible, pero las condiciones necesarias e escasos son las siguientes:

$$\begin{aligned} \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_q &< 1 \\ \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p &< 1 \end{aligned} \quad (31)$$

Además de la estacionalidad y la reversibilidad, se supone que la raíz  $q$  para  $\theta(L) = 0$  y la raíz  $p$  para  $\phi(L) = 0$  no son disyuntivas, en otras palabras, no tienen raíces habituales. Tomando estos contextos, la varianza del modelo ARMA (p, q) y la expectativa matemática se determinan como:

Esperanza matemática

$$\mu = \frac{\delta}{1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p} \quad (32)$$

Varianza

$$\gamma_0 = \frac{\sigma_u^2(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2 - 2\phi_1\theta_1 - 2\phi_2\theta_2 - \dots - 2\phi_h\theta_h)}{1 - \phi_1^2 - \phi_2^2 - \dots - \phi_p^2} \quad (33)$$

Ecuaciones de autocovarianzas

$$\gamma_j = \begin{cases} \phi_1\gamma_0 + \phi_2\gamma_1 + \dots + \phi_p\gamma_{p-1} - \theta_1\sigma_u^2 - \theta_2E(\tilde{y}_{t-1}u_{t-2}) - \dots - \theta_qE(\tilde{y}_{t-1}u_{t-q}) & \text{para } j = 1 \\ \phi_1\gamma_1 + \phi_2\gamma_0 + \dots + \phi_p\gamma_{p-2} - \theta_2\sigma_u^2 - \theta_3E(\tilde{y}_{t-1}u_{t-3}) - \dots - \theta_qE(\tilde{y}_{t-2}u_{t-q}) & \text{para } j = 2 \\ \dots & \dots \\ \phi_1\gamma_{q-1} + \phi_2\gamma_{q-2} + \dots + \phi_p\gamma_{p-q} - \theta_q\sigma_u^2 & \text{para } j = q \\ \phi_1\gamma_{j-1} + \phi_2\gamma_{j-2} + \dots + \phi_p\gamma_{p-q} & \text{para } j > q \end{cases} \quad (34)$$

Ecuaciones de autocorrelaciones

$$\rho_j = \begin{cases} \phi_1 + \phi_2\rho_1 + \dots + \phi_p\rho_{p-1} + \frac{1}{\gamma_0}[-\theta_1\sigma_u^2 - \theta_2E(\tilde{y}_{t-2}u_{t-2}) - \dots - \theta_qE(\tilde{y}_{t-1}u_{t-q})] & \text{para } j = 1 \\ \phi_1\rho_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p\rho_{p-2} + \frac{1}{\gamma_0}[-\theta_2\sigma_u^2 - \theta_3E(\tilde{y}_{t-2}u_{t-3}) - \dots - \theta_qE(\tilde{y}_{t-3}u_{t-q})] & \text{para } j = 2 \\ \dots & \dots \\ \phi_1\rho_{p-1} + \phi_2\rho_{p-2} + \dots + \phi_p\rho_{p-q} + \frac{1}{\gamma_0}\theta_q\sigma_u^2 & \text{para } j = q \\ \phi_1\rho_{j-1} + \phi_2\rho_{j-2} + \dots + \phi_p\rho_{j-q} & \text{para } j > q \end{cases} \quad (35)$$

### IX.3.3.1. Particularidades del modelo ARMA(p,q)

**Estacionariedad:** Solamente cuando todas las raíces del polinomio autorregresivo ( $\phi(L) = 0$ ) se hallan externo del círculo unitario en el plano complejo, el proceso ARMA(p,q) es estacionario.

**Reversible:** El proceso ARMA(p,q) es reversible únicamente cuando la raíz de su polinomio de media móvil ( $\theta(L) = 0$ ) se encuentran externo del círculo unitario en el mapa complejo.

**Autocorrelación:** La ecuación de autocorrelación no es nula, aunque tiende a ser cero a medida que aumenta el retardo. Por lo tanto, la retentiva de este tipo de factores es ilimitada. La presencia del componente de media móvil en el modelo

ARMA (p, q) modifica al valor de la primera autocorrelación  $q$  ( $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_q$ ), solo la parte autorregresiva afecta a la autocorrelación restante. En particular, el análisis de la función de la autocorrelación determina que después de que se supera el orden de la media móvil, la autocorrelación del modelo ARMA (p, q) se actúa como en el modelo AR (p).

**Gráfica de correlación simple:** cuando la gráfica de la autocorrelación muestra las autocorrelaciones con  $q$  llegando al divergente  $q$ , y se encuentran influenciadas por las partes de autocorrelación y promedio móvil del modelo, luego su forma coincide con AR(p), lo que también significa, si el origen es real, el comportamiento decrece a cero sin desvanecimiento o es sinusoidal, pero también decrementa a cero si el origen o raíz es complejo.

**Gráfica de correlación parcial:** La forma gráfica de la función de autocorrelación parcial se desvanecerá hasta cero, debido a que la función de autocorrelación parcial no desaparece debido a que el modelo ARMA(p,q) incluye el modelo MA(q) como caso especial.

El modelo ARMA permite la máxima flexibilidad con muy pocos parámetros, y el orden de p y q rara vez excede de 2.

#### **IX.3.4 Modelo ARIMA (p,d,q)**

Existen un conjunto de modelos de series de tiempo que permiten hacer análisis de datos (Bowerman, 2009; Guerrero, 2003; Chatfield, 2003; Hildebrand, 1998) No obstante, los modelos ARIMA se distinguen por su simplicidad y utilidad en el modelado y pronóstico. Por ejemplo, estos modelos se aplicaron describir y predecir una serie de comportamientos mensuales relacionados con la producción de leche reportados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2010). Por lo tanto, también es posible presentarlo de manera que sean utilizados para las variables climatológicas a estudiar.

En los modelos ARMA, incluyen una composición de condiciones autorregresivas (p AR) y de promedio móvil (q MA). Considerando a la parte AR, la cual modela el

efecto de los valores de las series anteriores ( $y_{t-1}$  y anteriores) y la parte MA, la cual modela el efecto del ruido sobre los valores de las series anteriores ( $u_{t-1}$  y anteriores) junto con el término  $u_t$  correspondiente a el nuevo valor del estimador  $y_t$ . La ventaja de estos modelos sobre los propuestos en la fórmula clásica es que son muy simples (suma de términos).

El carácter I que surge de la estructura completo del modelo ARIMA y pertenece al último procedimiento a realizar, luego de determinar el tipo de modelo y estimar sus coeficientes, se restablecerán las características iniciales de la serie de datos en adelante. transiciones a un estado estacionario. Este proceso inverso a menudo se denomina **integración** y se agrega su letra inicial para completar el nombre.

Si se tiene la serie  $y_t$  y se supone que no satisface los requisitos de estacionalidad de la media y la varianza. Para obtener el modelo ARIMA, es ineludible emplear algunas transformaciones que conviertan la serie temporal en una serie estática.

Estas transformaciones están determinadas por discriminación en serie continua es necesario especificar el parámetro d.

Si diversificamos  $y_t$  una vez, obtenemos el modelo con secuencia modificado

$$w_t = y_t - y_{t-1} \quad (36)$$

En donde,

$$w_t = \Delta y_t = y_t - y_{t-1} = (1 - L)y_t \quad (37)$$

Para distinguir entre series temporales, pasamos de  $y_t$  al proceso  $w_t$ . En este momento, se considera el caso opuesto de obtener  $y_t$  a partir de  $w_t$ . Por sustitución continua, podemos obtener

$$\begin{aligned} y_t &= w_t + y_{t-1} = w_t + w_{t-1} + y_{t-2} = w_t + w_{t-1} + w_{t-2} + y_{t-3} = \dots \\ &= w_t + w_{t-1} + w_{t-2} + w_{t-3} \dots \end{aligned} \quad (38)$$

Y conseguir así

$$y_t = w_t + w_{t-1} + w_{t-2} + w_{t-3} \quad (39)$$

Como se puede observar, el proceso  $y_t$  se logra de monto o "integrando" el proceso  $w_t$ .

Esta integración  $y_t$  se denomina integral autorregresiva de media móvil o ARIMA(p, d, q) para abreviar, y el proceso estacionario ARMA(p, q)  $w_t$  se obtiene tomando la diferencia de orden d.

La fórmula generalizada del modelo ARIMA (p, d, q) es

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \phi_2 w_{t-2} + \dots + \phi_p w_{t-p} + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \theta_2 u_{t-2} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (40)$$

En el cual

$$w_{t-j} = \Delta^d y_{t-j} = (1 - L)^d y_{t-j} \quad \text{para } j = 0, 1, 2, 3, \dots, p \quad (41)$$

En resumen, utilizando el operador de retardo polinomial definido en la sección anterior, podemos escribir:

$$\phi(L)w_t = \theta(L)u_t \quad (42)$$

Por lo tanto

$$w_t = \Delta^d y_t = (1 - L)^d y_t \quad (43)$$

El estocástico general es establecido por el modelo ARIMA (p, d, q) complejo. Entonces, si  $p = d = 0$ , tenemos el modelo ARMA (0,0, q) o MA (q), si  $q = d = 0$ , tenemos el modelo ARMA (p, 0, 0) ya discutido anteriormente o el modelo AR (p). Por otro lado, si  $d = 0$ , tenemos un modelo ARMA (p, q) o ARMA (p, 0, q).

Otros probables casos son:

- a)  $p = q = 0; d = 1 \rightarrow ARIMA(0, d, 0)$  o "paseo aleatorio"
- b)  $p = d = q = 0$  (y  $\delta = 0$ )  $\rightarrow ARIMA(0, 0, 0)$  o "ruido blanco"
- c)  $p = 0 \rightarrow ARIMA(0, d, q)$  o IMA(d, q)

d)  $q = 0 \rightarrow ARIMA(p, d, 0)$  o  $ARI(p, d)$

En los mayores de los casos de las series temporales muestran una predisposición alcista o bajista. Esta tendencia de la serie (media no fija) puede ser eliminada por la diferencia implícita en el modelo ARIMA. También se puede obtener la dispersión de las observaciones con respecto a la media no se fija en el tiempo, o bien, observar la tendencia de la varianza. Esta tendencia no puede ser superada por diferenciación, y es apropiado transformar la serie con el logaritmo natural.

La probabilidad de tal serie de transformaciones se puede definir ampliamente con el uso de la normalización de Box-Cox. Por lo tanto, el modelo ARIMA más común se construye del siguiente modo:

$$\phi(L)\Delta^d y_t^{(\lambda)} = \delta + \theta(L)u_t \quad (44)$$

O también

$$\phi(L)(1-L)^d(y_t^{(\lambda)} - \mu) = \theta(L)u_t \quad (45)$$

Por ende  $\mu$  es la media de  $y_t^{(\lambda)}$ , siendo:

$$y_t^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y_t^\lambda - 1}{\lambda} & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \ln y_t & \text{para } \lambda = 0 \end{cases} \quad (46)$$

Si lo limitamos en  $\lambda = 1$  y  $\lambda = 0$ , se obtiene una serie sin transformación de las variables (serie original) o una serie transformada con el logaritmo Neper aplicado.

#### **IX.3.4.1. Modelos ARIMA estacionales**

Los modelos teóricos para series temporales no estacionales se han explicado en las secciones anteriores. Fuera de ese punto, es común encontrar series de tiempo estructuradas que incluyen conductas estacionales y regulares.

Hay un tipo particular de inestabilidad en el proceso estacional de ARIMA, llamado estacionalidad. El comportamiento estacional es la repetición normal de patrones de comportamiento en una serie se clasifican en mensuales, semestrales,

anuales, etc. Estos comportamientos envuelven inestabilidad en la secuencia ya que implican comportamientos sistemáticamente diferentes en diferentes momentos del ciclo. El proceso de exhibir este comportamiento se puede arreglar usando el operador discriminante estacional, es decir, usando la diferencia estacional  $D$ , que se llama el orden de las diferencias estacionales, rara vez mayor que uno. La forma general de dicho modelo representado por  $ARIMA(P, D, Q)_s$  es:

$$w_t = \Phi_1 w_{t-s} + \Phi_2 w_{t-2s} + \dots + \Phi_P w_{t-Ps} + \delta + u_t - \theta_1 u_{t-s} - \theta_2 u_{t-2s} - \dots - \theta_Q u_{t-Qs} \quad (47)$$

En el cual:

$w_t = \Delta_s^D y_t = (1 - L^s)^D y_t$ , que se puede expresar como:  $\Phi_P(L^s)w_t = \delta + \Theta_Q(L^s)u_t$ ;  $\Theta_Q(L^s) = 1 - \theta_1 L^s - \theta_2 L^{2s} - \dots - \theta_Q L^{Qs}$ , es el operador de retardo estacional del media del modelo estacional  $MA(Q)_s$  y  $\Phi_P(L^s) = 1 - \Phi_1 L^s - \Phi_2 L^{2s} - \dots - \Phi_P L^{Ps}$  es el operador de retardo del modelo de regresión estacional automática  $AR(P)_s$ . Si expresamos el modelo  $ARIMA(P, D, Q)_s$  como  $(1 - \Phi_1 L^s - \Phi_2 L^{2s} - \dots - \Phi_P L^{Ps})(1 - L^s)^D y_t = (1 - \theta_1 L^s - \theta_2 L^{2s} - \dots - \theta_Q L^{Qs})\varepsilon_t$ , entonces asumimos que  $\varepsilon_t$  viene formado por un proceso  $ARIMA(p, d, q)$ , es decir  $(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p)(1 - L)^d \varepsilon_t = (1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_p L^p)u_t$ , siendo  $u_t$  un ruido blanco. Si sustituimos el segundo en la primera ecuación, obtenemos un patrón estacional general que llamamos  $ARIMA(p, d, q) \cdot (ARIMA(P, D, Q)_s)$  y que establecemos la ecuación como:

$$\begin{aligned} (1 - \Phi_1 L^s - \Phi_2 L^{2s} - \dots - \Phi_P L^{Ps})(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p)(1 - L^s)^D (1 - L)^d y_t \\ = (1 - \theta_1 L^s - \theta_2 L^{2s} - \dots - \theta_Q L^{Qs})(1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_p L^p)u_t \end{aligned} \quad (48)$$

### IX.3.5 Comprobación de autocorrelación

Es un término estadístico que se utiliza para describir la presencia o ausencia de correlación en los datos de las series temporales, indicando, si las observaciones pasadas influyen en las actuales.

Por tanto, se puede decir que la **autocorrelación** hace relación cuando una variable toma valores a lo largo del tiempo que no son independientes entre sí, sino que un valor dado depende de valores anteriores.

El problema de la autocorrelación se denomina también frecuentemente de “**correlación serial**”.

Para medir la autocorrelación se suele usar:

- La función de autocorrelación
- La función de autocorrelación parcial

#### **IX.3.5.1. Ecuaciones de la autocorrelación simple (ACF)**

La función de autocorrelación (ACF) tiene como objetivo

- Medir la correlación entre dos variables que están espaciadas por k periodos.
- Medir el grado de relación lineal entre dos variables de un mismo proceso estocástico.

La autocorrelación mide la correlación entre dos variables que están espaciadas por k periodos.

$$\rho_j = \text{corr}(X_j, X_{j-k}) = \frac{\text{cov}(X_j, X_{j-k})}{\sqrt{V(X_j)}\sqrt{V(X_{j-k})}} \quad (49)$$

La función de autocorrelación simple tiene las propiedades siguientes:

- $\rho_0 = 1$
- $-1 \leq \rho_j \leq 1$
- *Simetria*  $\rho_j = \rho_{-j}$

#### **IX.3.5.2. Ecuaciones de la autocorrelación parcial (PACF)**

La función de autocorrelación parcial (PACF) tiene como objetivo:

- Medir la correlación entre dos variables con k periodos de diferencia cuando no se tiene en cuenta la relación por rezagos intermedios entre las dos variables.
- Medir la autocorrelación que existe entre dos variables k periodos de diferencia, independientemente de los posibles efectos de las variables intermedias.

El ACF se usa para determinar el proceso de promedio móvil (MA) en el modelo ARIMA, y el PACF se usa para determinar el valor de la parte de autorregresión (AR) del proceso.

Los gráficos generados a partir de estas funciones se denominan histogramas de correlación y contienen bandas con intervalos de confianza del 95 %.

$$\pi_j = \text{corr} \left( X_j, \frac{X_{j-k}}{X_{j-1}X_{j-2} \dots X_{j-k+1}} \right) = \frac{\text{cov}(X_j - \hat{X}_j, X_{j-k} - \hat{X}_{j-k})}{\sqrt{V(X_j - \hat{X}_j)} \sqrt{V(X_{j-k} - \hat{X}_{j-k})}} \quad (50)$$

#### IX.4. Modelo de disolución de rocas calizas

Usando estas relaciones teóricas, Se puede postular una función para calcita genérica, válida para pH de precipitación en el rango 3-5:

$$R = L_v * PP + 0.016[H^+]PP + 0.18(V_{dS}SO_2 + V_{dN}HNO_3) \quad (51)$$

Donde R es la tasa de recesión como  $\mu\text{m}/\text{Año}$ ;  $L_v$  es el valor de Lipfert, que normalmente es  $18.8 \mu\text{m}$  la cual se basa en la solubilidad de la calcita en equilibrio con 330 ppm de  $\text{CO}_2$  con temperatura ambiente de  $10^\circ\text{C}$ . Sin embargo, para condiciones de estudio aunque no te tienen el mismo comportamiento climatológico que el modelo indica, se mantendrá con valor propuesto por Liferd pues artículos como Castillo-Miranda et al., 2017 toman este valor, dado que la variación del coeficiente es mínimo, aun con nuevos valores de  $\text{CO}_2$  y temperatura;  $PP$  es la precipitación anual  $\text{m}/\text{Año}$ ;  $V_{dS}$  y  $V_{dN}$  son velocidades de

deposición,  $\text{SO}_2$  y  $\text{HNO}_3$  son concentraciones como  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $[\text{H}^+]$  es la concentración como  $\mu\text{mo}/\text{l}$  (Lipfert, 1989b).

La ecuación anterior se ha utilizado para determinar la capacidad de una superficie para absorber un gas depositado. Sin embargo, hay dos procesos que son forzados para que se provoque la deposición seca. El contaminante debe entregarse aerodinámicamente a la superficie, la cual debe absorber el polutante a medida que este es transferido. En los modelos atmosféricos, estos dos procesos a menudo se consideran resistencias en serie. Por tanto, ambas resistencias deben ser favorables para que se deposite una sustancia (Lipfert, 1989a).

#### **IX.4.1 Obtención de Ácido Nítrico**

Las rocas carbonatadas consideradas en este estudio son mármol y piedra caliza. Además, el ácido nítrico no se mide comúnmente en las redes de monitoreo de la calidad del aire. Por tanto, la disponibilidad de datos es limitada. La siguiente función empírica, derivada del proyecto MULTI-ASSESS, el cual permite apreciar el ácido nítrico a partir de datos de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , Humedad relativa (Rh) y temperatura (K) (Kucera, 2005):

$$[\text{HNO}_3] = 516 \cdot e^{-3400 / (T + 273)} ([\text{NO}_2] \cdot [\text{O}_3] \cdot \text{Rh})^{0.5} \quad (52)$$

Donde  $[\text{HNO}_3]$  = concentración de  $\text{HNO}_3$ ; T es la temperatura en  $^\circ\text{C}$ ;  $[\text{NO}_2]$  = concentración de  $\text{NO}_2$ ;  $[\text{O}_3]$  = concentración de  $\text{O}_3$ ; Rh = humedad relativa (%). Todas las unidades de concentración están en  $\mu\text{m m}^{-3}$ .

#### **IX.4.2 Valores típicos de las velocidades de deposición seca de $\text{SO}_2$ .**

La discusión anterior se ha ocupado de la capacidad de una superficie para absorber un gas depositado. Sin embargo, hay dos procesos que son necesarios para que se produzca la deposición seca. El contaminante debe entregarse aerodinámicamente a la superficie, y la superficie debe poder absorber el contaminante a medida que se entrega. En los modelos atmosféricos, estos dos procesos a menudo se consideran resistencias en serie. Por tanto, ambas

resistencias deben ser favorables para que se deposite una sustancia (Lipfert, 1989a).

La Tabla 9 muestra algunas velocidades de deposición seca para  $\text{SO}_2$  ( $V_{ds}$ ) que ilustran el papel de la reactividad superficial. Tenga en cuenta que La mayoría de las determinaciones experimentales de  $V_{ds}$  midieron la superficie combinada y resistencias aerodinámicas. Sin embargo, en este caso, muchos de los valores mostrados (incluyendo el más alto y el más bajo) se obtuvieron de un reactor de flujo, lo que permitió determinar la resistencia superficial de forma independiente.

**Tabla 9.- Velocidades típicas de deposición seca de  $\text{SO}_2$  (máxima, en condiciones de luz diurna)**

Superficie	$V_{ds}$ (cm/s)
Cemento	1.6-2.5
Placas de sulfatación de plomo	1.4
Zinc (húmedo)	1.1-1.9
Caliza	0.3-1.3
Pinturas	0.1-0.6
Madera (desnuda)	>0.1
Asfalto	0.04

#### **IX.4.3 Valores típicos de las velocidades de deposición seca de $\text{HNO}_3$**

Se llama la atención sobre las velocidades de deposición de  $\text{HNO}_3$  utilizadas en la, que históricamente se ha centrado en el daño de los materiales debido a las tentaciones de  $\text{SO}_2$  en los promedios de día y noche. A pesar de las incertidumbres, parece que se han justificado, especialmente porque los niveles de  $\text{SO}_2$  eran en general mucho más altos en el pasado. Para áreas alejadas de las fuentes de contaminación por combustión de combustible, otros contaminantes pueden ser más importantes.

**Tabla 10.- Niveles típicos de concentración de contaminantes del aire y tipos de fuentes**

Contaminación	Típico concentración (µg/ m3)	Vd a zinc (cm/s)	Flux g/my	Tipos de fuentes de contaminantes		
				Puntual	Área	Regional
SO <sub>2</sub> *	30-40	0.25	2.4-3.2	x	x	x
NO	50-130	Bajo		x	x	
NO <sub>2</sub>	50-65	0.03	0.5-0.6	x	x	x
O <sub>3</sub>	40-50	<0.1	<1.3		x	x
HNO <sub>3</sub>	1.5-2.1	0.7-1.7	0.3-1.2		x	x
HCHO *	12-25	0.08-015	0.3-1.2		x	x
HCl	1.5-6	0.7	0.3-1.3	x		
H <sub>2</sub> S	0.5	0.02	0.003	x	x	
SO <sub>4</sub>	2-9	0.05	0.03-0.14	x	x	x
Partículas:						
Fina	10-20	0.05	0.16-0.32	x	x	x
grueso	20-100	1-3	6-95	x		
H <sub>2</sub> O						
lluvia			0.5-1x10 <sup>6</sup>			
goteo de rocío			0.025-0.5x10 <sup>6</sup>			

\* Para la deposición estimada de SO<sub>2</sub> y formaldehído (HCHO) en superficies mojadas, sus velocidades de deposición se han multiplicado por 0.25 para dar cuenta del tiempo estimado de humedad de la superficie en un área urbana. Nota: Las concentraciones en el aire se basan en promedios nacionales y regionales de EE. UU. Cuando sea posible y no representan necesariamente los peores casos. Vd para HCl se asume igual que para HNO<sub>3</sub> como una aproximación de primer orden.

#### IX.4.3.1. Valores de deposición recomendados de SO<sub>2</sub> y HNO<sub>3</sub>

En los modelos atmosféricos, estos dos procesos a menudo se consideran resistencias en serie. Por tanto, ambas resistencias deben ser favorables para que se deposite una sustancia (Lipfert, 1989a). Con relación a lo anterior, la Tabla 1 muestra las tasas de deposición utilizadas en la función de Lipfert.

Tabla 11.- Tasa de deposición de SO<sub>2</sub> (V<sub>ds</sub>) y HNO<sub>3</sub> (V<sub>dn</sub>) medida en pruebas de exposición de campo (Sabbioni, 2003).

TASA DE DEPOSICIÓN (M S <sup>-1</sup> )	MÁRMOL	PIEDRA CALIZA DE PORTLAND
V <sub>DS</sub>	0.38	0.89
V <sub>DN</sub>	0.32	0.54

## **CAPITULO X. METODOLOGIA**

### **X.1. Recopilación de información**

Se recopiló, integró y procesó la información que pudiera ser útil para los propósitos de estudio. Esta información se tomó de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés), entre otros. Siendo esta información de dominio público. Además, se incluirá artículos científicos JCR que sean adquiridos por la universidad.

Entre la información recopilada, se puede obtener datos de la precipitación, temperatura, humedad, dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido nítrico, mencionado tanto en el CAPITULO VIII y CAPITULO IX de este documento.

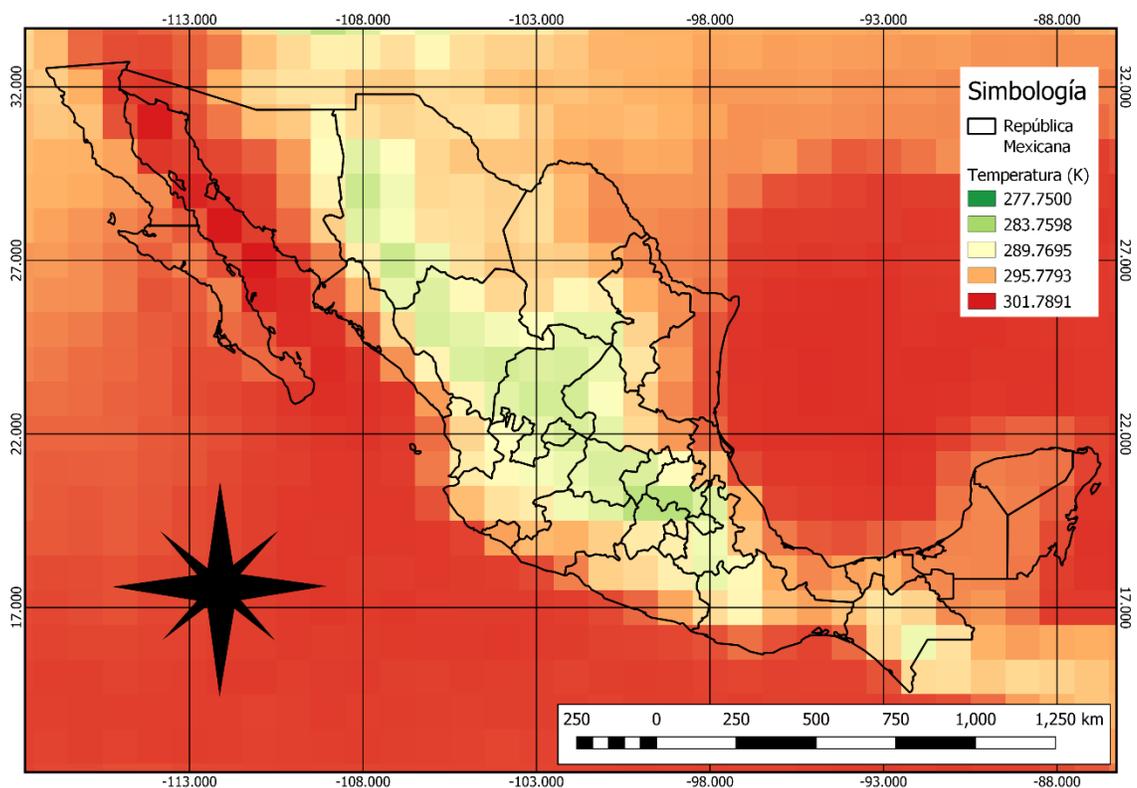
#### **X.1.1 Recolección de estimaciones satélites**

Entre la información recabada para el estudio es requerido las estimaciones de variables climatológicas y parte de la información encuentra almacenada en el banco de datos de la NASA, en plataformas como Giovanni, Ges Disc, Daymet, etc. Sin embargo, para poder en claro características de los datos es recomendable reconocer el valor de los datos con el fin de tener la validez necesaria para usar en estudios de este tipo.

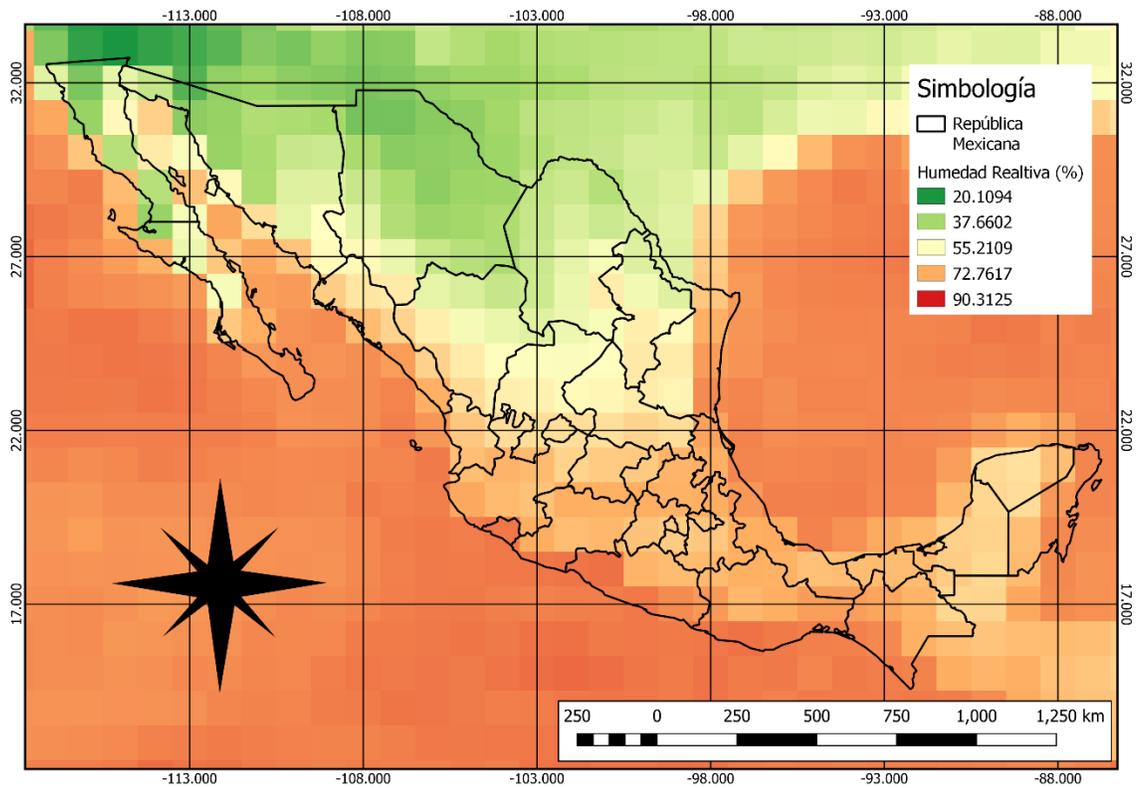
##### **X.1.1.1. Humedad Relativa y Temperatura (AIRS)**

Para las variables de Humedad y Temperatura, se utilizó la sonda infrarroja atmosférica (AIRS por sus siglas en Inglés), como un espectrómetro de rejilla (R = 1200) a bordo de la segunda plataforma de órbita polar del Sistema de Observación de la Tierra (EOS), EOS Aqua. El producto de recuperación en cuadrícula mensual de nivel 3 exclusivo de AIRS contiene medios de recuperación

estándar, desviaciones estándar y recuentos de entrada. Cada archivo cubre un mes calendario. Los valores medios son simplemente los medios aritméticos de los productos diarios, ponderados por el número de recuentos de entrada para cada día en ese cuadro de cuadrícula. Los parámetros geofísicos han sido promediados y agrupados en celdas de cuadrícula de 1 x 1 grado, desde -180.0 a +180.0 grados de longitud y desde -90.0 a +90.0 grados de latitud. Para cada mapa de cuadrícula de valores medios de punto flotante de 4 bytes, hay un mapa de punto flotante de 4 bytes correspondiente de desviación estándar y un mapa de recuentos de cuadrícula de números enteros de 2 bytes. El mapa de recuentos proporciona al usuario la cantidad de puntos por contenedor que se incluyeron en la media de la humedad relativa en porcentaje y temperatura en grados kelvin con un periodo de tiempo del 2002 al 2021.



**Figura 15.-Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de Temperatura (AIRS)**



**Figura 16.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de Humedad Relativa (AIRS)**

### **X.1.1.2. Precipitación (GPM IMERG)**

Este procedimiento se basa de las recuperaciones integradas de múltiples satélites para GPM (IMERG) en un algoritmo unificado de los Estados Unidos Americanos (EUA). Este modelo ha pasado por varias versiones hasta el actual considerada como la versión secundaria 06B.

El análisis se realiza con el modelo de Goddard (GPROF2017) para calcular las estimaciones de precipitación de varios sensores de microondas pasivos por satélite (PMW) relacionados con la precipitación que componen el sistema GPM. Con posterioridad este se cuadrícula y combina con el algoritmo de radar y radiómetro Ku GPM. Los productos CORRA se calibran entre sí y se fusionan en el campo cada media hora a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (aproximadamente  $10 \times 10$  km). Se debe de

tener en cuenta que CORRA ajustará los productos mensuales de los indicadores satelitales (SG) del Proyecto de climatología de precipitación global (GPCP) en océanos de alta latitud y zonas tropicales para corregir las desviaciones conocidas.

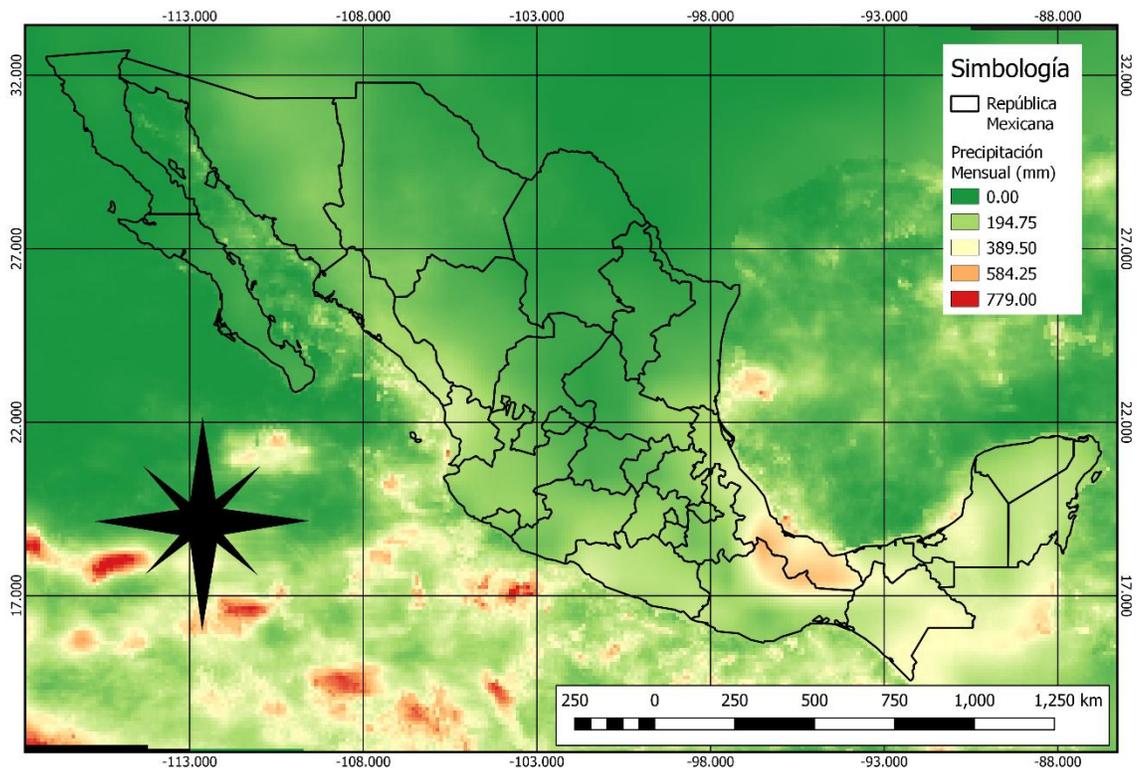
El valor estimado de PMW calibrado cada media hora puede ingresarse en el esquema de interpolación de tiempo lagrangiano del filtro Morphing-Kalman (CMORPH-KF) del Centro de Predicción Climática (CPC), o la precipitación a partir de información meteorológica. En la estimación de la cantidad, el sistema de clasificación de nubes de red neuronal artificial (PERSIANN-CCS) recalibrado el programa de teledetección. En paralelo, CPC ensambla el campo infrarrojo geográfico de fusión calibrado mutuamente con corrección de ángulo cenital y lo reenvía a PPS para ingresarlo al algoritmo PERSIANN-CCS (respaldado por el ciclo de recalibración asíncrono), y luego ingresarlo al esquema de deformación CMORPH-KF (Interpolación de tiempo cuasi lagrangiano).

La conversión (respaldada por el ciclo de actualización de peso asíncrono KF) utiliza estimaciones de PMW e IR para crear estimaciones cada media hora. Al maximizar la investigación moderna y el análisis retrospectivo de aplicaciones, el modelo MERRA-2 y la correlación del modo continuo por hora de vapor integrado verticalmente proporcionado por el modelo del Sistema de Observación de la Tierra Goddard se pueden utilizar para calcular el vector de movimiento convertido. El procesamiento directo de la versión 5 se utiliza para la ejecución en tiempo real (retardada) y la ejecución casi en tiempo real (anticipada y tardía) respectivamente. KF usa los datos convertidos como una "predicción" y la estimación IR como una "observación", y su peso depende del intervalo de tiempo fuera del tiempo de cruce de microondas. Después de aproximadamente 90 minutos de tiempo de sobrevuelo, la IR se vuelve importante. El sistema IMERG se ejecuta dos veces casi en tiempo real:

- Producto multisatélite "**temprano**" ~ 4 horas después del tiempo de observación usando solo morphing hacia adelante y producto multi-satélite

"tardío" ~ 14 h después del tiempo de observación, usando morphing hacia adelante y hacia atrás y una vez después de recibir el análisis de calibre mensual:

- Producto "**final**" del indicador satelital ~ 3,5 meses después del mes de observación, utilizando morphing hacia adelante y hacia atrás e incluyendo análisis mensuales del indicador.



**Figura 17.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de precipitación acumulada (MERRA-2)**

Actualmente, las estimaciones de media hora temprana y tardía casi en tiempo real no tienen una calibración final, mientras que, en la ejecución final en tiempo real, las estimaciones de media hora de múltiples satélites se ajustan para que sumen el satélite mensual de ejecución final. -Combinación de calibre. En todos los casos, la salida contiene varios campos que proporcionan información sobre

los datos de entrada, los campos intermedios seleccionados y la calidad de la estimación. En general, la precipitación calibrada completa, precipitación Cal, es el campo de datos elegido por la mayoría de los usuarios.

El período de registro actual es desde junio de 2000 hasta el presente (con un retraso de aproximadamente 3,5 meses).

### X.1.1.3. Dióxido de Azufre SO<sub>2</sub> (MERRA-2)

El análisis retrospectivo de la era moderna de la segunda edición de investigación y aplicación (MERRA-2) es la reanálisis atmosférica de la era de los satélites de la NASA utilizando el Modelo 5 del Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS-5). Su sistema de asimilación de datos aéreos (ADAS) versión 5.12.4. El proyecto MERRA se centra en el análisis climático histórico para varias escalas de tiempo meteorológicas y climáticas, y coloca los datos de observación EOS de la NASA en el entorno climático.

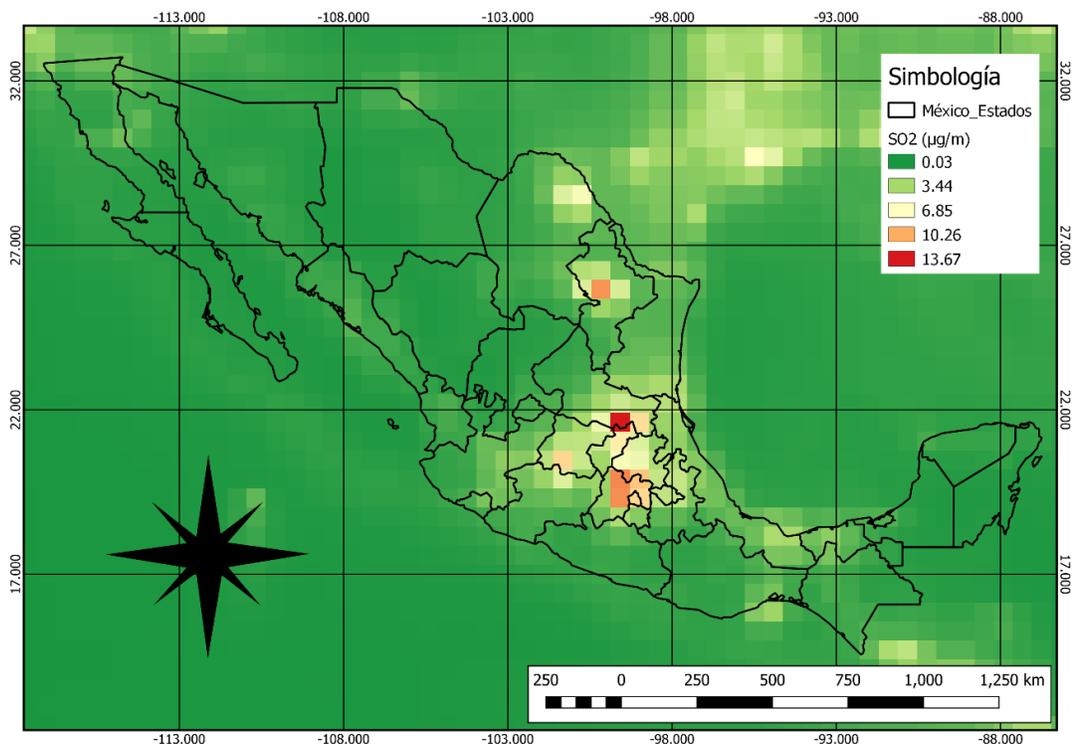


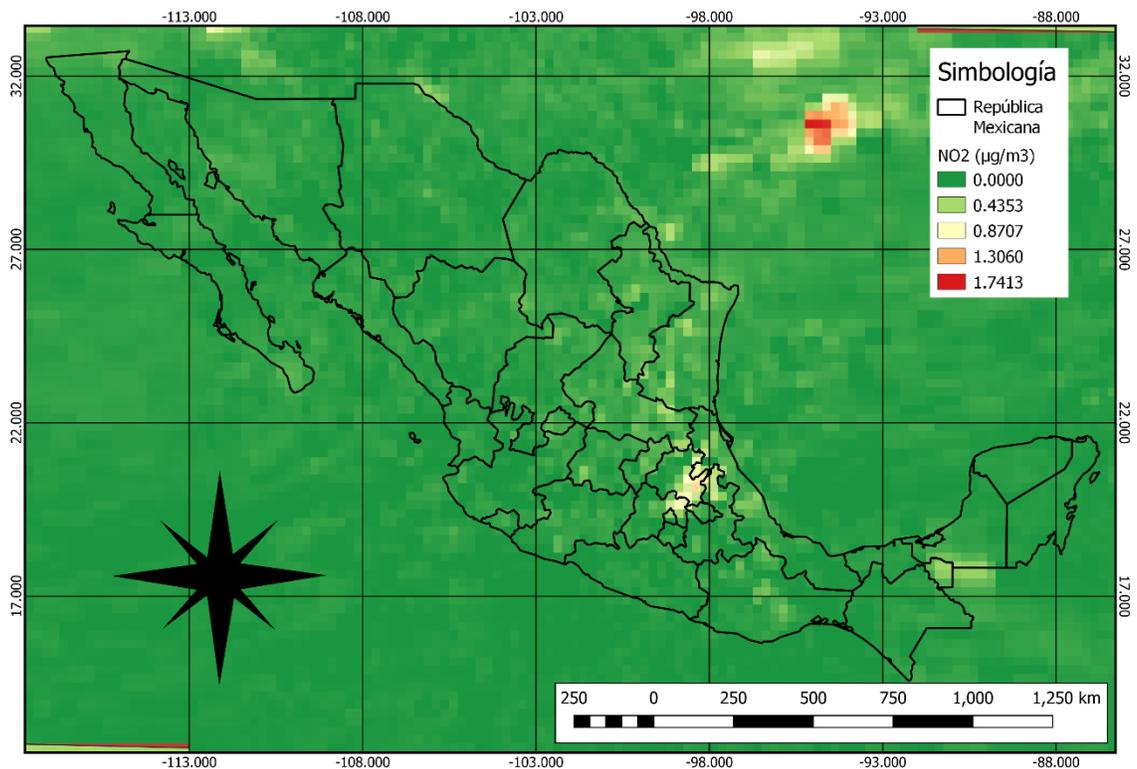
Figura 18.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de SO<sub>2</sub> (MERRA-2)

MERRA-2 se lanzó como un proyecto intermedio entre los datos antiguos de MERRA y el análisis del sistema terrestre de próxima generación planificado para un futuro reanálisis acoplada. Sin una inversión significativa para actualizar el programa de asimilación de datos de MERRA, el sistema carece de la capacidad de analizar las últimas observaciones. Además, desde que el sistema MERRA se congeló en 2008, el sistema GEOS5 ha logrado muchos avances. Por lo tanto, se implementó una nueva integración completa de reevaluación. MERRA-2 cubre el período desde 1980 hasta el presente y continúa realizando análisis climáticos continuos cuando los recursos lo permiten.

#### **X.1.1.4. Dióxido de Nitrógeno NO<sub>2</sub> (OMI/Aura L3)**

Para la obtención de la variable dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) útil en la investigación, se usó el análisis de los datos del producto OMI/Aura con ráster global diario de nivel 2G OMNO2G, que se basa en el producto OMNO2 de nivel de píxel OMI de nivel 2 NO<sub>2</sub>. Además, estos datos se pueden obtener de manera global a una calidad de nivel 2 especial en el que los datos de nivel de píxeles se agrupan en cuadrículas de 0.25 x 0.25 grados. Contiene los datos de todas las escenas L3 que tienen tiempo de observación entre las horas UTC de 00:00:00 y 23:59:59.9999. Todos los píxeles de datos que caen en un cuadro de eliminación se guardan sin promediar y se tiene registro del 2004 al año presente.

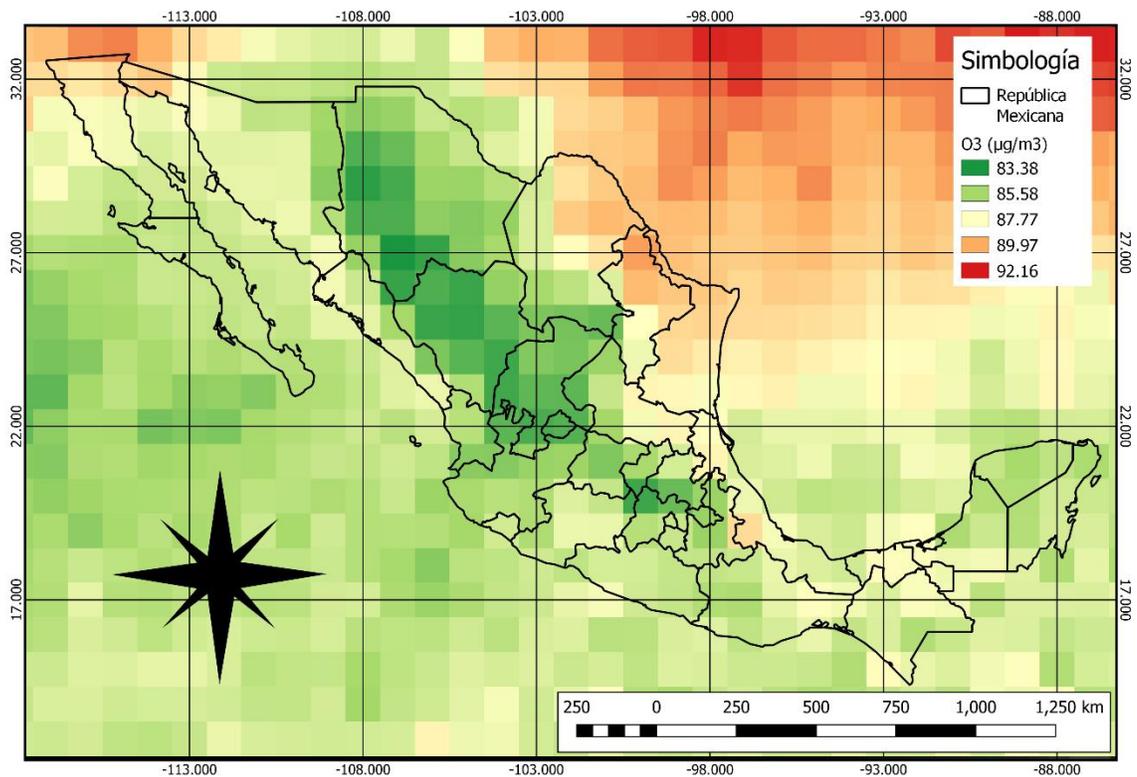
El dióxido de nitrógeno es una especie química importante tanto en la estratosfera, donde juega un papel clave en la química del ozono, como en la troposfera, donde es un precursor de la producción de ozono. En la troposfera, se produce en varios procesos de combustión y en rayos y es un indicador de mala calidad del aire.



**Figura 19.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de NO<sub>2</sub> (OMI/Aura L2)**

### **X.1.1.5. Ozono O<sub>3</sub> (OMI/Aura L2)**

Para la obtención de la variable ozono (O<sub>3</sub>) de la investigación, se usó el análisis de los datos del producto OMI/Aura, el cual es una imagen ráster global diario de nivel 2G OMTO3G, que se basa en el producto de ozono total de nivel 2 de OMI de nivel de píxel OMTO3. El producto OMTO3 es del algoritmo mejorado de TOMS versión 8 que esencialmente utiliza los datos de radiación ultravioleta a 317.5 y 331.2 nm, además tiene la característica de estar presente de manera global de nivel 2 espacial en el que los datos de nivel de píxel se agrupan en cuadrículas de 0.25 x 0.25 grados. Contiene los datos de todas las escenas L2 que tienen tiempo de observación entre las horas UTC de 00:00:00 y 23:59:59.9999. Todos los píxeles de datos que se encuentran en un cuadro de cuadrícula se guardan sin promediar y se tiene registro del 2004 al año presente.



**Figura 20.- Mapa ejemplo de imagen satelital mensual de O<sub>3</sub> (OMI/Aura L2)**

### **X.1.2 Caracterización de rocas y suelos de la región**

Para obtener las propiedades físicas de la roca (densidad, textura, color, resistencia, contenido de humedad, etc.), es necesario utilizar técnicas y pruebas de nivel de granulométrico, controles de perfil, secado al horno, etc. Debido a la necesidad de identificar las características que acrediten el tipo de roca utilizada en la construcción del sitio arqueológico. Además de realizar las pruebas químicas y orgánicas correspondientes para conocer la geología y ecología actual de la composición orgánica de la zona. (ASTM International, 2000)

#### **X.1.2.1. Interpretación visual de la roca para su caracterización**

En el estudio de la degradación de las ZA es obtener información sobre las características de la roca utilizada en la construcción y el macizo rocoso completo, por lo que una de las formas más fáciles de lograr este objetivo es utilizar algunas

características visuales para lograr identificar y clasificación de rocas (González et al., 2002) estos parámetros se encuentran divididos en dos grupos:

- **Representación de la cobertura:** Mediante la observación macroscópica y el análisis microscópico de la muestra, es fundamental conocer la estructura, composición, textura, porosidad, microfisuras y otras características.
- **Representación geológica de la roca:** incluyendo nombre, mineral, tipo de textura, tipo de cemento y grado de variación.

Dar a entender estos parámetros visuales es importante porque determinan las características básicas de la roca. Por ejemplo, el conocimiento de la disposición, rigidez y estructura cristalina de un cuerpo geológico puede inferir la respuesta de una roca al estrés ejercido por una fuerza externa sobre una parte. En el caso de este trabajo, se distinguirán los siguientes parámetros:

- **Color:** Con el fin de reducir la subjetividad de la designación de colores, se utiliza una tabla estandarizada. La paleta de Munsell se usa usualmente en las ciencias de la tierra y es posible se reconocer colores comunes (negro, gris o marrón). Se sabe de ante mano que el color es una de las características más comunes de un mineral, muy frecuente es una característica de diagnóstico inverosímil porque algunos minerales tienen múltiples colores (extraños) debido a un rastro de impurezas, aunque algunos minerales también pueden tener un color distintivo (color interior) (Tarbuck y Lutgens, 1999).

- **Tamaño de grano:** Tamaño de las partículas con medida en milímetros.
- **Estructura:** se establece la disposición y secuencia de cristales o racimos en una roca (Castro, 1989); puede ser homogéneo o en bloque, tira, curvo, esférico, cúbico, etc.

- **Distribución de los tamaños:** Se clarifica que si todas las partículas o cristales tienen el mismo tamaño o diámetro o varían en tamaño (grano uniforme, grano irregular, irregular).
- **Peso específico:** Es un valor numérico que expresa la relación entre el volumen y el peso de un mineral. En la zona de estudio, con un poco de práctica, es posible inferir la densidad aparente de una roca o mineral como solo sostenerla en la mano (sólido o liviano). Tomando en cuenta que los minerales metálicos son de dos a tres veces más densos que los minerales que forman las rocas ordinarias (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- **Textura:** Se describe como un conjunto de relaciones entre cristales, dependiendo del tamaño y forma de los cúmulos que componen la roca. Los nombres y criterios de textura que se planean usar, pueden variar según el tipo de roca presente en el área (Castro, 1989); la textura puede ser continua, vítrea, cristalina, deformada, clástica, etc.
- **Exfoliación:** Debido a la cristalinidad de la estructura de los minerales, algunos enlaces son más duros que otros, y la fisión es la tendencia de los minerales a romperse a lo largo del plano de estos enlaces débiles bajo presión. La estructura cristalina no debe confundirse con la escisión, ya que la primera es la forma mineral y la segunda es la forma preferida de descomposición mineral (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- **Fractura:** En términos de las grietas, Tarbuck y Lutgens (1999) demostraron que los minerales como el cuarzo que no se fracturan se denominan fracturas. Las grietas en superficies lisas, como vidrios rotos, indican un recinto agrietado.
- **Dureza:** Es un patrón que resiste la abrasión mineral o los rayones. Esta propiedad se establece rozando minerales de dureza conocida contra minerales de dureza desconocida y viceversa. (Tarbuck y Lutgens, 1999). Se han propuesto varias escalas para calcular la

dureza, sin embargo, la escala de Mohs se usa comúnmente (Tabla 12). Está formado por diez minerales de dureza conocida, que van desde el más blando con un valor de 1 hasta el más duro con un valor de 10, con un valor de 1 a 10; sin embargo, para este proyecto y considerando que para características observables se utilizarán únicamente el valor notado de dureza blanda, normal y dura a criterio del investigador.

**Tabla 12.- Tabla de dureza de Mohs (Tarbuck y Lutgens, 1999)**

<i>Mineral</i>	<i>Se raya con / raya a</i>	<i>Composición química</i>
1	Talco Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso Se puede rayar con la uña con más dificultad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita Se puede rayar con una moneda de cobre	$CaCO_3$
4	Fluorita Se puede rayar con un cuchillo de acero	$CaF_2$
5	Apatito Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	Ortosa Se puede rayar con una lija para el acero	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo Raya el vidrio	$SiO_2$
8	Topacio Rayado por herramientas de carburo de wolframio	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$
9	Corindón Rayado por herramientas de carburo de silicio	$Al_2O_3$
10	Diamante El material más duro en esta escala (rayado por otro diamante).	C

- **Brillo:** El brillo es la apariencia o disposición de la luz destellada por una superficie mineral (Tarbuck y Lutgens, 1999). El brillo se

considera como metal, vidrio, perla, brillante, plástico, color tierra, etc.

- **Producción:** Es la forma de colocación tridimensional de cristales adimensionales, clusters o policristalinos agregados en la roca (Castro, 1989); se puede clasificar en lineal, plano lineal, plano o isotrópico.
- **Porosidad:** La porosidad es la correlación del volumen total con el volumen que ocupan los huecos o vacíos en una roca (González et al., 2002), que se puede dividir en sólido, piedra pómez, espuma y esferulita.
- **Forma cristalina:** la reflexión de la disposición interna ordenada de los átomos es la expresión externa de la forma cristalina de un mineral (Tarbuck y Lutgens, 1999).

## **X.2. Monitoreo y evaluación experimental de materiales del inmueble arqueológico**

Con el fin de evaluar y contrarrestar el modelo matemático de capilaridad, se realizará un modelo físico del proceso en medios porosos, de tal manera que poder evaluar los efectos causados de la humedad en material constructivos de la ZA.

### **X.2.1 Características de sensor ARDUINO.**

Es necesario implementar equipo de software y hardware capaz de obtener resultados y recopilación de datos de características hidrológicas (Humedad y Temperatura).

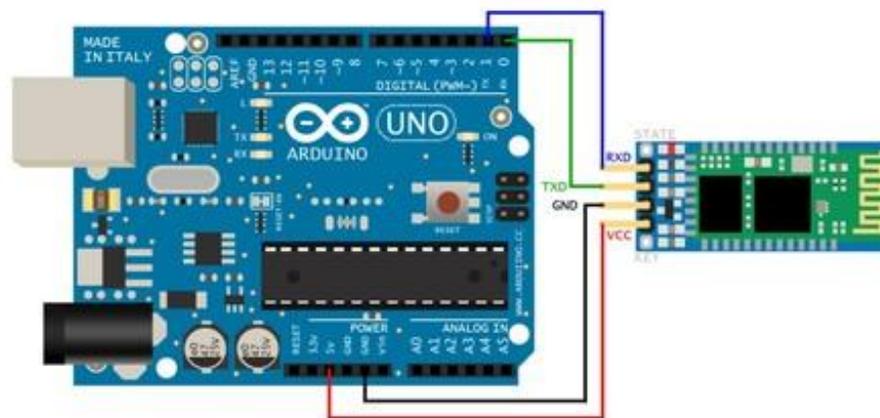
Alcanzar este objetivo requería una base conceptual para el equipo llamado Arduino, una plataforma electrónica patentada de libre acceso basada en software y hardware gratuitos, flexibles y fáciles de usar para desarrolladores e investigadores. El dispositivo admite la creación de varios tipos de microcontroladores para la comunidad de desarrolladores para diferentes propósitos.

Para utilizar una plataforma de este tipo, primero es necesario entrever el concepto de hardware y software de modo gratuito.

El Software libre o Freeware en sí mismo es un programa de computadora al que cualquiera puede acceder, por lo que cualquiera puede usarlo y modificarlo. Para poder manipular un Arduino, las desarrolladoras proporcionaron la plataforma Arduino IDE (Entorno de desarrollo integrado), un entorno de desarrollo que cualquier persona puede usar para desarrollar aplicaciones para la placa Arduino y así proporcionarles una variedad de herramientas.

El hardware de código abierto es un dispositivo cuyas especificaciones y esquemas de construcción son aprovechables para un público general, por lo tanto, cualquiera pueda copiarlos. Esto significa que Arduino proporciona una configuración en la que cualquier otra persona puede crear su propia placa, que puede variar, pero funciona igual con la misma configuración.

El proyecto nació en una ciudad de Italia en 2003 gracias a un grupo de estudiantes de la Escuela de Diseño de Interacción Ivrea que querían promover la accesibilidad y el uso de la electrónica y la programación. Hicieron esto para proporcionar a los estudiantes en línea una alternativa más económica a las populares estampillas BASIC, cuya impresión costaba más de \$100 en ese momento y no estaban disponibles para todos.



**Figura 21.- Diagrama de Equipo Arduino Uno con modulo bluetooth.**

El resultado es un Arduino, una placa electrónica que tiene todo lo necesario para conectar periféricos y módulos operacionales a las entradas y salidas del microcontrolador, y tiene la ventaja de ser amigable con cualquier equipo de cómputo, por ende, es probable en Windows, GNU/Linux y macOS. Este tiempo de programas, se adhiere a la filosofía de aprender haciendo, lo que significa que la mejor forma de aprender es jugar, practicar y con las propias manos.

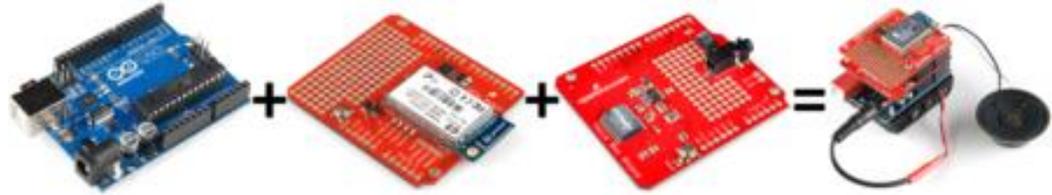
Arduino es un sistema electrónico basado en el microcontrolador ATMELEL el cual es un circuito integrado que logran almacenar procedimientos que puede escribir en un lenguaje de programación el cual genera ciertas instrucciones que le da paso seguido a la creación de programas que interactúan con los módulos de la placa.

El microcontrolador Arduino posee una interfaz de múltiples entradas, es decir, la conexión a través de la cual podemos conectar diferentes tipos de periféricos a la placa como sensor de humedad, sensor de temperatura, sensor de lluvia, entre muchos. La información sobre sus dispositivos conectados se remitirá al microcontrolador, que procesará los datos entrantes.

El tipo de dispositivo que puede usar para enviar datos a un microcontrolador depende mucho de para qué pretende usarlo. En este caso, sensores como DHT22, DS3231, MOD-MSDC, etc son utilizados.

También posee una interfaz de salida que permite la transmisión de los datos procesados en el Arduino a otros dispositivos. Estos periféricos la mayoría de las veces son pantallas o bocinas para reproducir los datos procesados, pero Arduino también es un proyecto en lugar de un modelo de placa determinado, lo que significa compartir el diseño subyacente. En su versión se pueden encontrar diferentes tipos de circuitos. Vienen en una variedad de tamaños, colores y formas para adaptarse a las necesidades del proyecto en el que está trabajando, pueden ser simples o tener funciones avanzadas. De hecho, la calidad tiene un precio, y

es importante determinar de antemano qué planea usar y hasta dónde llegará el dispositivo ya que en ocasiones de determina de placas o controladores.



**Figura 22.- Ejemplo de Estructura Arduino.**

### **X.2.2 Periféricos para utilizar**

Entre los múltiples sensores que incorpora el sistema ARDUINO en su gama UNO, es significativo delimitar cuáles serán los utilizados para la elaboración del equipo de monitoreo necesarios en la recopilación de datos humedad y temperatura de la ZA con el fin de analizar su comportamiento en distintos puntos de la región y poder realizar trabajos de interpolación como se muestra en la sección 8.3.

Estos no solo se limitan a tener sensores que midan los fenómenos hidrometeorológicos, puesto que a su vez es necesario contemplar el tiempo al momento de medir, el display que muestre los datos y no que no exista ningún error en la medición, equipo WIFI y bluetooth que permita la iteración del usuario con el aparato, entre otras más herramientas.

#### **X.2.2.1. Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22**

El DHT22 (AM2302) es un sensor digital de temperatura y humedad de bajo costo y alto rendimiento. Integra un sensor de humedad capacitivo y un termistor para medir el aire ambiente y mostrar los datos a través de una señal digital en el pin de datos (no tiene salida analógica) (natylaps mechatronics, 2019).

Usar el sensor DHT22 en la plataforma Arduino es simple tanto en software como en hardware. A nivel de software, existen bibliotecas de Arduino que admiten el protocolo de "bus único". En cuanto al hardware, solo necesitamos conectar el pin

de alimentación VCC a 3-5V, el pin GND a tierra (0V) y el pin de datos a los pines digitales del Arduino.

Cada sensor está calibrado de fábrica para los factores de calibración almacenados en su memoria OTP, lo que garantiza una alta estabilidad y confiabilidad a lo largo del tiempo. El protocolo de comunicación entre el sensor y el microcontrolador utiliza un solo hilo o cable, la longitud máxima recomendada del cable es de 20 m, preferiblemente un cable blindado. Proteja el sensor de la luz solar directa (radiación UV).

#### **Especificaciones:**

- Voltaje de funcionamiento: 3V - 6V CC
- Rango de medición de temperatura: -40 °C a 80 °C
- Precisión de la medición de temperatura:  $<\pm 0.5$  °C
- Resolución de temperatura: 0.1 °C
- Rango de medición de humedad: 0 a 100% HR
- Precisión de medición de humedad: 2% HR
- Resolución de humedad: 0.1% HR
- Tiempo de detección: 2 segundos
- Interfaz digital: un bus (bidireccional)
- Tamaño: 20\*15\*8mm
- Peso: 3 gramos.

#### **X.2.2.2. Módulo reloj en tiempo real DS3 231**

El DS3231 es un reloj de tiempo real de alta precisión con un oscilador de cristal compensado por temperatura (TCXO). Un oscilador de cristal integrado en el propio microchip, combinado con compensación de temperatura, garantiza una precisión a largo plazo del tiempo (GEEK FACTORY, 2019).

El RTC registra segundos, minutos, horas, día de la semana, día, mes y año, y la fecha se ajusta automáticamente al final del mes para meses con menos de 31

días, incluida la corrección por años bisiestos con el fin de obtener los datos de registro histórico de la medición de las variables.

**Especificaciones:**

- El voltaje de la fuente de alimentación es de 3,0 a 5 voltios.
- RTC de alta precisión, maneja todas las funciones de mantenimiento de fecha/hora.
- La precisión es de  $\pm 2$  ppm sobre una temperatura de funcionamiento de 0 °C a +40 °C.
- Este módulo tiene un reloj DS3231 y una memoria EEPROM I2C.
- Módulo con respaldo de batería (suministrado). • Registre segundos, minutos, horas, días de la semana, días, meses y años, con compensaciones de año bisiesto hasta 2100.
- El DS3231 contiene un sensor de temperatura con una precisión de +/- 3 grados Celsius.
- 2 alarmas programables por fecha/hora.
- Salida de onda cuadrada programable.

**X.2.2.3. Modulo Micro SD Card MOD-MSDC**

Esta placa de interfaz está diseñada para acceder a la memoria microSD en modo SPI, por lo que las señales de control están claramente marcadas con los nombres de las señales en este bus de comunicación. Admite tarjetas microSD y micro SDHC. Tiene un circuito convertidor de voltaje y puede comunicarse a 3.3V o 5V. Este módulo permite el almacenamiento continuo de los datos registrado de las distintas variables en el tiempo.

Se puede alimentar hasta 5V gracias al regulador de voltaje incluido.

**Especificaciones:**

- Voltaje de trabajo: 3.3V-5V
- Interfaz: SPI

- Incluye todos los pines SPI de la tarjeta SD: MOSI, MISO, SCK, CS
- Le permite almacenar grandes cantidades de datos en la memoria SD usando Arduino

#### **X.2.2.4. Sensor de presión atmosférica Sensor BME280.**

El sensor BME280 es un sensor ambiental de Bosch Sensortech que combina un termómetro, un barómetro y un higrómetro. El sensor se basa en el sensor BMP280 que, como hemos visto en este artículo, es un termómetro y un barómetro, pero agrega la capacidad de medir la humedad.

En el corazón del módulo se encuentra una nueva generación de sensores digitales de presión, humedad y temperatura fabricados por Bosch: el BME280. Hereda sensores como BMP180, BMP085 o BMP183.

Este sensor de precisión mide de 0 a 100 % de humedad relativa con una precisión de  $\pm 3$  %, un rango de presión de aire de 300 Pa a 1100 hPa, una precisión absoluta de  $\pm 1$  hPa, un rango de temperatura de  $-40$  °C a  $85$  °C y una precisión de  $\pm 1.0$  °C.

#### **Especificaciones:**

- Tensión de funcionamiento: 3,3 V CC
- Rango de medición de temperatura:  $-40$  °C a  $85$  °C
- Precisión de medición de temperatura:  $<\pm 1.0$  °C
- Resolución de temperatura:  $0,01$  °C
- Rango de medición de humedad: 0 a 100% HR
- Precisión de medición de humedad: 3% HR
- Resolución de humedad:  $0,01$ % HR
- Tiempo de detección: 1 segundo
- Rango de altímetro: 0 a 9144 msnm
- Precisión:  $\pm 1$  metro.

### X.2.2.5. Sensor de dióxido de carbono MQ-135

Los sensores de gas de la serie MQ utilizan un pequeño calentador interno con un sensor electroquímico. Son sensibles a muchos gases y se utilizan en interiores a temperatura ambiente. La salida es una señal analógica que se puede leer a través de la entrada analógica del Arduino.

El sensor MQ-135 se utiliza para medir la calidad del aire y detectar la contaminación y los gases nocivos en el medio ambiente. Voltaje de operación: 5 Volt

- Rango de medición: analógica: 0- 1023 Señ
- Rango de medición: 10- 1000 ppm
- Resolución: 1 ppm
- Tiempo de medición: 200 ms

### X.2.3 Resumen de los Sensores utilizados

Teniendo en cuenta las limitaciones de Hardware debido al bajo costo, hace que la especificación de los sensores sea escasa. Sin embargo, algunos factores son importantes para el manejo del software y hardware, vistos en la

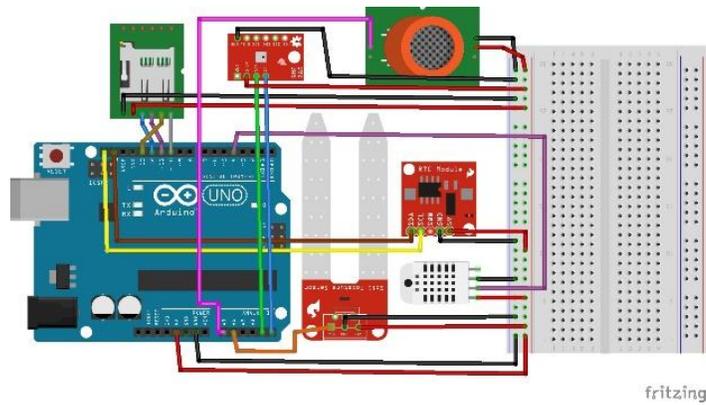
Tabla 13:

**Tabla 13.- características de los sensores utilizados**

Sensor DHT22 (Temperatura Humedad Relativa)			
Voltaje de operación	3	6	Volt
Rango de medición Temperatura	-40	80	C
Precisión de medición	+0.5		C
Resolución temperatura	0.1		C
Rango de medición Humedad Relativa	0	100	%
Precisión de medición	2		%
Resolución temperatura	0.1		%
Tiempo de medición	2		s

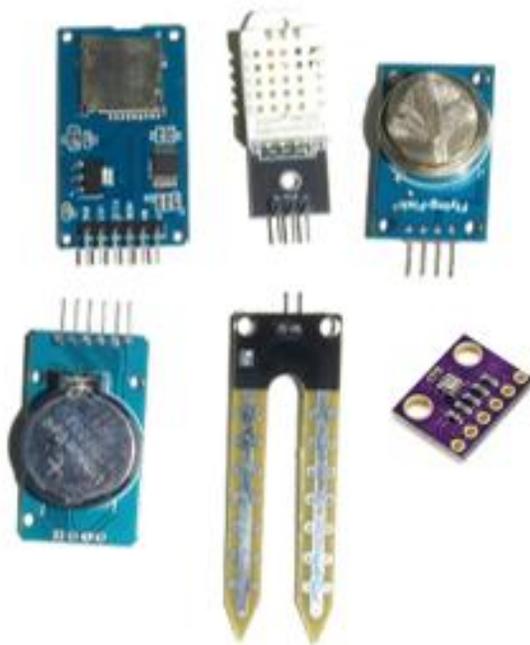
Sensor FC-28 (Humedad suelo)			
Voltaje de operación	3.3	5	Volt
Rango de medición	0	1023	Señ
Rango de medición Humedad	100	0	%
Resolución de humedad	1		%
Tiempo de medición	200		ms
Sensor MQ-135 (Dióxido de Carbono)			
Voltaje de operación	5		Volt
Rango de medición análoga	0	1023	Señ
Rango de medición	10	1000	ppm
Resolución	1		ppm
Tiempo de medición	200		ms
Sensor BME280 (Presión Atmosférica)			
Voltaje de operación	3.3		Volt
Rango de medición	300-1100		hPa
Resolución de hPa	0.1		hPa
Tiempo de medición	200		ms
Consumo energético	0.1		mAh

Sin embargo, conectar el sensor al Arduino es muy sencillo. La placa del sensor tiene dos tipos de salidas, una salida digital que muestra niveles bajos de voltaje y una salida analógica que es proporcional a la ganancia de voltaje. Con Arduino UNO, las conexiones serán como se muestra en la Figura 23, pero de cualquier manera se puede conectar a una variedad más amplia de Arduinos en el mercado.



**Figura 23.-Conexión del sensor para la propuesta de micro estación**

Cada uno de los sensores se conectaron con su respectiva conexión analógica o digital, junto con la calibración recomendada por Pinzón et al., 2018, Koestoer et al., 2019 y Cuauhtemoc Negrete et al., 2018 con el fin de mantener un estándar en la medición de los parámetros hidrometeorológicos para las regiones con clima cálido subhúmedo con lluvias todo el año.



**Figura 24.- Sensores a manejar.**

Para poder convertir el equipo en un sistema de DATLOGGER que permita almacenar los datos es recomendable de igual forma el uso de los módulos de

reloj de tiempo real BS3231 y el conector de memorias microSD, ambos para tomar la fecha y hora de la medición y el almacenamiento de cada una de las variables.

#### **X.2.4 Programación del sensor**

El *hardware* debe de ir en compañía de un *software* que pueda contralar cada uno de los sensores colocados en el microcontrolador ARDUINO, y este es programado de tal manera que sea óptimo para el almacenamiento de los datos y del ahorro de consumo energético con el hecho que será colocado en un lugar en la intemperie.

Para logra el objetivo se utiliza el lenguaje de C++ simplificado en la plataforma de ARDUINO IDE junto con las paqueterías correspondientes de cada sensor.

```
TEM_SD_TIEMR_HS_CO2_VER4
//Librerias
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LowPower.h>

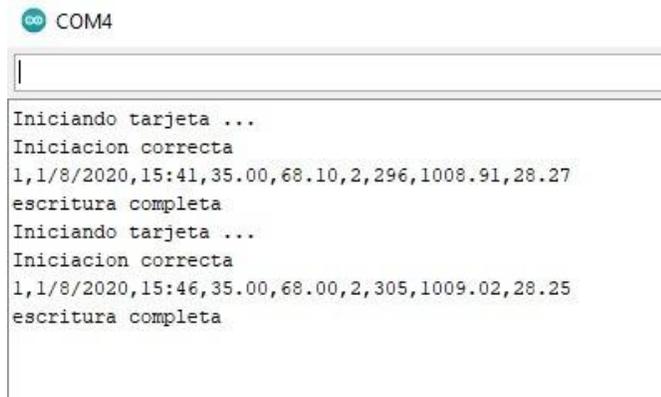
//Constantes
#define SSpin 10
File archivo;
#define DHTPIN 4 // Siempre revisar cual pin esta conctado el
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //// Iniciamos DHT sensor para normal
RTC_DS3231 rtc; /// tiempo real
#define anInput A0 // pin analogo del MQ135
#define co2Zero 55 //calibracion CO2 0 nivel
```

El Sketch usa 17546 bytes (54%) del espacio de almacenamiento de p  
Las variables Globales usan 1270 bytes (62%) de la memoria dinámica

39 Arduino Uno en COM4

**Figura 25.- Plataforma ARDUINO IDE.**

Una vez realizado el script de programación y subido la ARDUINO UNO, en el monitor de serie se observa el cumplimiento de la óptima programación de lectura y escritura de las variables hidrometereológicas.



```
COM4
Iniciando tarjeta ...
Iniciacion correcta
1,1/8/2020,15:41,35.00,68.10,2,296,1008.91,28.27
escritura completa
Iniciando tarjeta ...
Iniciacion correcta
1,1/8/2020,15:46,35.00,68.00,2,305,1009.02,28.25
escritura completa
```

**Figura 26.- Monitorio serie con el arranque del prototipo**

Logrando que el Arduino trabaje en perfectas condiciones por lo que ya se puede colocar para pruebas en campo abierto con la debida protección contra lluvias y vientos. Con tiempo de muestres de 5 minutos. Sin embargo, por ser un equipo que no se considera como resistente al agua, se tiene que recubrir con un cajón de protección que permita reducir los riesgos de daños por precipitaciones. Incluso es recomendable la colocación de paneles solares para un largo periodo de uso.

Terminado e instalado el sensor, este es capaz de medir las condiciones hidrometereológicas de manera constante y por un tiempo de cinco minutos entre muestra.

Cada sensor fue estudiado y calibrado para que funcione bajo los lineamientos de medición de la OMM. Sin embargo, al ser un equipo económico y de transportación flexible, puede que algunos reglamentos no sean completamente del todo igualados, pero hay que tener en cuenta el bajo costo que permite ser una buena opción para estudio específicos del campo.

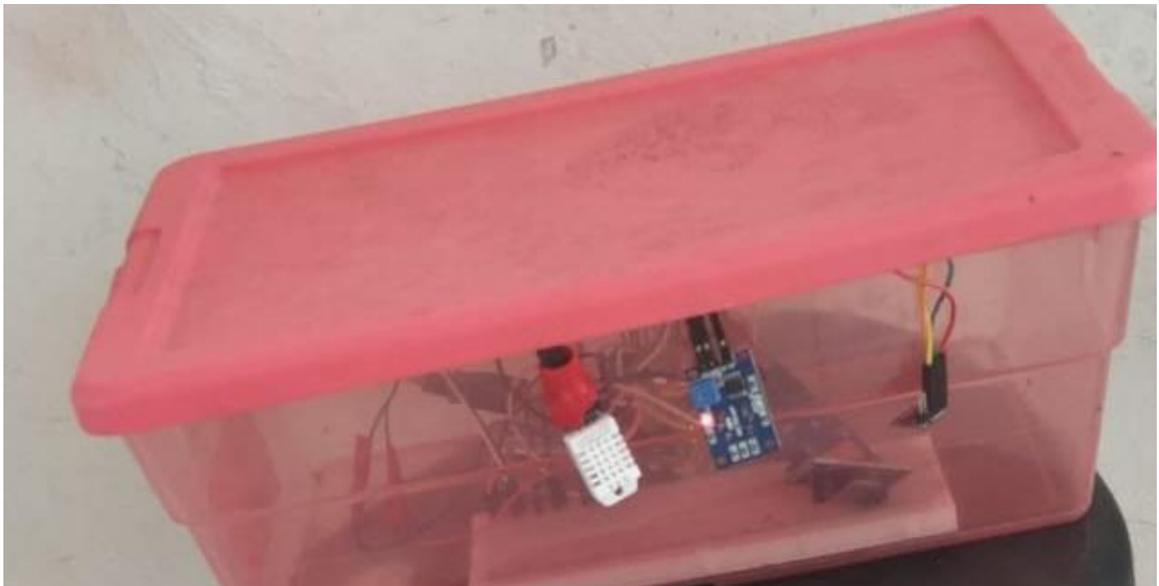
### **X.2.5 Inspección higrotérmica mediante termohigrómetro (ARDDUINO)**

#### **de lectura instantánea**

El propósito de esta inspección es localizar la fuente de vapor presente en la pared o el piso. La base de la prueba es que la capa de aire en contacto directo con la pared o el piso evapora más humedad que la capa de aire en contacto con

otra capa. lugar seco. Este principio muy simple permite tener en cuenta las pruebas. Recuerde que esta técnica no pretende cuantificar el flujo de vapor a través de una superficie, sino solo "detectar" esta evaporación, si se utiliza algún tipo de procedimiento de análisis de resultados, "clasificando" la fuente de acuerdo con el nivel de intensidad. (S. García et al., 2011)

El instrumento empleado es un termohigrómetro de registro continuo, que mide temperatura y humedad del aire (Figura 27), para nuestro caso será mediante el uso de Arduino puesto que es cuestión de tiempo y presupuesto. Sin embargo, que sea un equipo más económico no implica una reducción en la calidad, pues como se ve en la sección 10.2.4.1, los sensores tienen calidad estándares de medición, y todo depende la programación y la dedicación que se desea realizar.



**Figura 27.- Termohigrómetro típico de elaboración propia, utilizado en la inspección higrotérmica, y método de toma.**

La temperatura medida por el dispositivo es "Temperatura Seca" (T) en °C La mayoría de los dispositivos en el mercado miden directamente la humedad como "Humedad Relativa" (U) en %. Esta cantidad no es útil para el diagnóstico, ya que depende de la temperatura y, por lo tanto, requiere una mejor cuantificación de la humedad.

### **X.3. Estimación del Modelo de Predicción**

A principios de la década de setenta, Box, doctor en estadística en la Universidad de Wisconsin y Jenkins, profesor de ingeniería de sistemas de la Universidad de Lancaster desarrollaron un gran logro en la cuestión del análisis de series de tiempo, debido al estudio de la variación de la contaminación en el Área de la Bahía de San Francisco para establecer una buena previsibilidad y control. El libro que describe su método, publicado en 1976, se convirtió de una manera singular en la base de los modelos estocásticos y sus métodos fueron utilizados en mayorías de las ocasiones en diversas disciplinas científicas. Estos procedimientos se llaman modelo ARIMA y modelo Box-Jenkins.

Este modelo conlleva a una serie de pasos necesarios para cumplir con el pronóstico de manera correcta:

El primer punto es transformar la serie de observaciones en una serie estática, una secuencia de medias, varianzas y autocorrelación independiente del tiempo.

Cuando se logra la estabilizada de la serie con las transformaciones requeridas, se comprueba la existencia de reglas en la serie para determinar posibles modelos matemáticos. Por lo tanto, se realiza la comprobación mediante la función de autocorrelación simple y parcial con el fin de comparar su forma con una lista de patrones gráficos típicos de varios modelos propuestos, y luego se obtiene un modelo ARIMA apropiado.

Se elige combinar las formas de las funciones de autocorrelación probadas obtenidos de los datos. Después de seleccionar el tipo de modelo, se evalúan sus coeficientes y, para concluir, se realiza un análisis residual (diferencia entre la observación del modelo real y el modelo predicho) para comprobar si el histograma de la figura corresponde a nuestros datos.

Si no, es necesario repetir el proceso para encontrar otros modelos. Luego de identificar un modelo que es lo suficientemente eficiente en la serie estática, procedemos a deshacer las transformaciones realizadas inicialmente para la serie

estática y ahora comprobamos si las predicciones del modelo son correctas. Por lo tanto, la mejora del modelo puede ser un proceso iterativo. Por lo tanto, la mejora del modelo puede ser un proceso iterativo.

- El valor más reciente de la variable.
- Ruido en el valor más reciente de la variable.
- El valor lejano de la variable.
- Ruido en el valor remoto de la variable.

En conclusión, según el enfoque de Box-Jenkins para buscar un patrón es necesario los siguientes pasos:

- 1. Identificación del modelo:** Evaluando los valores de correlación simple y autocorrelación parcial ACF y PACF, individualmente se puede obtener la variabilidad, tendencia y estabilidad de las series de datos. Esta labor admite realizar la fase de descripción del modelo.
- 2. Determinación de los parámetros del estimador:** Para poder establecer su nivel de ruido y, por lo tanto, los parámetros calculados de la estimación se requieren de la determinación de la autocorrelación de una secuencia.
- 3. Elegir un modelo ARIMA apropiado:** en El penultimo paso, se calcula el estimado de parámetros, el examen de los residuos establecerá el modelo ARIMA apropiado para elegir.
- 4. Predicción Basada en Modelos Apropriados:** Concluyendo, el proceso de pronóstico asume que la aplicación en la serie de datos y los regresores del modelo ARIMA han sido definidos previamente.

A continuación, se muestra una representación gráfica del enfoque de Box-Jenkins para el ensamblaje de modelos:

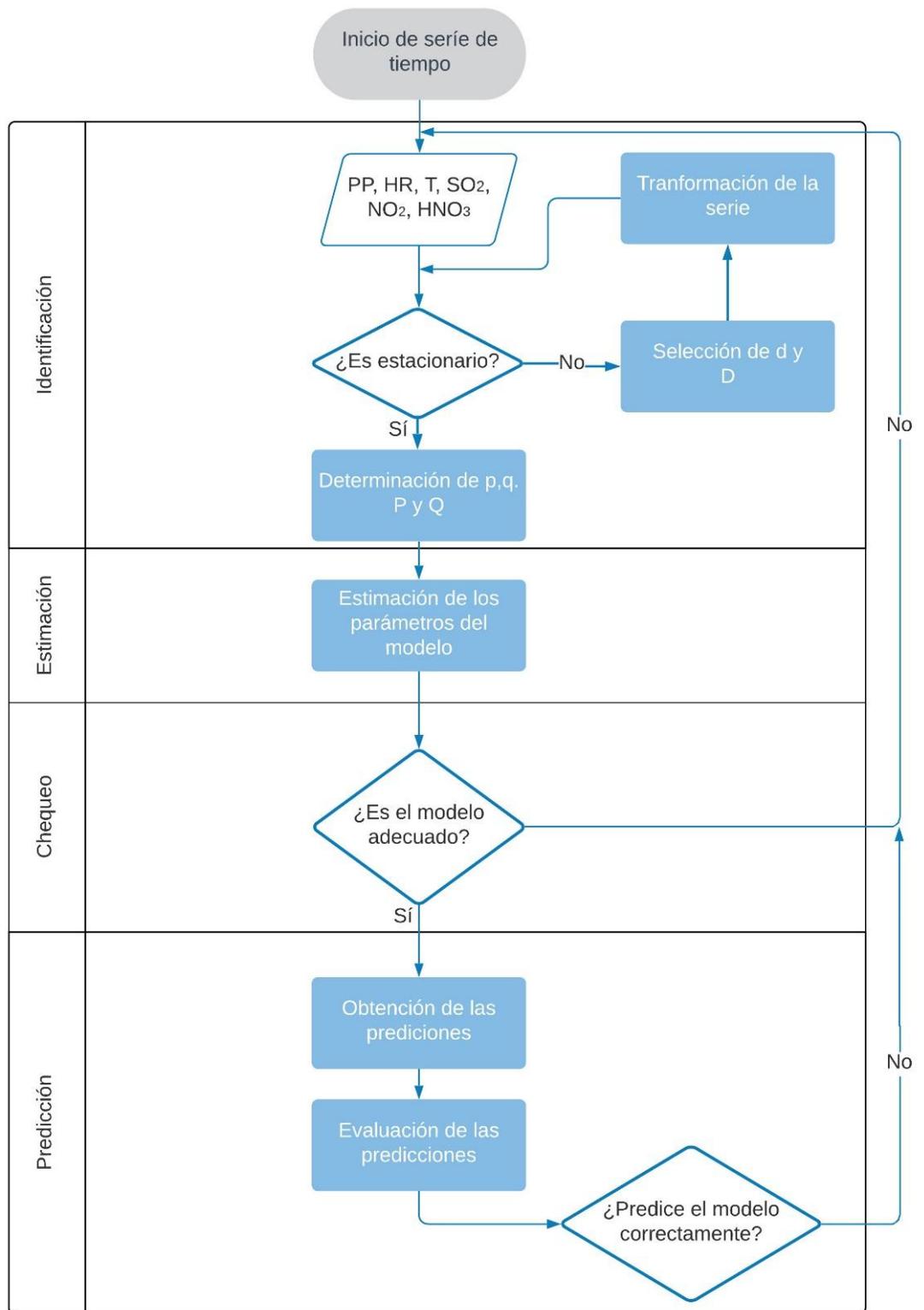


Figura 28.-Mapa de pasos para la estabilidad de un modelo de series tiempo.

## CAPITULO XI. RESULTADOS

### XI.1. Calidad de datos de la estación ARDUINO

Con el fin de conocer el comportamiento del sensor en ambientes libres y directo a la intemperie se realizó dos muestreos de 20 días separadas de los meses de agosto y septiembre del 2020 lo que conlleva a 40 días de datos registrados, esto conlleva de conocer la eficiencia de la batería, tener sensibilidad en el manejo del equipo, entender el comportamiento de las variables climatológicas en temporadas altas de lluvia en la región y comparar con equipos de parecidas especificaciones. Con el tiempo dado y las mediciones a cada cinco minutos se dio un total de 11657 muestras de datos, la siguiente Tabla 14 ilustra las bases estadísticas generales de cada variable medible.

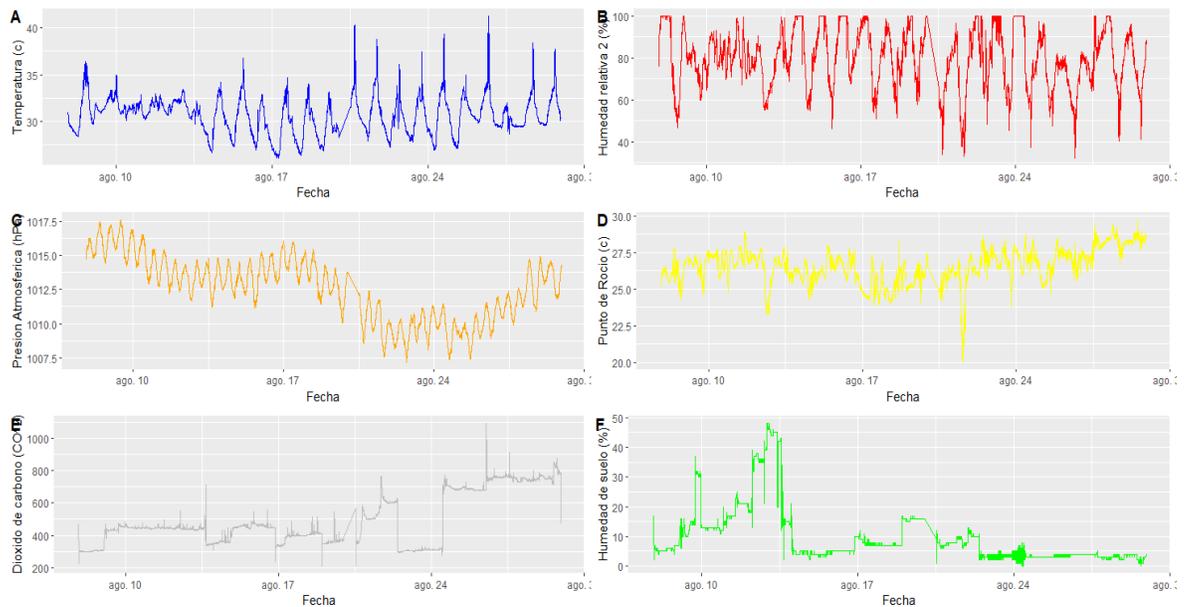
**Tabla 14.- Estadísticos de las variables medibles.**

	<b>T</b>	<b>RH</b>	<b>w</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>PA</b>	<b>DP</b>
<i>Min.</i>	25.9	31.93	0	209	1007	20
<i>1st Qu.</i>	28.8	69.36	5	413	1010	26.36
<i>Median</i>	30.3	80.43	15	427	1012	27.26
<i>Mean</i>	30.31	79.74	13.65	462.4	1012	27.46
<i>3rd Qu.</i>	31.8	90.92	19	450	1014	28.53
<i>Max.</i>	41.3	100	48	1092	1018	31.73

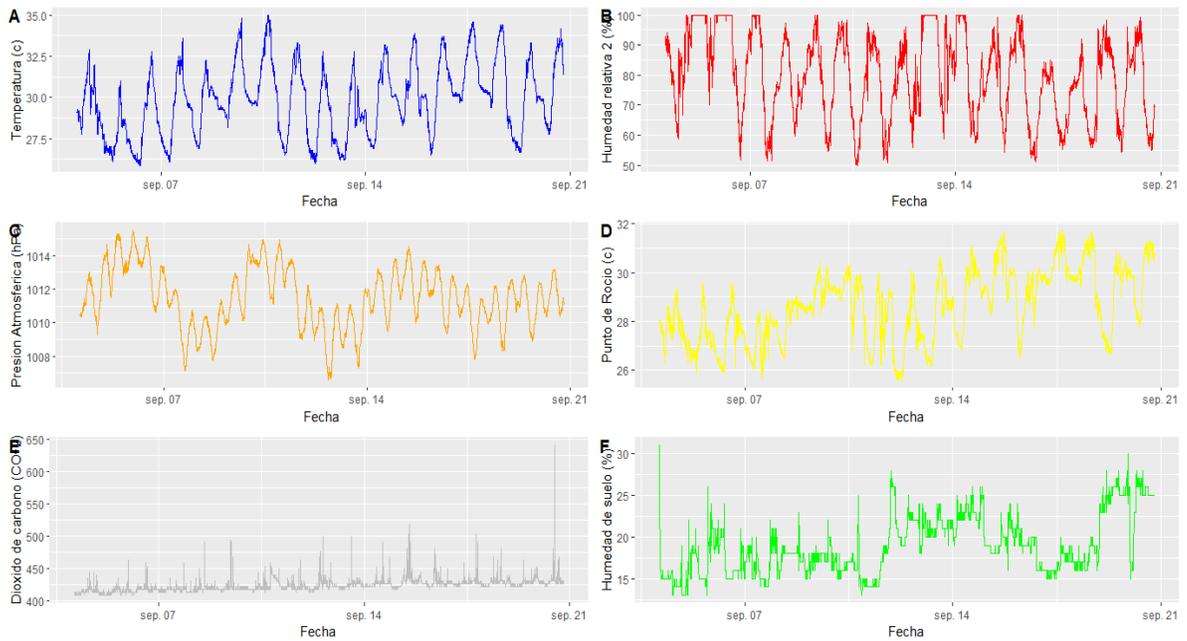
En efecto el comportamiento de la estación se refleja de manera similar tomado de las características generales de la zona de estudio, obteniendo un punto favorable de primera vista del funcionamiento de esta, se debe de tener en cuenta que hasta el momento no es justificable para acatarla como optima hasta ser compara con respeto a otra. Sin embargo, se puede mencionar que persiste la ventaja de tomas a resoluciones más reducidas, pues la mayoría de las estaciones automatizas de la región tienden a medir a cada hora.

Las Figura 29 y Figura 30 compara los resultados obtenidos entre los meses recabados, con de fin de apreciar los resultados de manera más visual y conocer el registro de cada una de las variables. En estas se muestra una tendencia de estabilidad y cíclica para la temperatura, humedad, presión atmosférica y punto de roció más no para dióxido de carbono y humedad del suelo pues estas dependen de gran medida de las condiciones del lugar, y puntos de precipitación y de liberación de CO<sub>2</sub> en la atmosfera.

Se puede notar que existe un periodo de 10 días entre tomas de mediciones indicadas, donde el equipo estuvo en reposo, esto de se debe a calibraciones y mejoramiento del script de programación.



**Figura 29.- Mediciones de las variables de la estación para fecha 7 al 28 de agosto del 2020, A) Temperatura (°C), B) Humedad Relativa (%), C) Presión Atmosférica (hPa), D) Punto de Roció (°C), E) Dióxido de carbono (PPM), F) Humedad del suelo (w)**



**Figura 30.- Mediciones de las variables de la estación para fecha 4 al 20 de septiembre del 200, A) Temperatura (°C), B) Humedad Relativa (%), C) Presión Atmosférica (hPa), D) Punto de Roció (°C), E) Dióxido de carbono (PPM), F) Humedad del suelo (w)**

### XI.1.1 Comparativa contra estación estatal de CONAGUA

Con el fin de evaluar la confiabilidad de los resultados copilados por la estación se comparó con la estación automática del aeropuerto de la ciudad de Chetumal mediante un modelo ANOVA unifactorial entre las temperaturas para las fechas de 11 al 17 de agosto tomando en cuenta un factor de confiabilidad del 0.1%.

**Tabla 15.- Modelo ANOVA de comparativa de medias para las estaciones hidroemetrologicas**

	Temperatura proporcionada	Temperatura Medida
<b>n</b>	84.00	2129.00
<b>media</b>	29.74	30.46
<b>varianza</b>	6.12	3.69

<b>Desviación Estándar</b>	2.47	1.92
<hr/>		
Resultados		
<hr/>		
<b>Varianza combinado total</b>	3.78	
<b>Desviación estándar combinado total</b>	1.95	
<b>Tc (T de Student calculada)</b>	3.35	
<b>Confiabilidad</b>	0.01	
<b>Numero de datos sobrantes</b>	82.00	
<b>T probabilística</b>	3.42	

En la Tabla 15 se proporciona una visión general de modelo dando como resultado un valor favor a la igualdad de medias entre las dos estaciones dándole más valor a la estación programada pues recopila más datos en el mismo rango de tiempo, y con una precisión de 0.1. Por lo que se puede usar para el manejo en estudio donde no se encuentre una estación de esta clase.

Sin embargo, al no tener valores anuales de mediciones debido a situaciones que estuvieron fuera del alcance del estudio, lo cual no permitió la continuación de la toma de datos. En consecuencia, se complicó estimar la variable de disolución presente en la zona de estudio mediante la estación programada, pues en la mayoría de los casos es necesario un año o dos para tener un valor significativo de daño. Pese a que presento este problema, no queda en pauta para la continuación del uso de este equipo en próximas investigaciones donde se contemplen este tipo de variables.

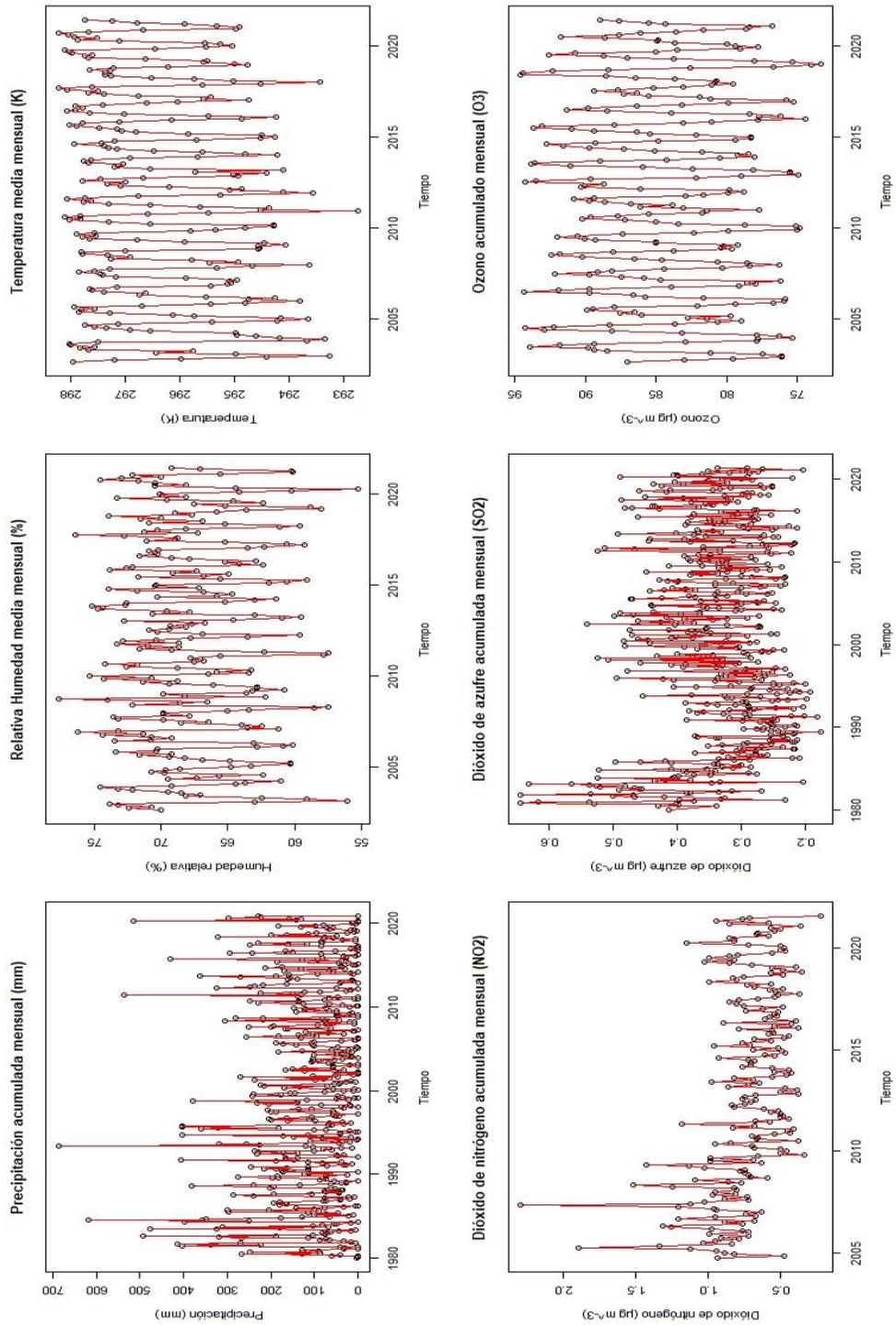
Además, es recomendable implementar este tipo de herramientas para el tratamiento de otros problemas que abarquen las variables hidrometeorológicas con un mayor enfoque y precisión espaciotemporal.

## XI.2. Calidad de los datos recopilados

Todos los datos presentes en el modelo, fueron recopilados por medio de la base GESdisc de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) tomando en cuenta las características de los sensores e imágenes satelitales presentes en las secciones X.1.1.2, X.1.1.3, X.1.1.4 y X.1.1.5, donde cada uno de las variables tiene su periodo de tiempo medición y metodología de estimación.

Los resultados obtenidos en un análisis preliminar de los datos presentes en la propia bibliografía de cada uno de los conjuntos, puede dar pauta a tener un estudio del fenómeno de forma adecuada sin realizar otra medida metodológica, puesto que no se tiene datos comparativos suficientes con respecto a los de las imágenes satelitales utilizadas.

Además, cada una de las variables (Precipitación, Humedad, Temperatura  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ ) obtenidas de las imágenes satelitales, fueron procesados en el software Rstudio con el fin de recopilar las cantidades de manera cronológica y obtener el punto específico de la zona a analizar, tomando como referencia la ubicación geográfica presente en la sección III.2.1. Por ende, los datos obtenidos se pueden expresar de forma más simple y organizada, con el fin de proporcionar de forma correcta los valores para la estimación de los modelos ARIMAs y del modelo de Lipferd. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta un esumen de estos datos con el fin de conocer el comportamiento en la ZA de Kohunlich, sin bien en el recopilado se aprecia que no todos los datos tienen el mismo periodo de tiempo de medición debido a que cada uno tiene su respectivo periodo de estimación y tiempo de funcionamiento del satélite, y no se plantea realizar una disminución con la variable, pese a que no se tenga la suficiente información, pues para mejor la estimación de los modelos ARIMAs es necesario tener el mayor número de datos, para la una mejor estimación a futuro.



**Figura 31.- Datos recopilado de Precipitación, Humedad Relativa, Temperatura, Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y Ozono (O<sub>3</sub>)**

**Tabla 16.- Datos anuales estimados por los datos imágenes satelitales.**

<b>AÑO</b>	<b>PRECI- PITACION (m)</b>	<b>SO2 (µg/m3)</b>	<b>NO2 (µg/m3)</b>	<b>O3 (µg/m3)</b>	<b>HUME -DAD (%)</b>	<b>TEMPE -TURA (K)</b>	<b>NHNO3 (µg/m<sup>3</sup>)</b>
1980	1.19	5.30	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1981	1.78	5.05	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1982	1.89	5.79	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1983	1.76	4.62	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1984	2.46	4.23	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1985	1.51	4.21	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1986	1.20	3.50	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1987	1.16	3.19	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1988	1.51	3.28	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1989	1.23	2.92	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1990	1.69	3.25	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1991	1.45	3.54	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1992	1.44	3.49	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1993	1.95	3.45	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1994	1.21	3.23	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1995	2.00	3.90	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1996	1.25	3.58	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1997	1.15	4.37	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1998	1.39	4.09	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
1999	1.22	4.10	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
2000	1.03	4.50	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
2001	1.02	4.12	NULO	NULO	NULO	NULO	NULO
2002	0.82	4.67	0.00	325.73	71.58	296.38	0.00
2003	0.59	4.54	0.00	1016.33	67.29	296.17	0.00
2004	0.70	3.94	2.22	1012.05	66.83	295.96	2.05
2005	1.01	4.18	12.38	1009.73	66.89	296.25	4.89
2006	1.03	4.08	10.88	1012.60	68.60	296.00	4.61
2007	1.27	3.83	12.25	1015.25	67.80	296.31	4.92
2008	1.37	4.00	10.77	1013.16	66.99	296.08	4.54
2009	0.85	3.91	9.85	1016.33	66.98	296.28	4.39
2010	1.07	3.85	7.45	1000.81	68.61	296.15	3.81
2011	1.55	4.06	7.23	1020.76	67.19	296.26	3.77
2012	1.54	3.93	7.92	1027.49	67.57	296.13	3.95
2013	1.61	3.97	7.49	1008.00	68.82	296.48	3.89
2014	0.95	3.83	7.55	1017.97	67.77	296.31	3.87
2015	1.07	3.74	7.44	1029.70	67.00	296.67	3.90
2016	1.08	4.64	6.86	985.39	68.10	296.75	3.70
2017	1.02	4.08	7.44	1004.38	67.28	296.59	3.84

2018	1.23	4.04	7.69	1023.49	67.87	296.32	3.92
2019	0.73	4.14	8.47	995.33	65.58	296.82	4.07
2020	1.74	3.91	8.23	1011.10	67.71	296.82	4.10

### **XI.3. Pronostico en el tiempo de datos obtenidos de las series de tiempo recopilada.**

Dado el marco teórico presentado en el manuscrito sobre los modelos de pronóstico ARIMAs, se planteó realizar la estimación de cada una de las variables con su respectivo tiempo de medición tomando en cuenta los datos mensuales, previo a hacer el cálculo del modelo de Lipfert o cualquier otro. Esto permite una confianza en los resultados presentados, debido a que cada valor pronosticado en el tiempo es realizado conforme a la información tomada del banco de datos de la NASA, sin modificación o uso de alguno modelo previo.

La importancia de que esté presente una cantidad diferente de registro entre los de datos recopilados de las variables e incluso de ser datos mensuales, es debido a que, a mayor número de datos agregados a la serie de tiempo de cada variable más robustes tiene el modelo ARIMA para estos.

Si bien es posible pronosticar hasta más de 50 años de datos, con el fin de tener una confiabilidad en los resultados y los registros previos se limitó a estimar 15 años por encima de los datos medidos.

#### **XI.3.1 Cálculo de coeficiente de Akaike**

El criterio de información de Akaike (AIC) es un método matemático para evaluar qué tan bien se ajusta un modelo a los datos a partir de los cuales se generó. En estadística, AIC se utiliza para comparar diferentes modelos posibles y determinar cuál se ajusta mejor a los datos. AIC se calcula a partir de:

- El número de variables independientes utilizadas para construir el modelo.
- La estimación de máxima verosimilitud del modelo (qué tan bien el modelo reproduce los datos).

El modelo de mejor ajuste según AIC es el que explica la mayor cantidad de variación utilizando la menor cantidad posible de variables independientes.

Para aplicar AIC en el trabajo de tesis, se realizó el análisis de un conjunto de modelos candidatos considerando como limitante la máxima parametrización de cuatro tanto de los modelos autorregresivo y de media móvil y luego encontramos los valores AIC correspondientes de cada uno de ellos. Casi siempre se perderá información debido al uso de un modelo candidato para representar el "modelo verdadero", es decir, el proceso que generó los datos. Se desea seleccionar, entre los modelos candidatos, el modelo que minimiza la pérdida de información. No se puede elegir con certeza, pero se puede minimizar la pérdida de información estimada.

Este procedimiento se empleó para cada una de las variables estimadas, y si bien la cantidad de modelos evaluados rondan el número 1200 casos posible de modelos ARIMA por variable (Temperatura, Humedad, Precipitación, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>), solo se tomará el mínimo posible siempre y cuando se cumpla las condiciones de la correlación. Para comprobar que realmente se tiene este valor se muestra en la Figura 32 el caso del modelo de temperatura.

```
> autoarimat12<-auto.arima(Serie_datost2, d=1,D=2, stepwise

ARIMA(0,1,0)(0,2,0) [24] : 649.9404
ARIMA(0,1,0)(0,2,1) [24] : Inf
ARIMA(0,1,0)(0,2,2) [24] : 480.1915
ARIMA(0,1,0)(1,2,0) [24] : 543.1222
ARIMA(0,1,0)(1,2,1) [24] : Inf
ARIMA(0,1,0)(1,2,2) [24] : 481.3194
ARIMA(0,1,0)(2,2,0) [24] : 495.9959
ARIMA(0,1,0)(2,2,1) [24] : 480.7195
ARIMA(0,1,0)(2,2,2) [24] : Inf
ARIMA(0,1,1)(0,2,0) [24] : Inf
ARIMA(0,1,1)(0,2,1) [24] : Inf
ARIMA(0,1,1)(0,2,2) [24] : Inf
ARIMA(0,1,1)(1,2,0) [24] : 488.0315
ARIMA(0,1,1)(1,2,1) [24] : Inf
ARIMA(0,1,1)(1,2,2) [24] : 416.1567
ARIMA(0,1,1)(2,2,0) [24] : 430.4848
ARIMA(0,1,1)(2,2,1) [24] : 415.054
ARIMA(0,1,1)(2,2,2) [24] : 417.0355
```

**Figura 32.- Ejemplo del calculo de las modelo y sección del mejor mediante el coeficiente de Akaike.**

De igual forma, más adelante se dará a conocer el valor seleccionado para cada una de las variables.

### **XI.3.2 Pronóstico de Precipitación**

Entre los datos a estudiar de la precipitación, se tiene en cuenta 492 meses estimados de los cuales corresponden a 41 años de observaciones.

**Tabla 17.- Datos estadísticos base de precipitación (mm)**

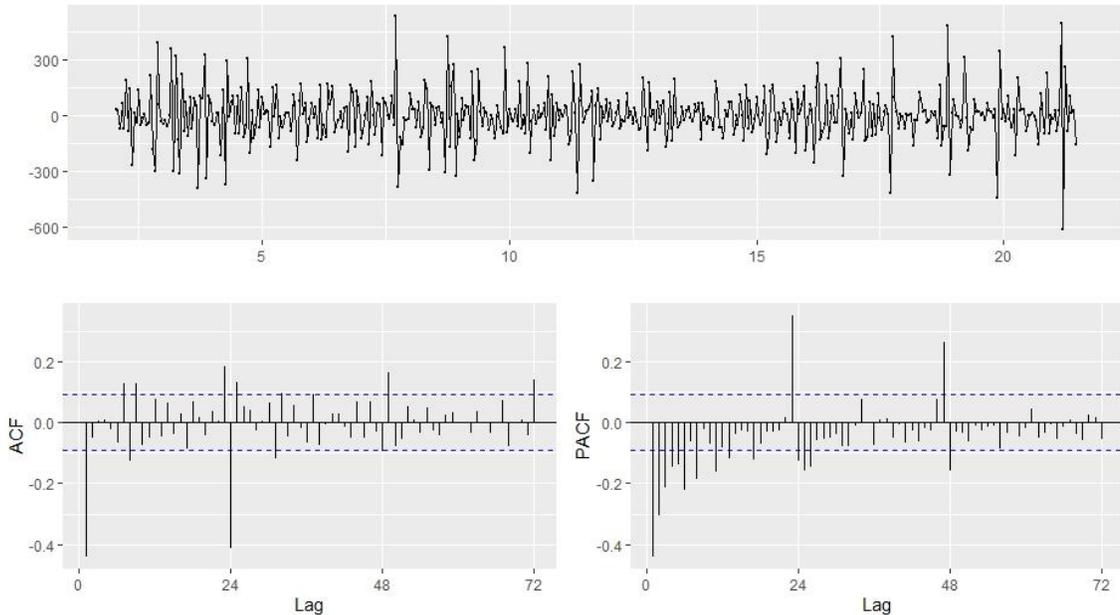
<b>Min</b>	<b>1st Qu</b>	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>	<b>3rd Qu</b>	<b>Max</b>
0.00	29.52	77.37	109.09	164.22	686.90

Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, tenido como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95% de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las acumulaciones de precipitación mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.

Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque, estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado 5513.48 y considerándose como el mejor valor entre los

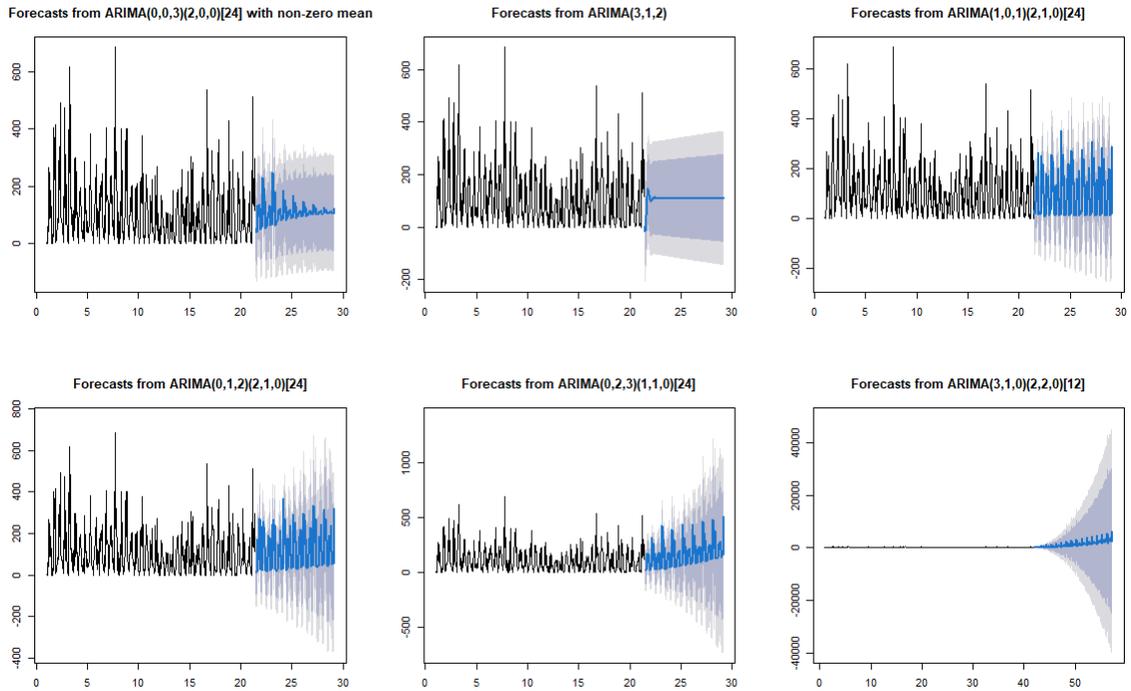
distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I en el modelo SARIMA de valor uno.



**Figura 33.-Correlograma de ACF y PACF de precipitación con  $d=0$  y  $D=1$  y frecuencia de 24.**

### El modelo presente en la

Figura 33.-Correlograma de ACF y PACF de precipitación con  $d=0$  y  $D=1$  y frecuencia de 24., tiene del  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24]$  los valores  $d$  y  $D$  de cero y uno correspondientemente y una frecuencia de 24 meses considerando que existe un año seco y un año húmedo tomando en cuenta lo analizado en el CAPITULO VII. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros  $p,q$  y  $P,Q$  con distintos valores de  $d$  y  $D$  con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes  $d$  y  $D$  mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020 en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 34.



**Figura 34.- ARIMAs propuestas para precipitación: A) ARIMA(0,0,3)(2,0,0)[24], B) ARIMA(3,1,2), C) ARIMA(1,0,1)(2,1,0)[24], D) ARIMA(0,1,2)(2,1,0)[24], E) ARIMA(0,2,3)(1,1,0)[24] y F) ARIMA(3,1,0)(2,2,0)[12].**

Por lo que se puede notar que se tiene un ARIMA (1,0,1)(2,1,0)[24] que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la Tabla 18.

**Tabla 18.- Parámetros de ARIMA(1,0,1)(2,1,0)[24]**

	AR 1	MA 1	SAR1	SAR2
<b>Parámetros</b>	0.7400	-0.6175	-0.6670	-0.4197

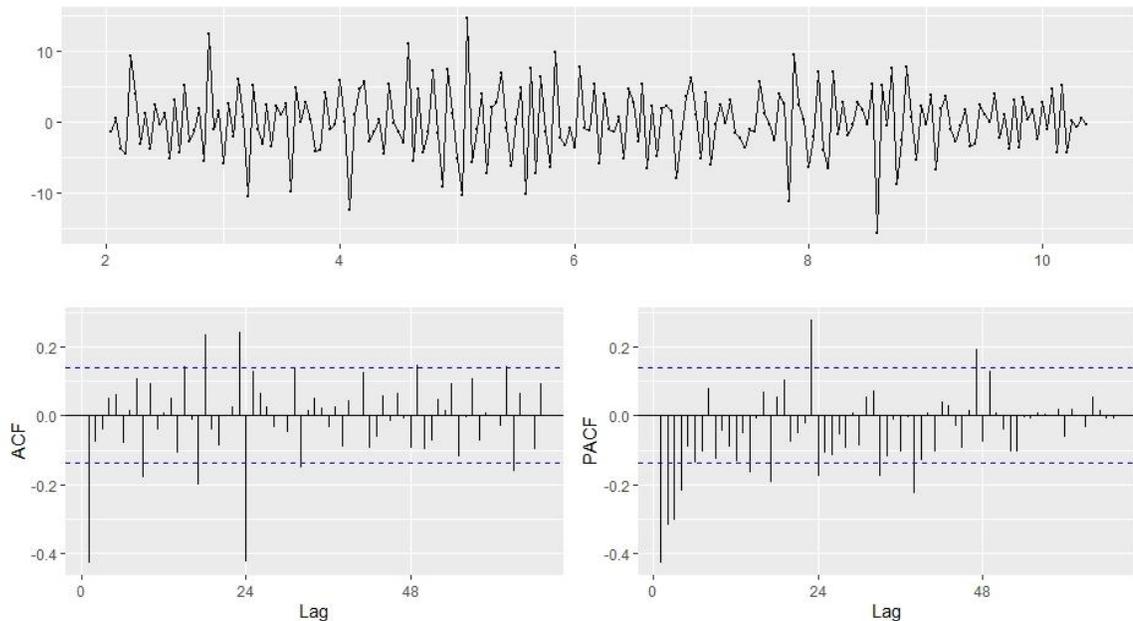
### XI.3.3 Pronóstico de Humedad

Entre los datos a estudiar de la Humedad Relativa, se tiene en cuenta 226 meses estimados de los cuales corresponden a 18.83 años de observaciones.

**Tabla 19.- Datos estadísticos base de humedad relativa (%)**

Min	1st Qu	Mediana	Media	3rd Qu	Max
55.25	63.77	68.22	67.52	70.73	77.69

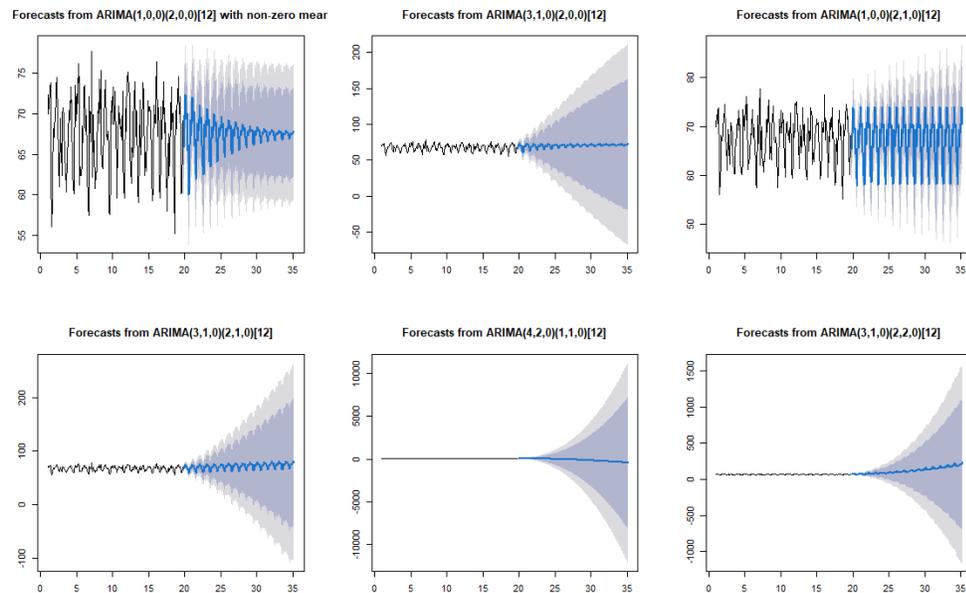
Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, teniendo como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95% de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las acumulaciones de humedad relativa mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.



**Figura 35.-Correlograma de ACF y PACF de Humedad Relativa con  $d=0$  y  $D=1$  y frecuencia de 24.**

Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque, estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.

El modelo presente en la Figura 35, tiene del  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24]$  los valores  $d$  y  $D$  de cero y uno correspondientemente y una frecuencia de 24 meses considerando que existe un año seco y un año húmedo tomando en cuenta lo mencionado en el CAPITULO VII. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros  $p,q$  y  $P,Q$  con distintos valores de  $d$  y  $D$  con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes  $d$  y  $D$  mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020 en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 36.



**Figura 36.- ARIMAs propuestas para Humedad relativa:  
 ARIMA(1,0,0)(1,0,0)[24] pero sin media en residuos en cero,  
 ARIMA(4,1,0)(1,0,0)[24], ARIMA(0,0,1)(2,1,0)[24], ARIMA(3,1,0)(2,1,0)[24],  
 ARIMA(4,2,0)(1,1,0)[24] y ARIMA(3,1,0)(2,2,0)[24].**

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado 1025.51 y considerándose como el mejor valor entre los distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I en el modelo SARIMA de valor uno.

Por lo que se puede notar que se tiene un ARIMA (0,0,1)(2,1,0)[24] que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la Tabla 20 Tabla 18.

**Tabla 20.- Parámetros de ARIMA(0,0,1)(2,1,0)[24]**

	<b>MA 1</b>	<b>SAR1</b>	<b>SAR2</b>
<b>Parámetros</b>	0.1792	-0.6393	-0.3891

### **XI.3.4 Pronóstico de Temperatura**

Entre los datos a estudiar de la Temperatura (K), se tiene en cuenta 226 meses estimados de los cuales corresponden a 18.83 años de observaciones.

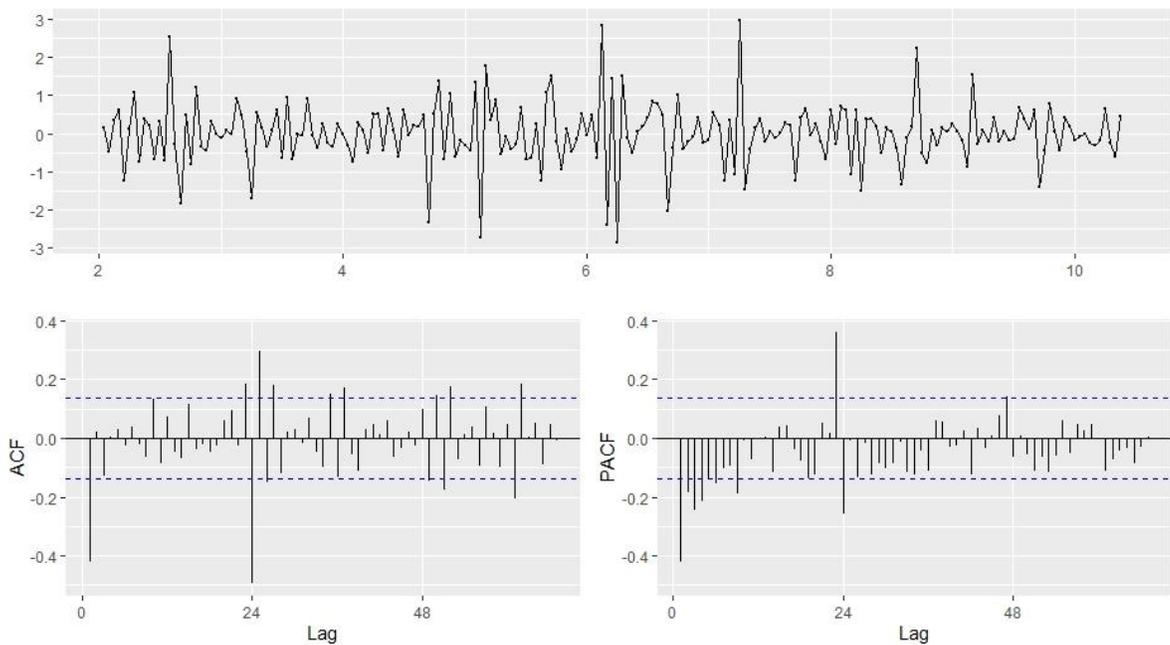
**Tabla 21.- Datos estadísticos base de temperatura (K)**

<b>Min</b>	<b>1st Qu</b>	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>	<b>3rd Qu</b>	<b>Max</b>
292.7	295.1	296.7	296.4	297.6	298.2

Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, tenido como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95%

de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las medias de temperatura mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.

Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque, estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.

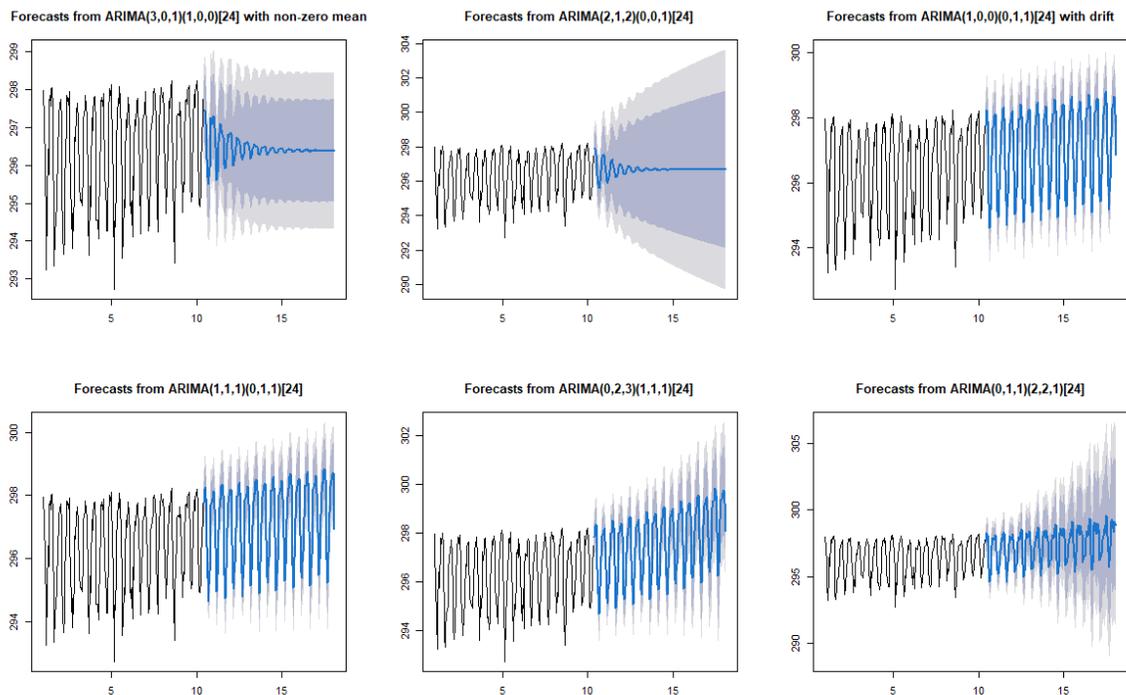


**Figura 37.-Correlograma de ACF y PACF de temperatura con  $d=1$  y  $D=1$  y frecuencia de 24.**

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado 334.77 y considerándose como el mejor valor entre los

distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I tanto en el modelo SARIMA como ARIMA de valor uno.

El modelo presente en la Figura 37, tiene del ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24] los valores d y D de uno y uno correspondientemente y una frecuencia de 24 meses considerando que existe un año seco y un año húmedo tomado del análisis obtenido en el CAPITULO VII. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros p,q y P,Q con distintos valores de d y D con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes d y D mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020 en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 38.



**Figura 38.- ARIMAs propuestas para Temperatura: ARIMA(3,0,1)(1,0,0)[24] sin media en cero en los residuos, ARIMA(2,1,2)(0,0,1)[24], ARIMA(1,0,1)(0,1,1)[24], ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24], ARIMA(0,2,3)(1,1,0)[24] y ARIMA(3,1,)(2,1,0)[24].**

Por lo que se puede notar que se tiene un ARIMA (1,1,1)(0,1,1)[24] que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la Tabla 18.

**Tabla 22.- Parámetros de ARIMA(1,1,1)(0,1,1)[24]**

	AR 1	MA 1	SMA1
<b>Parámetros</b>	0.2623	-0.9864	-0.7379

### **XI.3.5 Pronóstico de Dióxido de Azufre**

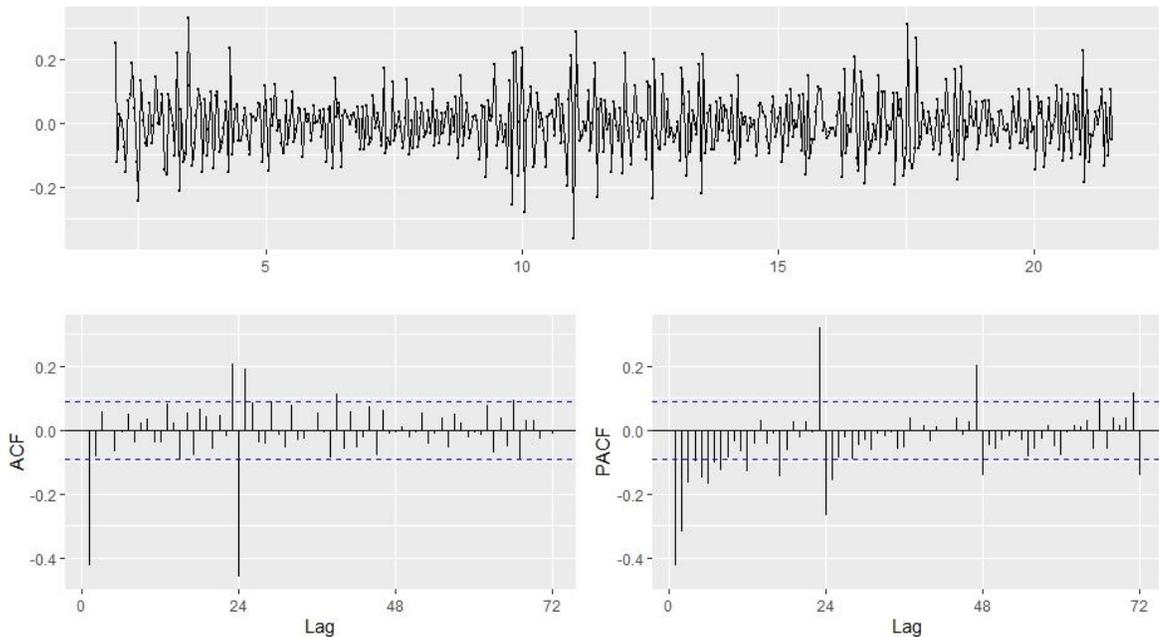
Entre los datos a estudiar de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), se tiene en cuenta 492 meses estimados de los cuales corresponden a 41 años de observaciones.

**Tabla 23.- Datos estadísticos base de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

Min	1st Qu	Mediana	Media	3rd Qu	Max
0.1757	0.2726	0.3254	0.3353	0.3855	0.6434

Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, tenido como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95% de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las medias de temperatura mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.

Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque, estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.

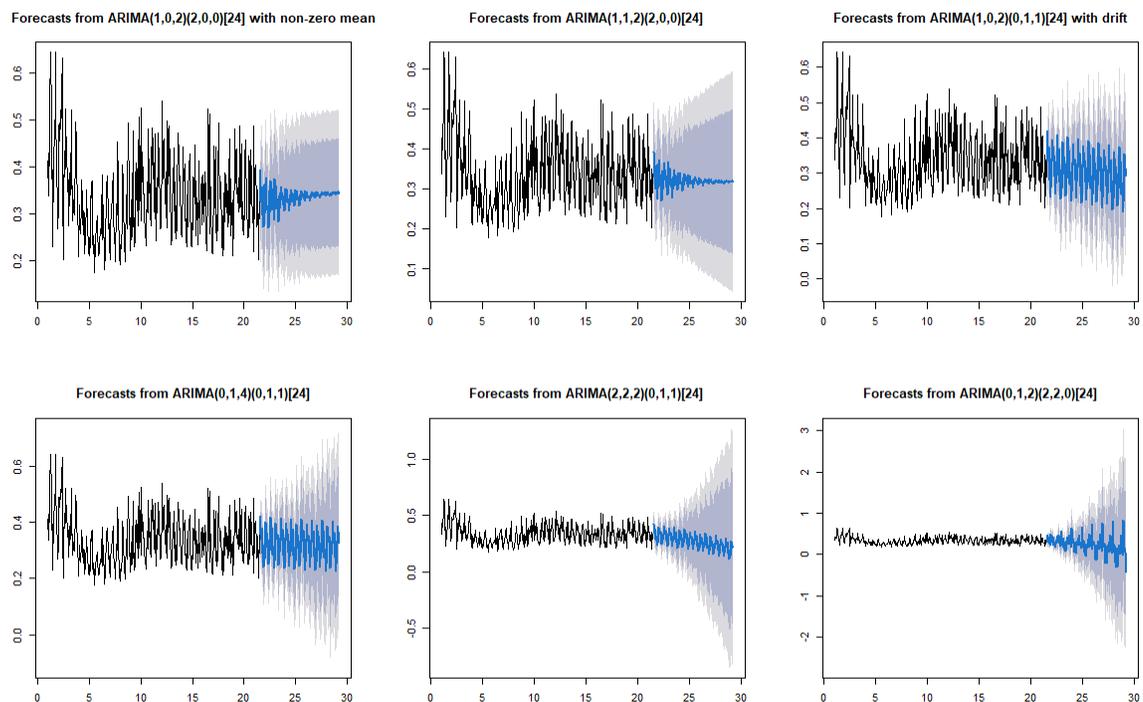


**Figura 39.-Correlograma de ACF y PACF de  $SO_2$  con  $d=1$  y  $D=1$  y frecuencia de 24.**

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado -1252.86 y considerándose como el mejor valor entre los distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I tanto en el modelo SARIMA como ARIMA de valor uno.

El modelo presente en la Figura 39, tiene del  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24]$  los valores  $d$  y  $D$  de uno y uno correspondientemente y una frecuencia de 24 meses considerando que existe un año seco y un año húmedo tomado del CAPITULO VII. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la

normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros  $p, q$  y  $P, Q$  con distintos valores de  $d$  y  $D$  con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes  $d$  y  $D$  mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020 en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 40.



**Figura 40.- ARIMAs propuestas para  $\text{SO}_2$ :  $\text{ARIMA}(1,0,2)(2,0,0)[24]$ ,  $\text{ARIMA}(1,1,2)(2,0,0)[24]$ ,  $\text{ARIMA}(1,0,2)(0,1,1)[24]$ ,  $\text{ARIMA}(0,1,4)(0,1,1)[24]$ ,  $\text{ARIMA}(0,2,3)(1,1,0)[24]$  y  $\text{ARIMA}(3,1,)(2,1,0)[24]$ .**

Por lo que se puede notar que se tiene un  $\text{ARIMA}(0,1,4)(0,1,1)[24]$  que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes debido que no tiene problemas de Drift o de no poseer una media en cero en los residuos. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la Tabla 18.

**Tabla 24.- Parámetros de ARIMA(0,1,4)(0,1,1)[24]**

	MA 1	MA 2	MA 2	MA 4	SMA1
<b>Parámetros</b>	-0.7038	-0.104	0.0345	-0.1234	-0.7777

### **XI.3.6 Pronóstico de Dióxido de Nitrógeno**

Entre los datos a estudiar del Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), se tiene en cuenta 204 meses estimados de los cuales corresponden a 17 años de observaciones.

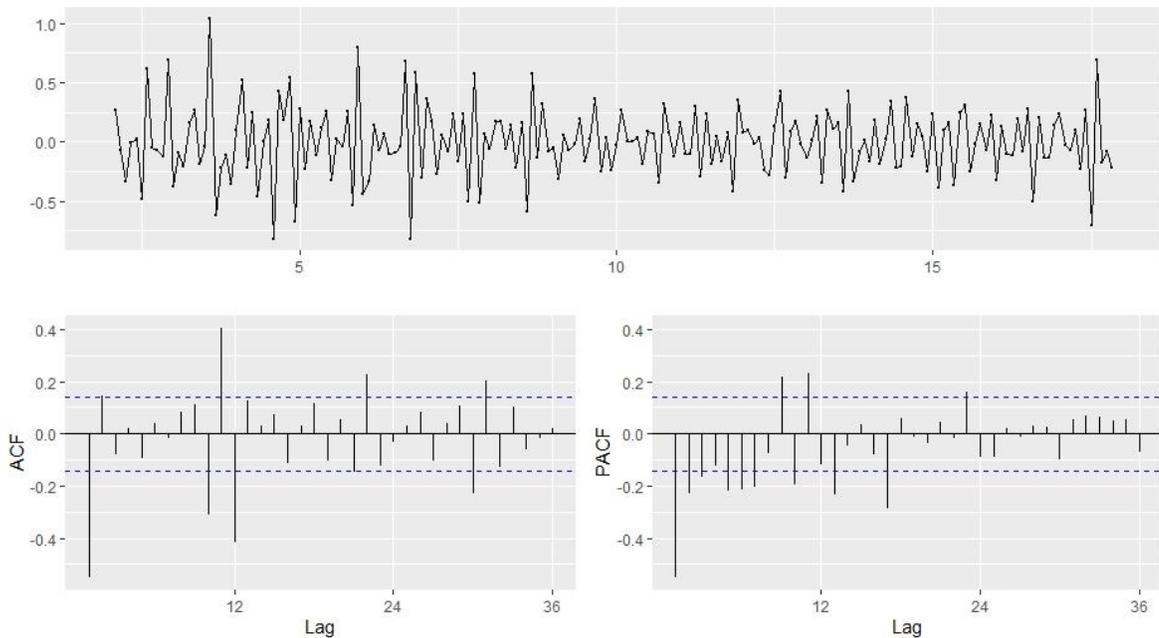
**Tabla 25.- Datos estadísticos base de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Min	1st Qu	Mediana	Media	3rd Qu	Max
<b>0.2188</b>	0.5387	0.6981	0.7247	0.8442	2.2932

Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, tenido como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95% de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las acumulaciones de dióxido de nitrógeno mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado -54.76 y considerándose como el mejor valor entre los distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I tanto en el modelo SARIMA como ARIMA de valor uno.

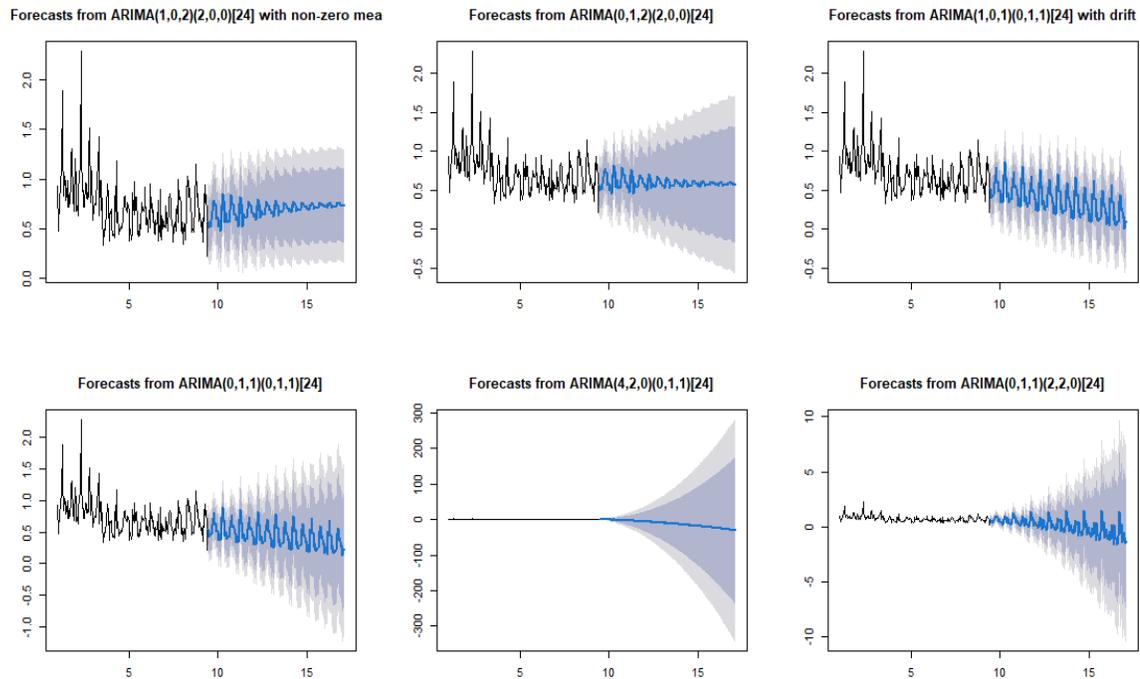
Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque, estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.



**Figura 41.-Correlograma de ACF y PACF de NO<sub>2</sub> con d=1 y D=1 y frecuencia de 24.**

El modelo presente en la Figura 41, tiene del ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24] los valores d y D de uno y uno correspondientemente y una frecuencia de 24 meses considerando que existe un año seco y un año húmedo tomado del CAPITULO VII. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros p,q y P,Q con distintos valores de d y D con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes d y D mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020

en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 42.



**Figura 42.- ARIMAs propuestas para NO<sub>2</sub>: ARIMA(1,0,2)(2,0,0)[24], ARIMA(0,1,2)(2,0,0)[24], ARIMA(1,0,1)(0,1,1)[24], ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[24], ARIMA(4,2,0)(0,1,1)[24] y ARIMA(0,1,1)(2,2,0)[24].**

Por lo que se puede notar que se tiene un ARIMA (0,1,1)(0,1,1)[24] que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes debido que no tiene problemas de Drift o de no poseer una media en cero en los residuos. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la Tabla 26.

**Tabla 26.- Parámetros de ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[24]**

	<b>MA 1</b>	<b>SMA1</b>
<b>Parámetros</b>	-0.8818	-0.7181

### XI.3.7 Pronóstico de Ozono

Entre los datos a estudiar del Ozono ( $O_3$ ), se tiene en cuenta 226 meses estimados de los cuales corresponden a 18.83 años de observaciones.

**Tabla 27.- Datos estadísticos base de Ozono ( $O_3$ )**

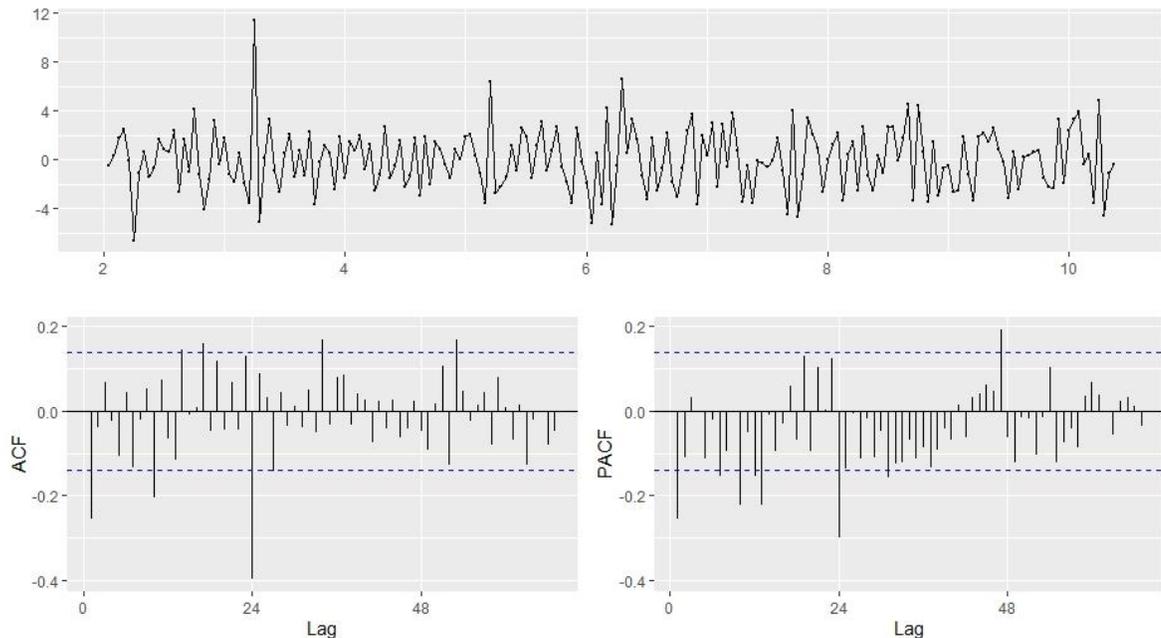
Min	1st Qu	Mediana	Media	3rd Qu	Max
73.38	79.60	84.40	84.28	88.75	94.61

Estos datos fueron sometidos a los modelos ACF y PACF, previo a procesarlos en modelos ARIMAS. Esto con el fin de tener la comprobación del modelo mediante el proceso de autocorrelación mencionados en los apartados IX.3.5.1 y IX.3.5.2 respectivamente, tenido como resultado las autocorrelaciones simples y parciales están cerca del rango de aceptación sugerido, es decir, aproximadamente el 95% de las autocorrelaciones residuales caen dentro del rango deseado, y se concluye que las autocorrelaciones residuales no son significativas o muy cercanos a cero a un nivel de significación = 0.05 y deben suponer que no hay correlación entre los residuos del modelo para la mayoría de las acumulaciones de Ozono mensual. Además, se puede deducir visualmente que la media de los residuos es igual a cero.

Además, el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es una medida ampliamente utilizada de un modelo estadístico. Se puede lograr cuantificar la bondad de ajuste y la simplicidad/parsimonia del modelo en una sola estadística dando como resultado 844.29 y considerándose como el mejor valor entre los distintos modelos SARIMA evaluados con normalización I tanto en el modelo SARIMA como ARIMA de valor uno.

Sin embargo, existe algunos valores que tiene un cierto punto de incertidumbre, dado a que estos son valores extremos máximos y mínimos en la serie. Aunque,

estos datos extremos no perjudican en el modelo de estimación debido a las pocas proporciones con respecto a las demás cifras mensuales.

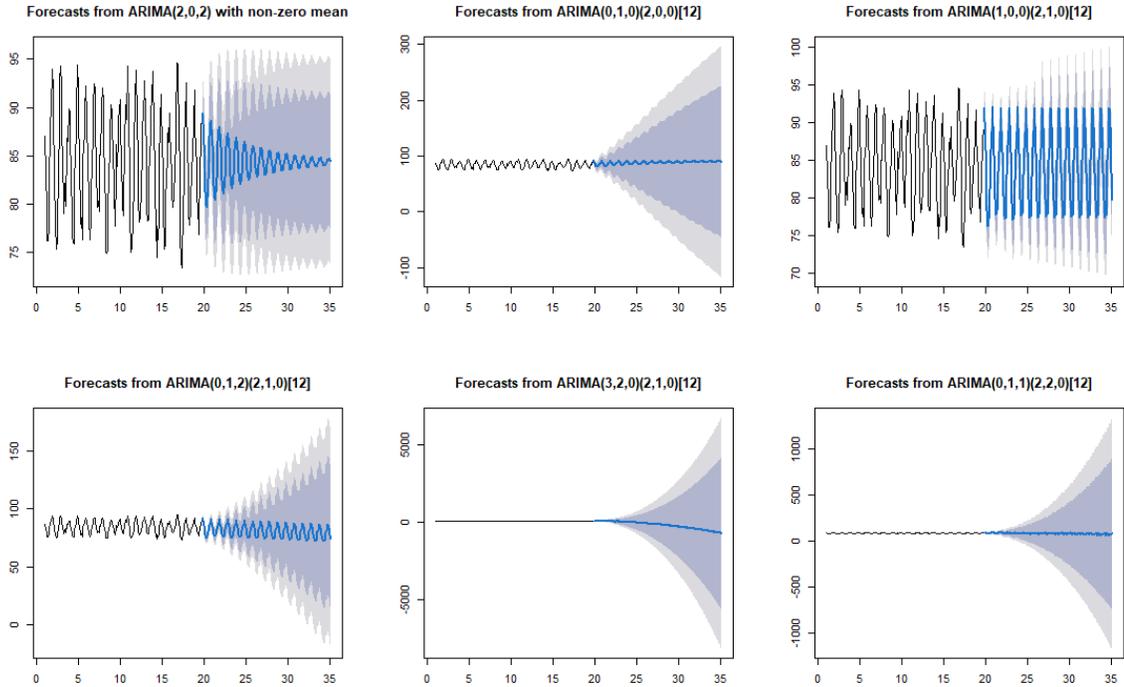


**Figura 43.-Correlograma de ACF y PACF de Ozono con  $d=0$  y  $D=1$  y frecuencia de 24.**

El modelo presente en la

Figura 33.-Correlograma de ACF y PACF de precipitación con  $d=0$  y  $D=1$  y frecuencia de 24., tiene del  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[24]$  los valores  $d$  y  $D$  de uno y uno correspondientemente y una frecuencia de 12 meses, puesto que el ozono no tiene el comportamiento de variación con respecto a los años húmedos y secos. Por lo tanto, estos valores mejoran la media de los residuos en cero, la normalización y la estacionalidad en los datos. Una vez contemplado el modelo se realizó la estimación de los parámetros  $p,q$  y  $P,Q$  con distintos valores de  $d$  y  $D$  con el fin de corroborar que el mejor modelo se obtiene con los coeficientes  $d$  y  $D$  mencionados. Además de incluir el pronóstico de 15 años posteriores al año 2020

en cada uno de los modelos, y ver el comportamiento los parámetros en la Figura 44.



**Figura 44.- ARIMAs propuestas para O<sub>3</sub>: ARIMA(2,0,2), ARIMA(0,1,0)(2,0,0)[12], ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[24], ARIMA(0,1,2)(2,1,0)[12], ARIMA(3,2,0)(2,1,0)[12] y ARIMA(0,1,1)(2,2,0)[12].**

Por lo que se puede notar que se tiene un ARIMA (1,0,0)(2,1,0)[12] que posee el mejor pronóstico entre las seis graficas presentes debido que no tiene problemas de Drift o de no poseer una media en cero en los residuos. Con dicho modelo ya es posible tener los resultados a 15 años de pronóstico con el fin de tener el dato para el cálculo de la disolución. Por lo tanto, la ecuación quedaría compuesta de los parámetros de la.

**Tabla 28.- Parámetros de ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[12]**

	AR 1	SAR 1	SAR 2
<b>Parámetros</b>	-0.5452	-0.8160	-0.4660

#### XI.4. Cálculo de Disolución

Obtenido los modelos ARIMA de cada variable (Precipitación, Temperatura, Humedad, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>) es posible calcular la disolución de la ZA de Kohunlich, tomando en cuenta el registro de estimaciones previas y los pronósticos obtenidos de la variable para 15 años. En resumen, se tiene un total de 32 años completos de datos para poder obtener el cálculo de disolución, donde el registro se inicia en el 2003 y concluye para el año 2035.

Uno de los puntos importantes a aclarar es que los modelos ARIMAS fueron pronosticados por medio de sumatorias y medias mensuales. Sin embargo, el modelo de Lipfert, indicado en el apartado IX.4, tiene como la consideración datos de mediadas y sumatorias anuales. Por lo que se optó por realizar el procedimiento de ajuste anual para cada uno de los factores obteniendo la Tabla 29.

**Tabla 29.- Datos Estimados y pronosticas de las variables (2003-2035)**

AÑO	PRECI- PITACION (m)	SO2 (µg/m3)	NO2 (µg/m3)	O3 (µg/m3)	HUME -DAD (%)	TEMPE -TURA (K)
2003	0.59	4.54	0.00	1016.33	67.29	296.17
2004	0.70	3.94	2.22	1012.05	66.83	295.96
2005	1.01	4.18	12.38	1009.73	66.89	296.25
2006	1.03	4.08	10.88	1012.60	68.60	296.00
2007	1.27	3.83	12.25	1015.25	67.80	296.31
2008	1.37	4.00	10.77	1013.16	66.99	296.08
2009	0.85	3.91	9.85	1016.33	66.98	296.28
2010	1.07	3.85	7.45	1000.81	68.61	296.15
2011	1.55	4.06	7.23	1020.76	67.19	296.26
2012	1.54	3.93	7.92	1027.49	67.57	296.13
2013	1.61	3.97	7.49	1008.00	68.82	296.48
2014	0.95	3.83	7.55	1017.97	67.77	296.31
2015	1.07	3.74	7.44	1029.70	67.00	296.67
2016	1.08	4.64	6.86	985.39	68.10	296.75
2017	1.02	4.08	7.44	1004.38	67.28	296.59
2018	1.23	4.04	7.69	1023.49	67.87	296.32
2019	0.73	4.14	8.47	995.33	65.58	296.82
2020	1.74	3.91	8.23	1011.10	67.71	296.82

**Tabla 30.- Datos pronosticados con los modelos ARIMAS**

<b>AÑO</b>	<b>PRECI- PITACION (m)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>O3 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>HUME -DAD (%)</b>	<b>TEMPE -TURA (K)</b>
<b>2021</b>	<b>1.07</b>	<b>3.88</b>	<b>6.91</b>	<b>1013.24</b>	<b>67.42</b>	<b>296.82</b>
<b>2022</b>	1.42	3.97	7.29	1002.92	67.90	296.74
<b>2023</b>	1.10	3.85	6.41	1005.37	66.91	296.92
<b>2024</b>	1.51	3.95	6.89	1013.58	67.84	296.83
<b>2025</b>	1.05	3.82	4.93	1002.87	66.52	297.01
<b>2026</b>	1.69	3.92	5.55	1010.09	67.80	296.91
<b>2027</b>	1.18	3.80	3.36	1007.88	66.97	297.09
<b>2028</b>	1.65	3.90	4.45	1007.82	67.85	296.99
<b>2029</b>	1.23	3.77	2.52	1005.66	66.83	297.18
<b>2030</b>	1.71	3.87	3.47	1010.80	67.83	297.08
<b>2031</b>	1.25	3.75	1.61	1004.97	66.75	297.26
<b>2032</b>	1.80	3.85	2.45	1009.82	67.83	297.16
<b>2033</b>	1.33	3.72	0.75	1006.37	66.86	297.34
<b>2034</b>	1.83	3.82	2.07	1009.19	67.84	297.25
<b>2035</b>	1.38	3.70	0.27	1005.75	68.42	295.47

Con los datos derivados de las estimaciones y pronósticos, se planteó calcular la variable de Ácido nítrico mediante el modelo de la Ec. 52, dado que es un parámetro requerido por el modelo de la Ec. 51, usado la temperatura, humedad, dióxido de nitrógeno y el ozono y una vez obtenido dicho resultado, realizar el modelo de disolución, obtenido en este caso el fenómeno a estudiar.

**Tabla 31.- Datos de disolución estimados y pronosticados para la zona arqueológica**

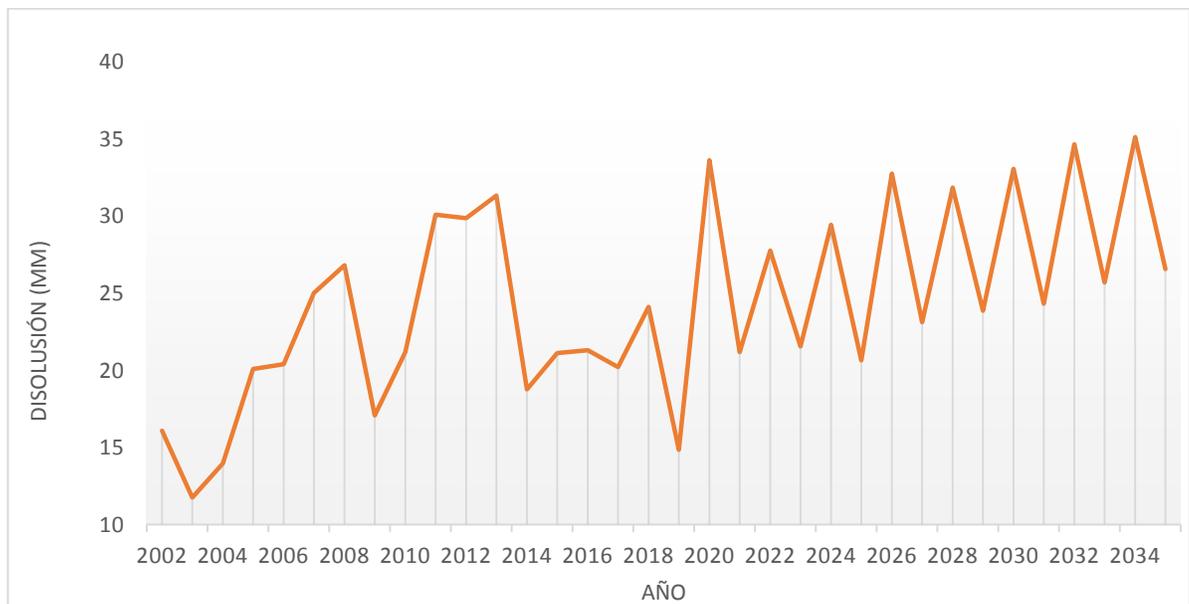
<b>AÑO</b>	<b>PRECI- PITACION (m)</b>	<b>SO2 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>NHNO3 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Disolucion (<math>\mu\text{m}/\text{año}</math>)</b>
<b>2003</b>	0.59	4.54	0.00	11.75
<b>2004</b>	0.70	3.94	2.05	13.97

<b>2005</b>	1.01	4.18	4.89	20.08
<b>2006</b>	1.03	4.08	4.61	20.39
<b>2007</b>	1.27	3.83	4.92	25.03
<b>2008</b>	1.37	4.00	4.54	26.83
<b>2009</b>	0.85	3.91	4.39	17.08
<b>2010</b>	1.07	3.85	3.81	21.20
<b>2011</b>	1.55	4.06	3.77	30.09
<b>2012</b>	1.54	3.93	3.95	29.88
<b>2013</b>	1.61	3.97	3.89	31.33
<b>2014</b>	0.95	3.83	3.87	18.77
<b>2015</b>	1.07	3.74	3.90	21.12
<b>2016</b>	1.08	4.64	3.70	21.31
<b>2017</b>	1.02	4.08	3.84	20.21
<b>2018</b>	1.23	4.04	3.92	24.12
<b>2019</b>	0.73	4.14	4.07	14.85
<b>2020</b>	1.74	3.91	4.10	33.64
<b>Pronóstico de las variables</b>				
<b>2021</b>	1.07	3.88	3.76	21.20
<b>2022</b>	1.42	3.97	3.84	27.76
<b>2023</b>	1.10	3.85	3.61	21.56
<b>2024</b>	1.51	3.95	3.77	29.44
<b>2025</b>	1.05	3.82	3.16	20.66
<b>2026</b>	1.69	3.92	3.38	32.77
<b>2027</b>	1.18	3.80	2.63	23.12
<b>2028</b>	1.65	3.90	3.04	31.87
<b>2029</b>	1.23	3.77	2.28	23.87
<b>2030</b>	1.71	3.87	2.69	33.07
<b>2031</b>	1.25	3.75	1.83	24.33
<b>2032</b>	1.80	3.85	2.27	34.68
<b>2033</b>	1.33	3.72	1.25	25.70
<b>2034</b>	1.83	3.82	2.10	35.13
<b>2035</b>	1.38	3.70	0.71	26.58

Se puede demostrar que la disolución es un proceso que tiende a ser de pocas proporciones con respecto a las otras variables de deterioro como la erosión o la humedad capilar. Esto es debido a su unidad de medida es microscópica y proceso químico es muy lento. Los daños se encuentran expresados en micrómetros al año (Tabla 31) y si lo vemos escalado a la realidad visual puede

ser insignificante. Sin embargo, con el pasar de los años, el acumulado puede ocasionar problemas graves en las estructuras arqueológicas pues en la mayoría de los casos estas construcciones tienen tallados de ornamento que poseen esta sensibilidad macrométrica y podrían perderse si se sigue con el proceso actual.

Si lo resumimos, entre los años 2004 al 2020, ósea 15 años de mediciones estimadas, se tiene que la disolución acumulada es de 389.91  $\mu\text{m}$ . No obstante, el acumulado del pronóstico de los años del 2021 al 2035, ha aumentado en proporciones de un 15 %. Por lo tanto, la disolución para ese periodo de tiempo sería de 460.23  $\mu\text{m}$ . Además, la tendencia de aumento de la temperatura y los contaminantes pueden seguir el aumento dentro de los próximos 15 años como se denota en la Figura 45.



**Figura 45.- Disolución anual para la ZA de Kohunlich**

## CAPITULO XII. CONCLUSIONES

El presente estudio buscó explorar la predicción o pronóstico de las variables hidrogeológicas que afectan a la ZA de Kohunlich con el proceso de disolución mediante un modelo optimizado por el método de ARIMAs. Como se puede apreciar en el apartado de resultados, el uso de estas herramientas estadísticas es confiable para obtener el valor histórico de las variables a futuro para cada una: precipitación, humedad relativa, temperatura, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno y el ozono, presentando una tendencia creciente o decreciente según la variable, y no muestra signos de variaciones cíclicas y estacionales.

Es necesario considerar una serie de limitaciones importantes de este estudio: en primer lugar, la estación hidrometeorológica es adaptada para poder recopilar la información, pero al no tener el tiempo y recopilación suficiente de datos, es imposible tener un análisis riguroso de la disolución y, en segundo lugar, las variables medidas por las imágenes satélites son estimaciones climatológicas de un modelo estadístico y puede que el factor de error de las mediciones sea considerable. Sin embargo, esta investigación es un primer avance a este tipo de estudios, puesto que en la mayoría es tomado desde de un punto actual, sin considerar las condiciones futuras.

Este estudio ha demostrado que, entre los resultados obtenidos, las variables como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) tienen una tendencia a la baja (Figura 39 y Figura 41) y esto puede ser signo de disminución de la disolución en el fenómeno, puesto que estos son los principales factores en el mismo. No obstante, el aumento de la temperatura y la constante de ozono en el ambiente, así como también el acumulado total de la cantidad de la precipitación está en un proceso de ascenso por lo que puede ocasionar que el proceso de disolución este en aumento (Figura 45).

A pesar de tener las medidas de mantenimiento propias por organizaciones como la INAH-CNCPC. En la ZA de Kohunlich es imposible detener el proceso de disolución, debido a que las estructuras siempre estarán expuesta a la intemperie.

Sin embargo, es probable que con un control y disminución de los gases de efecto invernadero, junto con un mejoramiento de las condiciones medio ambientales, este proceso pueda ser disminuido a un punto que su significancia de deterioro sea en un aproximado de 50 a 100 años, solo queda esperar a las alternativas propuestas para mejorar las condiciones de emisión sean las adecuadas para dicho proceso.

### **XII.1. Recomendaciones**

Aún falta mucho por recorrer en el tema, pero entre las recomendaciones para mejorar el trabajo de investigación son:

- Renovar los modelos de pronóstico cada año que se tenga actualización de los datos proporcionados de la metodología plantea.
- Tener en cuenta el uso de la estación armada para medir las variables de manera mensual y así enriquecer el procedimiento con datos medidos en campo.
- Evitar un exceso de parametrización y un exceso de diferenciación; ya que esto, conducen a la obtención de modelos erróneos.
- Será interesante aplicar otros métodos de pronóstico alternativos a los métodos utilizados en este estudio para que se pueda comparar cuál de ellos se obtenga una mejor estimación de la serie de tiempo. En este sentido, el uso de redes neuronales o algoritmos genéticos y otros métodos puede resultar de gran utilidad.
- La evidencia surgida de estudio sugiere que esta metodología sea realizada para las demás ZAs que tengan las características similares a la propuesta e ir monitoreando cada una de ellas con respecto al proceso de disolución.

## CAPITULO XIII. REFERENCIAS

Allen, G. C., El-Turki, A., Hallam, K. R., McLaughlin, D., & Stacey, M. (2000). Role of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in degradation of limestone. *British Corrosion Journal*, 35(1), 35–38. <https://doi.org/10.1179/000705900101501047>

Anónimo. (11 de junio de 2014). Identidad perdida o patrimonio perdurable. Obtenido de Milenio: <https://www.milenio.com/opinion/editoriales/la-ciudad-vista-por-expertos-jalisco/identidad-perdida-o-patrimonio-perdurable>.

Arumugam, P., & Saranya, R. (2018). Outlier Detection and Missing Value in Seasonal ARIMA Model Using Rainfall Data\*. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1791–1799. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.277>

Aslam, M. (2020). Using the kalman filter with Arima for the COVID-19 pandemic dataset of Pakistan. *Data in Brief*, 31, 105854. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105854>

ASTM International. (2000). Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water (ASTM C20-00). ASTM International, West Conshohocken, PA, July, 3. <https://doi.org/10.1520/C0020-00>

ASTM International. (2000). Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water (ASTM C20-00). ASTM International, West Conshohocken, PA, (July), 3. <https://doi.org/10.1520/C0020-00>

Bowerman, B. L., & O'connell, R. T. (1979). *Time series and forecasting*. North Scituate, MA: Duxbury Press.

Broto, C. 2005. Enciclopedia Broto de patologías en la construcción. Links International. ISBN: 978-84-96424-37-1

C. Klein, C. S. Hurlbut. (1998) Manual de Mineralogía, cuarta edición. Editorial Reverté.

Cámara de Diputados del Congreso de la unión. (1972). LEY FEDERAL SOBRE MONUMENTOS Y ZONAS ARQUEOLOGICAS , ARTISTICOS E HISTORICOS.

Cámara de Diputados del Congreso de la unión. (1972). LEY FEDERAL SOBRE MONUMENTOS Y ZONAS ARQUEOLOGICAS, ARTISTICOS E HISTORICOS.

Cardoso, R., Pedreira, R., & Monteiro, G. (2016). New Approaches to Building Pathology and Durability. (J. M. P. Q. Delgado, Ed.) (Vol. 6). Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7>

Castillo-Miranda, J. O., Torres-Jardón, R., García-Reynoso, J. A., Mar-Morales, B. E., Rodríguez-Gómez, F. J., & Ruiz-Suárez, L. G. (2017). Mapping recession risk for cultural heritage stone in Mexico City due to dry and wet deposition of urban air pollutants. *Atmosfera*, 30(3), 189–207. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.01>

Castillo-Miranda, J. O., Torres-Jardón, R., García-Reynoso, J. A., Mar-Morales, B. E., Rodríguez-Gómez, F. J., & Ruiz-Suárez, L. G. (2017). Mapping recession risk for cultural heritage stone in Mexico City due to dry and wet deposition of urban air pollutants. *Atmosfera*, 30(3), 189–207. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.01>

Castro, A. (1989). Petrografía básica: texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. Madrid, España: Paraninfo.

Childs, E.C. 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. John Wiley and Sons Ltd. New York.

Cuauhtemoc Negrete, J., Romantchik Kriuskova, E., Lopez Canteñas, G. D. J. L., Avila Zuñiga, C. I., & Lopez Hernandez, G. (2018). Arduino Board in the Automation of Agriculture in Mexico, A Review. *International Journal of Horticulture*, 8(6), 52–68. <https://doi.org/10.5376/ijh.2018.08.0006>

Cuauhtemoc Negrete, J., Romantchik Kriuskova, E., Lopez Canteñas, G. D. J. L., Avila Zuñiga, C. I., & Lopez Hernandez, G. (2018). Arduino Board in the Automation of Agriculture in Mexico, A Review. *International Journal of Horticulture*, 8(6), 52–68. <https://doi.org/10.5376/ijh.2018.08.0006>

De la peña gonzález, Ana María y RAMÍREZ LI, Ramón: "Influencia del medio ambiente en el deterioro de las edificaciones". En: "Scielo Arquitectura y Urbanismo". La Habana: CENCREM, 2014

de Turrís, A., Ocando, L., de Romero, M., & Fernández, M. (2013). ¿Pueden los Microorganismos Impactar los Materiales de Construcción?: una Revisión. *Gaceta Técnica*, 10, 23–33.

de Turrís, A., Ocando, L., de Romero, M., & Fernández, M. (2013). ¿Pueden los Microorganismos Impactar los Materiales de Construcción?: una Revisión. *Gaceta Técnica*, 10, 23–33.

Dullien, F.A.L. 1979. *Porous media, fluid transport and pore structure*. Academic Press, Nueva York.

Enrique, M.-L., & Leonel, L.-C. (2016). Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.004>

Fuentes, C., Brambila, F., & Haverkamp, R. (2012). Las Características Hidrodinámicas de los Suelos. In C. Fuentes & L. Rendón Pimentel (Eds.), *Riego por gravedad* (Primera Ed, pp. 62–137). Querétaro, Qro.: Universidad Autónoma de Querétaro.

Gaffney, J. S. (1989). Air Pollution and Materials Damage. Handbook of Environmental Chemistry, 4, 113–186. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-46113-5-4>

García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998)

García, S., Collado, A., & Laura, L. (2011). Metodología de diagnóstico de humedades: La inspección higrotérmica con ayuda instrumental. 4o Congreso de Patología y Rehabilitación de Edificios . Patorr, 1, 100–120. [http://patorreb2012.coag.es/gl/presentacion\\_.htm](http://patorreb2012.coag.es/gl/presentacion_.htm)

García, S., Collado, A., & Laura, L. (2011). Metodología de diagnóstico de humedades: La inspección higrotérmica con ayuda instrumental. 4o Congreso de Patología y Rehabilitación de Edificios . Patorr, (1), 100–120. Retrieved from [http://patorreb2012.coag.es/gl/presentacion\\_.htm](http://patorreb2012.coag.es/gl/presentacion_.htm)

Gaylarde C., Ribas Silva M., Warscheid Th. (2003). “Microbial impact on building materials: an overview”. Materials and Structures. Vol.36, p. 342-346.

GEEK FACTORY. (2019). DS3231 Módulo reloj en tiempo real. 10 de mayo del 2020, de GEEK FACTORY Sitio web: <https://www.geekfactory.mx/tienda/modulos-para-desarrollo/ds3231-modulo-reloj-en-tiempo-real/>

GEEK FACTORY. (2019). Pantalla LCD de 16x2 HD44780 (azul-blanco). 10 de mayo del 2020, de GEEK FACTORY Sitio web: <https://www.geekfactory.mx/tienda/pantallas-lcd/pantalla-lcd-de-16x2-hd44780-azul-blanco/>

Gil Muñoz, M. A. T., & Lasheras Merino, F. (2017). Cámaras de aireación como sistema de control de la humedad de capilaridad en edificios históricos. Análisis de funcionamiento. Informes de La Construcción, 69(548), 1–12. <https://doi.org/10.3989/id.55476>

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Madrid, España: Pearson educación.

Herrera, J. and Aranda, L., 2017. *La Gestión Legal Del Patrimonio Cultural En México*. [online] Revistas.juridicas.unam.mx. Available at: <<https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/hechos-y-derechos/article/view/11605/13469>> [Accessed 1 April 2020].

Hildebrand, K. A., Woo, S. L., Smith, D. W., Allen, C. R., Deie, M., Taylor, B. J., & Schmidt, C. C. (1998). The effects of platelet-derived growth factor-BB on healing of the rabbit medial collateral ligament. *The American journal of sports medicine*, 26(4), 549-554.

Hillel, D. 1971. Soil and Water: Physical principles and processes. Academic Press, New York.

Hu, Z., Zheng, S., Jia, M., Dong, X., & Sun, Z. (2017). Preparation and characterization of novel diatomite/ground calcium carbonate composite humidity control material. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1372–1381. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.03.005>

INAH. (18 de julio de 2016). Red de zonas arqueológicas del INAH. Obtenido de INAH: <https://www.inah.gob.mx/2015-06-12-00-10-09/catalogo>

INEGI, (01/06/2018). 'Áreas Geoestadísticas estatales 1:250000. 2018', escala: 1:250000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI, (1987). 'Conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)', escala: 1:250000. edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI, (27/01/2014). 'Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)', escala: 1:250000. edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.. Aguascalientes, Ags., México.

Koestoer, R. A., Saleh, Y. A., Roihan, I., & Harinaldi. (2019). A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. AIP Conference Proceedings, 2062(January). <https://doi.org/10.1063/1.5086553>

Koestoer, R. A., Saleh, Y. A., Roihan, I., & Harinaldi. (2019). A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. AIP Conference Proceedings, 2062(January). <https://doi.org/10.1063/1.5086553>

Koshkin N. I., Shirkévich M. G. Editorial Mir (1975). Manual de Física Elemental.

Lipfert, F. W. (1989). Atmospheric damage to calcareous stones: Comparison and reconciliation of recent experimental findings. Atmospheric Environment (1967), 23(2), 415–429. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90587-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90587-8)

Lipfert, F. W. (1989a). Air Pollution and Materials Damage. Handbook of Environmental Chemistry, 4, 113–186. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-46113-5-4>

Lipfert, F. W. (1989b). Atmospheric damage to calcareous stones: Comparison and reconciliation of recent experimental findings. Atmospheric Environment (1967), 23(2), 415–429. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90587-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90587-8)

Loayza Briceño, S. A., & Zavaleta Caballero, R. O. (2017). MODELAMIENTO DE LA RELACION CAPILARIDAD- DETERIORO EN EDIFICACIONES DEL SECTOR VISTA ALEGRE. DISTRITO VICTOR LARCO HERRERA. PROVINCIA TRUJILLO. Retrieved from [http://www.gonzalezcabeza.com/documentos/CRECIMIENTO\\_MICROBIANO.pdf](http://www.gonzalezcabeza.com/documentos/CRECIMIENTO_MICROBIANO.pdf)

Lobo, G. P., & Bonilla, C. A. (2018). A simple model for estimating changes in rainfall erosivity caused by variations in rainfall patterns. *Environmental Research*, 167, 515–523. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.009>

Luo, Y., Yin, B., Peng, X., Xu, Y., & Zhang, L. (2019). Wind-rain erosion of Fujian Tulou Hakka Earth Buildings. *Sustainable Cities and Society*, 50(May), 101666. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101666>

Mainou, L. (2012). El intemperismo de calizas en monumentos prehispánicos mayas. El caso de la cornisa del edificio 5N2, Río Bec. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 49-60. Retrieved May 15, 2020, from [www.jstor.org/stable/24921080](http://www.jstor.org/stable/24921080)

natylaps mechatronics. (2019). Sensor DTH22. 10 de mayo del 2020, de natylaps mechatronics Sitio web: <https://naylorpmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>

Niroumand, H., Antonio Barcelo, J., & Saaly, M. (2016). The Role of Archeology on Earth Buildings and Earth Architecture in the World. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(25). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i25/77615>

Organización Meteorológica Mundial. (2010). Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos No 8.

Organizacion Meterología Mundial. (2010). Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción No 485 Volumen I-Aspectos mundiales.

Organizacion Meterología Mundial. (2010). Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción No 485 Volumen I-Aspectos mundiales.

Orihuela, J. (2019). Erosion que afecta el sitio arqueologico El Morrillo, Matanzas, Cuba, (January).

Pérez Echazábal, Lucrecia. (2010) Influencia del medio ambiente en la patología de los monumentos de alto valor histórico construidos con materiales pétreos naturales. Centro histórico de La Habana. Tesis de doctorado. ISJAE. La Habana, Cuba.

Pinzón, A., Castillo, M., González, E., Araúz, J., & Villarreal, V. (2018). Sistema de detección de sustancias y partículas contaminantes para el ambiente a través de sensores arduino. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 55–59. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1868>

Pinzón, A., Castillo, M., González, E., Araúz, J., & Villarreal, V. (2018). Sistema de detección de sustancias y partículas contaminantes para el ambiente a través de sensores arduino. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 55–59. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1868>

Ponce-Caballero, C., Gamboa-Marrufo, M., López-Pacheco, M., Cerón-Palma, I., Quintal-Franco, C., Giácoman-Vallejos, G., & Loría-Arcila, J. H. (2013). Seasonal variation of airborne fungal propagules indoor and outdoor of domestic environments in Mérida, Mexico. *Atmosfera*, 26(3), 369–377. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71083-X](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71083-X)

Qin, M., Hou, P., Wu, Z., & Wang, J. (2020). Precise humidity control materials for autonomous regulation of indoor moisture. *Building and Environment*, 169, 106581. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106581>

Ramírez-Vázquez, M. (2017). Vida microscópica de las zonas arqueológicas. Obtenido de INECOL: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/bienesmuebles-inmuebles/17-ciencia-hoy/706-vida-microscopica-de-las-zonas-arqueologicas>

Real Academia Española (10 de mayo 2020). Diccionario de la lengua española.

Renderos, D. M., & Molina, M. G. (2008). Ajuste de un modelo ARIMA para la Precipitación Diaria en la Zona Oriental de El Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12440/>

Richards, L.A. 1961. Trans. 7th Inter. Congr. Soil Sci., Madison, Wisconsin. 1: 67-69.

Saiz-Jimenez, C. The Biodeterioration of Building Materials. (Chapter 4): p. 4.1-4.6. 2.

Stokes, R. H., & Robinson, R. A. (1949). Standard Solutions for Humidity Control at 25° C. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(9), 2013–2013. <https://doi.org/10.1021/ie50477a041>

Tarbutk, E. y Lutgens, F, (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

U.S Environmental Protection Agency. (2016). Guía para el Control de la Humedad en el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Edificaciones. Retrieved from [https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2016-07/documents/moisture\\_control\\_guidance\\_spanish\\_april\\_2016\\_508\\_final.pdf](https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2016-07/documents/moisture_control_guidance_spanish_april_2016_508_final.pdf)

Vergès-Belmin, V, (2008). *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre: Champigny/Marne, France*, International Council on Monuments and Sites, Comité scientifique international "Pierre" de l'ICOMOS, Monuments et Sites 15, 79 p.

Yan, B., & Chen, Z. (2018). A prediction approach for precise marketing based on ARIMA-ARCH Model: A case of China Mobile. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 47(16), 4042–4058. <https://doi.org/10.1080/03610926.2017.1380827>

Yang, H., Liu, Y., Kong, X. fei, Chen, W. he, & Yao, C. qiang. (2018). Preparation and hygrothermal performance of composite phase change material wallboard with humidity control based on expanded

perlite/diatomite/paraffin. *Journal of Central South University*, 25(10), 2387–2398. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3923-4>

Zavala Ibañez, D. (18 de junio de 2019). Teotihuacán: cuánto daño le hacen los turistas a las pirámides. Obtenido de Infobae: <https://www.infobae.com/america/mexico/2019/06/18/teotihuacan-cuanto-dano-le-hacen-los-turistas-a-las-piramides/>

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

Zheng, J., Shi, J., Ma, Q., Dai, X., & Chen, Z. (2017). Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials. *Applied Thermal Engineering*, 114, 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.203>

Huitron, A. G. (2022). Diagnóstico criminológico sobre la delincuencia común en la Ciudad de México (2015-2017). *El Cotidiano*, 37(231), 23-35.

García Mendoza, D. B. (2018). *Diagnóstico criminológico de la colonia Patrimonio, Puebla* (Bachelor's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).

Mataoui, N. M. (2019). EL INFORME CRIMINOLÓGICO. VALORACIÓN DEL RIESGO DE REINCIDENCIA EN LA CONCESIÓN DE LA SUSPENSIÓN DE LA PENA PRIVATIVA DE LIBERTAD. *La Criminología que viene*, 187.

## CAPITULO XIV. ANEXOS

### XIV.1. Código Fuente de estación Arduino

```
1. //codigo fuente de programa del sensor de variables
   climatologicas
2. //Librerias
3. #include <SPI.h>
4. #include <SD.h>
5. #include <DHT.h>
6. #include <Wire.h>
7. #include <Adafruit_Sensor.h>
8. #include <Adafruit_BME280.h>
9. #include <RTClib.h>
10.     #include <LiquidCrystal_I2C.h>
11.     #include <LowPower.h>
12.
13.     //Constantes
14.     #define SSpin 10
15.     File archivo;
16.     #define DHTPIN 4      // Siempre revisar cual pin esta
   conctado el sensor
17.     #define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302)
18.     DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //// Iiniciamos DHT sensor
   para normal 16mhz Arduino
19.     RTC_DS3231 rtc; /// tiempo real
20.     #define anInput A0 // pin analogo del MQ135
21.     #define co2Zero 55 //calibracion CO2 0 nivel
22.     #define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)//calibracion
   sensor bme280
23.     Adafruit_BME280 bme;
24.
25.
26.     //Variables
27.     int chk;
28.     float hum; //almacena valores de humedad
29.     float hum2; //almacena valores de humedad del segundo
   sensor
30.     float temp; //almacena valores de temperatura
31.     float temp2; //almacena valores de temperatura del
   segundo sensor
32.     float presion; //almacena valores de presion atmosferica
33.     float pr; //punto de rocio
34.     float pr2; //punto de rocio
35.
36.     void setup(){
37.         pinMode(anInput,INPUT); //MQ135 input
38.         pinMode(LED_BUILTIN,OUTPUT);
```

```

39.     Serial.begin(9600);
40.
41.     if (!bme.begin(0x76)) {
42.         Serial.println("Could not find a valid BME280
sensor, check wiring!");
43.         while (1);
44.     }
45. }
46.
47. void loop()
48. {
49.     if (!rtc.begin()){
50.         Serial.println("modulo no conectado !");
51.         while (1);
52.     }
53.     //si se requiere de ajuste de hora activar
54.     //rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
55.
56.
57.     dht.begin();
58.
59.     // iniciamos la SD
60.     Serial.println("Iniciando tarjeta ...");
61.     if (!SD.begin(SSpin)) {
62.         Serial.println("fallo en inicializacion !");
63.
64.         digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
65.         delay(1000);
66.         digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
67.         delay(1000);
68.
69.         return;
70.     }
71.     Serial.println("Iniciacion correcta");
72.     archivo= SD.open("DATALOG.txt", FILE_WRITE);
73.
74.     if (archivo) {
75.         for (int i=1; i < 2; i++){
76.
77.             //para medir temperatura y humedad relativa
78.             hum = dht.readHumidity();
79.             hum2 = bme.readHumidity();
80.             temp = dht.readTemperature();
81.             temp2 = bme.readTemperature();//almacena los datos
para el sernsor de humedad
82.             DateTime fecha=rtc.now(); //toma los datos para el
reloj
83.
84.             //para medir humedad de suelo

```

```

85.         int lecthum=analogRead(A1); //toma datos para
           humedad de suelo
86.         int lectPor = map(lecthum,1010,298,0,100); //conversion a
           porcentaje
87.
88.         //para medir presion atmosferica
89.         presion = (bme.readPressure() / 100.0F);
90.
91.         //para medir CO2
92.         int co2now[10]; //int array for co2 readings
93.         int co2raw = 0; //int for raw value of co2
94.         int co2comp = 0; //int for compensated co2
95.         int co2ppm = 0; //int for calculated ppm
96.         int zzz = 0; //int for averaging
97.         int grafX = 0; //int for x value of graph
98.
99.         //mpara medir punto de rocio
100.        pr = pow((hum/100),0.125)*(112+0.9*temp)+(0.1*temp)-112;
101.        pr2 = pow((hum2/100),0.125)*(112+0.9*temp2)+(0.1*temp2)-112;
102.
103.        for (int x = 0;x<10;x++){ //samplpe co2 10x over 2
           seconds
104.        co2now[x]=analogRead(A0); delay(200);
105.        }
106.        for (int x = 0;x<10;x++){ //add samples together
107.        zzz=zzz + co2now[x];
108.        }
109.
110.        co2raw= zzz/10; //divide samples by 10
111.        co2comp= co2raw - co2Zero; //get compensated value
112.        co2ppm= map(co2comp,0,1010,400,5000); //map value
           for atmospheric levels
113.
114.        //lectura de archivo
115.
116.        archivo.print(fecha.day());
117.        archivo.print("/");
118.        archivo.print(fecha.month());
119.        archivo.print("/");
120.        archivo.print(fecha.year());
121.        archivo.print(",");
122.        archivo.print(fecha.hour());
123.        archivo.print(":");
124.        archivo.print(fecha.minute());
125.        archivo.print(",");
126.        archivo.print(temp);

```

```

127.     archivo.print(",");
128.     archivo.print(temp2);
129.     archivo.print(",");
130.     archivo.print(hum);
131.     archivo.print(",");
132.     archivo.print(hum2);
133.     archivo.print(",");
134.     archivo.print(lectPor);
135.     archivo.print(",");
136.     archivo.print(co2ppm);
137.     archivo.print(",");
138.     archivo.print(presion);
139.     archivo.print(",");
140.     archivo.print(pr);
141.     archivo.print(",");
142.     archivo.println(pr2);
143.     //impresion en serial
144.
145.     Serial.print(i);
146.     Serial.print(",");
147.     Serial.print(fecha.day());
148.     Serial.print("/");
149.     Serial.print(fecha.month());
150.     Serial.print("/");
151.     Serial.print(fecha.year());
152.     Serial.print(",");
153.     Serial.print(fecha.hour());
154.     Serial.print(":");
155.     Serial.print(fecha.minute());
156.     Serial.print(",");
157.     Serial.print(temp);
158.     Serial.print(",");
159.     Serial.print(temp2);
160.     Serial.print(",");
161.     Serial.print(hum);
162.     Serial.print(",");
163.     Serial.print(hum2);
164.     Serial.print(",");
165.     Serial.print(lectPor);
166.     Serial.print(",");
167.     Serial.print(co2ppm);
168.     Serial.print(",");
169.     Serial.print(presion);
170.     Serial.print(",");
171.     Serial.print(pr);
172.     Serial.print(",");
173.     Serial.println(pr2);
174.     delay(74000);
175.     }

```

```

176.     archivo.close();
177.     Serial.println("escritura completa");
178.   } else{
179.     Serial.println("error en apertura de datos.txt");
180.   }
181.
182.   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
183.   delay(2000);
184.   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
185.   delay(2000);
186.
187.   for (int i = 0 ; i < 24 ; i++)
188.     LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
189. }

```

## XIV.2. Código fuente de modelos ARIMA

```

1. # Conversion de imagenes nc4, geoferenciar, corregir a wsg84,
2. # Obtener de las imagenes satelitales la extracion de datos
   estudios
3. # estadisticos
4. # Modelos ARIMAS
5. #
6. # Programador           Fecha           Version
7. #=====               =====   =====
8. # Miguel Sanchez       21/06/2021 1.40
9.
10. #install.packages('rgdal')
11. #install.packages('sp')
12. #install.packages('raster')
13. #install.packages('maptools')
14. #install.packages('stringr')
15. #install.packages('jpeg')
16. #install.packages('fields')
17. #install.packages('tidyverse')
18. #install.packages('plyr')
19. #install.packages('sp')
20. #install.packages('gstat')
21. #install.packages('automap')
22. #install.packages('rgdal')
23. #install.packages('maptools')
24. #install.packages('rgeos')
25. #install.packages('dplyr')
26. #install.packages('ggplot2')
27. #install.packages('scales')
28. #install.packages('magrittr')
29. #install.packages('sf')
30. #install.packages('cmocean')

```

```
31. #install.packages('RColorBrewer')
32. #install.packages('ncdf4')
33. #install.packages('lubridate')
34.
35.
36.
37. #paqueria para usar en modelo, si no se tiene instalado,
    favor de volver a instalar en Rstudio
38. library(rgdal)
39. library(sp)
40. library(raster)
41. library(maptools)
42. require(stringr)
43. library(jpeg)
44. library(fields)
45. library(rgeos)
46. library(tidyverse)
47. library(plyr)
48. library(sp)
49. library(gstat)
50. library(automap)
51. library(rgdal)
52. library(raster)
53. library(maptools)
54. library(rgeos)
55. library(dplyr)
56. library(ggplot2)
57. library(scales)
58. library(magrittr)
59. library(sf)
60. library(cmocean)
61. library(RColorBrewer)
62. library(ncdf4)
63. library(lubridate)
64. library(ggplot2)
65. library(TTR)
66. library(stats)
67. library(aTSA)
68. library(astsa)
69. library(xtable)
70. library(forecast)
71. library(tidyverse)
72. library(lubridate)
73. library(foreign)
74. library(quantmod)
75. library(tseries)
76. library(corrgram)
77. library(corrplot)
78.
```

```

79.     #comprobacion de apertura del archivo
80.     r <- raster("MERRA2_100.tavgM_2d_aer_Nx.198001.nc4.nc4")
81.     plot(r)
82.
83.     #Cargando lista de imagenes
84.     lista<-read.table("lista.txt",h=FALSE)
85.     lista3<-as.vector(t(lista))
86.
87.     #para comensar es necesario abrir con una nueva funcion
88.     nc4totifftrans<-function(name){
89.         k <- length(name) #esta Seccion del codigo permite
            tener un a barra de avance pues el procedimiento puede tardar
            un largo periodo de tiempo
90.         pbar <- create_progress_bar('text')
91.         pbar$init(k)
92.         for(i in 1:length(name)) { #Inicio de la condicional
            que permite realizar el codigo a varios archivos
93.             nombre<-paste(str_c(name[i])) #coloca el nombre del
            archivo a procesar
94.             r <- raster(nombre) #Convierte el archivo en formato
            RASTER para su procesamiento
95.             output<-paste(str_c(name[i]),'.tif',sep="") #Coloca
            una variable del nuevo nombre del archivo
96.             writeRaster(r,file=output,format='GTiff',overwrite=TRUE) #Exp
            orta la variable a formato TIFF
97.             pbar$step() # adelanta un paso la barra de avance
98.         } #termina la condicional
99.     } #Termina la Función
100.
101.
102.     #FUNCION QUE PERMITE CONVERTIR PIXELES EN UNIDADES
            CORRECTAS DE SO2
103.     #Basandose de la metodologia de documento
104.     KGM3_MICROM3<-function(name){ #Se inicia funcion
105.         for(i in 1:length(name)) {
106.             k <- length(name) #esta Seccion del codigo permite
            tener un a barra de avance pues el procedimiento puede tardar
            un largo periodo de tiempo
107.             pbar <- create_progress_bar('text')
108.             pbar$init(k)
109.             nombre<-paste(str_c(name[i]),'.tif',sep="") #coloca
            el nombre del archivo a procesar (debe estar georeferenciado
            con el programa anterior)
110.             r <- raster(nombre) #Convierte el archivo en formato
            RASTER para su procesamiento en R
111.             #calculos para temperatura
112.             CONVERSION <- function(x) {x*1000000000}
113.             r1t<-calc(r,CONVERSION)

```

```

114.     outputtif<-
       paste(str_c(name[i]),'_MICROM3.tif',sep="") #Coloca una
       variable del nuevo nombre del archivo
115.     writeRaster(r1t,file=outputtif,format='GTiff',overwrite=TRUE)
       #Exporta la variable a formato TIFF
116.     pbar$step() # adelanta un paso la barra de avance
117.     } #termina la condicional
118.     } #Termina la Función
119.
120.     #FUNCION QUE PERMITE CONVERTIR PIXELES EN UNIDADES
       CORRECTAS DE NO2
121.     #Basandose de la metodologia de documento
122.     MOLECM2_M2_NO2<-function(name){ #Se inicia funcion
123.     for(i in 1:length(name)) {
124.     k <- length(name) #esta Seccion del codigo permite
       tener un a barra de avance pues el procedimiento puede tardar
       un largo periodo de tiempo
125.     pbar <- create_progress_bar('text')
126.     pbar$init(k)
127.     nombre<-paste(str_c(name[i]),'.tif',sep="") #coloca
       el nombre del archivo a procesar (debe estar georeferenciado
       con el programa anterior)
128.     r <- raster(nombre) #Convierte el archivo en formato
       RASTER para su procesamiento en R
129.     #calculos para temperatura
130.     CONVERSION <-
       function(x) {(x*(46.0055/(6.022*(10^23)))*((1*10^4)))/(1*10^4
       )*(10^6)}
131.     r1t<-calc(r,CONVERSION)
132.     outputtif<-
       paste(str_c(name[i]),'_MICROM3.tif',sep="") #Coloca una
       variable del nuevo nombre del archivo
133.     writeRaster(r1t,file=outputtif,format='GTiff',overwrite=TRUE)
       #Exporta la variable a formato TIFF
134.     pbar$step() # adelanta un paso la barra de avance
135.     } #termina la condicional
136.     } #Termina la Función
137.
138.
139.     #Funcion para convertir pixeles en UNIDADES CORRECTAS de
       O3
140.     #Basandose de la metodologia de documento
141.     MOLECM2_M2_O3<-function(name){ #Se inicia funcion
142.     for(i in 1:length(name)) {
143.     k <- length(name) #esta Seccion del codigo permite
       tener un a barra de avance pues el procedimiento puede tardar
       un largo periodo de tiempo

```

```

144.     pbar <- create_progress_bar('text')
145.     pbar$init(k)
146.     nombre<-paste(str_c(name[i]),'.tif',sep='') #coloca
        el nombre del archivo a procesar (debe estar georeferenciado
        con el programa anterior)
147.     r <- raster(nombre) #Convierte el archivo en formato
        RASTER para su procesamiento en R
148.     #calculos para temperatura
149.     CONVERSION <-
        function(x) {(((x*(2.652*(10^16))))*(46.0055/(6.022*(10^23))))
        *(10^6)*(10^4))/25000)*0.4}
150.     rlt<-calc(r,CONVERSION)
151.     outputtif<-
        paste(str_c(name[i]),'_MICROM3.tif',sep='') #Coloca una
        variable del nuevo nombre del archivo
152.     writeRaster(rlt,file=outputtif,format='GTiff',overwrite=TRUE)
        #Exporta la variable a formato TIFF
153.     pbar$step() # adelanta un paso la barra de avance
154.     } #termina la condicional
155.   } #Termina la Función
156.
157.
158.   #EXTRACCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA LAS ZONAS
        ARQUEOLOGICAS DE ESTUDIO-ES NECESARIO UN CSV CON LAS
        UBICACIONES WGS 84 DE LAS ZA
159.   extrac_int<-function(name){ #Se inicia funcion
160.     nombre<-paste(str_c(name[1])) #coloca el nombre del
        archivo a procesar (debe estar georeferenciado e intesidades
        con el programa anterior)
161.     r <- raster(nombre) #Convierte el archivo en formato
        RASTER para su procesamiento en R
162.     mm<-
        read.csv("coordenadas_zonas arqueologicas.csv",h=TRUE) #solici
        ta los datos de las estaciones junto con su valores de
        referencia
163.     coordinates(mm) <- ~X+Y #establece los puntos en
        coordenadas Long-Lat en WGS84
164.     #extraccion de puntos para el prime caso y generación
        del data.frame
165.     estra_max <- raster::extract(r, mm,
        buffer = 1,fun=max, df=TRUE)
166.     extract_max <- t(estra_max[,2])
167.     tabla <-data.frame(extract_max)
168.     k <- length(name)#esta Seccion del codigo permite
        tener un a barra de avance pues el procedimiento puede tardar
        un largo periodo de tiempo
169.     pbar <- create_progress_bar('text')
170.     pbar$init(k)

```

```

171.     #extraccion de puntos para los siguientes capas
172.     for(i in 2:k) { #Inicio de la condicional que permite
      realizar el codigo a varios archivos
173.         nombre<-paste(str_c(name[i])) #coloca el nombre del
      archivo a procesar (debe estar georeferenciado con el
      programa anterior)
174.         #print(paste('Extrayendo datos de ',nombre))
175.         r <- raster(nombre)
176.         #extraccion de puntos
177.         estra_max1 <- raster::extract(r, mm,
      buffer = 1,fun=max, df=TRUE)
178.         extract_max1 <- t(estra_max1[,2])
179.         tabla2 <-data.frame(extract_max1)
180.         tabla <-rbind(tabla, tabla2) #se va agragando a la
      grafica los datos de la imagen que extrajo.
181.         pbar$step()} #termina la condicional
182.         v_n<-mm$Nombre
183.         names(tabla)<-v_n
184.         #y<-substr(name, 1, 4)
185.         #m<-substr(name,5,6)
186.         #d<-substr(name,7,8)
187.         #h<-substr(name,9,10)
188.         #mi<-substr(name,11,12)
189.         #time<-seq(ISOdatetime(y[1],m[1],d[1],h[1],mi[1],0),
      ISOdatetime(y[length(name)],m[length(name)],d[length(name)],h
      [length(name)],mi[length(name)],0), by=(185*15))
190.         rownames(tabla)<-lista3
191.         write.csv(tabla,"datos_NO2_DIARIOS.csv",
      row.names = TRUE) #se almacena los datos de la estación
192.     } #termina la función
193.
194.
195.
196.
197.     #PROCESO DE SERIE DE TIEMPOS DE VARAIBLES DE ESTUDIO
198.
199.
200.     #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
201.     Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
202.     layout(Conf3x2)
203.     layout.show(6)
204.
205.     #procesamiento de datos precipitacion
206.     fechash<-my(paste(datosp$MES,datosp$ANO))
207.     plot(fechash, datosp$PRECIPITACION,main = "Precipitación
      acumulada mensual (mm)", ylab="Precipitación (mm)",
      xlab="Tiempo")
208.     lines(fechash, datosp$PRECIPITACION,col='red')
209.     R_PRE<-summary(datosp)

```

```

210.     write.csv(x = R_PRE, file = "resumen de datos
      precipitacion.csv", row.names = FALSE)
211.
212.
213.     #procesamiento de datos humedad
214.     fechash<-my(paste(datososh$MES,datososh$AÑO))
215.     plot(fechash, datososh$Kohunlich,main = "Relativa Humedad
      media mensual (%)", ylab="Humedad relativa (%)",
      xlab="Tiempo")
216.     lines(fechash, datososh$Kohunlich,col='red')
217.
218.     #procesamiento de datos TEMPERATURA
219.     fechast<-my(paste(datost$Mes,datost$Año))
220.     plot(fechast, datost$Kohunlich,main = "Temperatura media
      mensual (K)",ylab="Temperatura (K)", xlab="Tiempo")
221.     lines(fechast, datost$Kohunlich,col='red')
222.
223.     #procesamiento de datos NO2
224.     datosno2$i..FECHA2<-dmy(datosno2$i..FECHA)
225.     plot(datosno2$i..FECHA2,datosno2$Kohunlich,main = "Dióxi
      do de nitrógeno acumulada mensual (NO2)",ylab="Dióxido de
      nitrógeno (µg m^-3)", xlab="Tiempo")
226.     lines(datosno2$i..FECHA2, datosno2$Kohunlich,col='red')
227.
228.     #procesamiento de datos SO2
229.     fechasSO2<-my(paste(datososo2$Mes,datososo2$Año))
230.     plot(fechasSO2, datososo2$Kohunlich,main = "Dióxido de
      azufre acumulada mensual (SO2)",ylab="Dióxido de azufre (µg
      m^-3)", xlab="Tiempo")
231.     lines(fechasSO2, datososo2$Kohunlich,col='red')
232.
233.     #procesamiento de datos O3
234.     fechasO3<-my(paste(datososo3$Mes,datososo3$Año))
235.     plot(fechasO3, datososo3$Kohunlich,main = "Ozono acumulado
      mensual (O3)",ylab="Ozono (µg m^-3)", xlab="Tiempo")
236.     lines(fechasO3, datososo3$Kohunlich,col='red')
237.
238.
239.     #Estimacion de precipitacion con ARIMAS
240.
241.     #con frecuencias de 12
242.
243.     Serie_datosp<-ts(datososp$PRECIPITACION, start=c(1),
      frequency = 12)
244.     ggtsdisplay(Serie_datosp)
245.
246.     datos.sdifff<-diff(Serie_datosp,lag=12, differences = 2)
247.     ggtsdisplay(datos.sdifff)
248.

```

```

249.   datos.rdiffp<-diff(Serie_datosp, differences = 1)
250.   ggtsdisplay(datos.rdiffp)
251.
252.   datos.rdiff.sdiffp<-
      diff(diff(Serie_datosp,lag=12,differences = 1),differences =
        2)
253.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffp)
254.
255.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
256.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
257.   layout(Conf3x2)
258.   layout.show(6)
259.
260.   autoarimap<-auto.arima(Serie_datosp, d=0,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
261.   arimap<-forecast(autoarimap,h=185)
262.   plot(arimap)
263.
264.   autoarimap2<-auto.arima(Serie_datosp, d=1,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
265.   arimap2<-forecast(autoarimap2,h=185)
266.   plot(arimap2)
267.
268.   autoarimap3<-auto.arima(Serie_datosp, d=0,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
269.   arimap3<-forecast(autoarimap3,h=185)
270.   plot(arimap3)
271.
272.   autoarimap4<-auto.arima(Serie_datosp, d=1,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
273.   arimap4<-forecast(autoarimap4,h=185)
274.   plot(arimap4)
275.
276.   autoarimap5<-auto.arima(Serie_datosp, d=2,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
277.   arimap5<-forecast(autoarimap5,h=185)
278.   plot(arimap5)
279.
280.   autoarimap6<-auto.arima(Serie_datosp, d=1,D=2,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
281.   arimap6<-forecast(autoarimap6,h=185)
282.   plot(arimap6)
283.
284.   #con frecuencias de 24
285.
286.   Serie_datosp2<-ts(datososp$PRECIPITACION, start=c(1),
      frequency = 24)
287.   ggtsdisplay(Serie_datosp)
288.

```

```

289.     datos.sdifffp2<-diff(Serie_datosp2,lag=24,
        differences = 0)
290.     ggtsdisplay(datos.sdifffp2)
291.
292.     datos.rdifffp2<-diff(Serie_datosp2, differences = 1)
293.     ggtsdisplay(datos.rdifffp2)
294.
295.     datos.rdiff.sdifffp2<-
        diff(diff(Serie_datosp2,lag=24,differences = 0),differences =
            1)
296.     ggtsdisplay(datos.rdiff.sdifffp2)
297.
298.     #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
299.     Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
300.     layout(Conf3x2)
301.     layout.show(6)
302.
303.     autoarimap7<-auto.arima(Serie_datosp2, d=0,D=0,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
304.     arimap7<-forecast(autoarimap7,h=185)
305.     plot(arimap7)
306.
307.     autoarimap8<-auto.arima(Serie_datosp2, d=1,D=0,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
308.     arimap8<-forecast(autoarimap8,h=185)
309.     plot(arimap8)
310.
311.     autoarimap9<-auto.arima(Serie_datosp2, d=0,D=1,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
312.     arimap9<-forecast(autoarimap9,h=185)
313.     plot(arimap9)
314.     autoarimap9
315.     resumen_arimap<-autoarimap9$coef
316.     write.csv(x = resumen_arimap, file = "parametros arima
        precipitacion.csv", row.names = FALSE)
317.
318.
319.     autoarimap10<-auto.arima(Serie_datosp2, d=1,D=1,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
320.     arimap10<-forecast(autoarimap10,h=185)
321.     plot(arimap10)
322.
323.     autoarimap11<-auto.arima(Serie_datosp2, d=2,D=1,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
324.     arimap11<-forecast(autoarimap11,h=185)
325.     plot(arimap11)
326.
327.     autoarimap12<-auto.arima(Serie_datosp, d=1,D=2,
        stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)

```

```

328.   arimap12<-forecast(autoarimap12,h=185)
329.   plot(arimap12)
330.
331.
332.   #Estimacion de humedad con ARIMAS
333.
334.   #con frecuencias de 12
335.
336.   Serie_datosh<-ts(datososh$Kohunlich, start=c(1),
   frequency = 12)
337.   ggtsdisplay(Serie_datosh)
338.
339.   datos.sdifffh<-diff(Serie_datosh,lag=12, differences = 1)
340.   ggtsdisplay(datos.sdifffh)
341.
342.   datos.rdifffh<-diff(Serie_datosh, differences = 1)
343.   ggtsdisplay(datos.rdifffh)
344.
345.   datos.rdiff.sdifffh<-
   diff(diff(Serie_datosh,lag=12,differences = 1),differences =
   2)
346.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdifffh)
347.
348.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
349.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
350.   layout(Conf3x2)
351.   layout.show(6)
352.
353.   autoarimah<-auto.arima(Serie_datosh, d=0,D=0,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
354.   arimah<-forecast(autoarimah,h=185)
355.   plot(arimah)
356.
357.   autoarimah2<-auto.arima(Serie_datosh, d=1,D=0,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
358.   arimah2<-forecast(autoarimah2,h=185)
359.   plot(arimah2)
360.
361.   autoarimah3<-auto.arima(Serie_datosh, d=0,D=1,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
362.   arimah3<-forecast(autoarimah3,h=185)
363.   plot(arimah3)
364.
365.   autoarimah4<-auto.arima(Serie_datosh, d=1,D=1,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
366.   arimah4<-forecast(autoarimah4,h=185)
367.   plot(arimah4)
368.

```

```

369.   autoarimah5<-auto.arima(Serie_datosh, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
370.   arimah5<-forecast(autoarimah5,h=185)
371.   plot(arimah5)
372.
373.   autoarimah6<-auto.arima(Serie_datosh, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
374.   arimah6<-forecast(autoarimah6,h=185)
375.   plot(arimah6)
376.
377.   #con frecuencias de 24
378.
379.   Serie_datosh2<-ts(datososh$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 24)
380.   ggtsdisplay(Serie_datosh2)
381.
382.   datos.sdifffh2<-diff(Serie_datosh2,lag=24,
    differences = 1)
383.   ggtsdisplay(datos.sdifffh2)
384.
385.   datos.rdifffh2<-diff(Serie_datosh2, differences = 1)
386.   ggtsdisplay(datos.rdifffh2)
387.
388.   datos.rdiff.sdifffh2<-
    diff(diff(Serie_datosh2,lag=24,differences = 0),differences =
    1)
389.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdifffh2)
390.
391.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
392.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
393.   layout(Conf3x2)
394.   layout.show(6)
395.
396.   autoarimah7<-auto.arima(Serie_datosh2, d=0,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
397.   arimah7<-forecast(autoarimah7,h=185)
398.   plot(arimah7)
399.
400.   autoarimah8<-auto.arima(Serie_datosh2, d=1,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
401.   arimah8<-forecast(autoarimah8,h=185)
402.   plot(arimah8)
403.
404.   autoarimah9<-auto.arima(Serie_datosh2, d=0,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
405.   arimah9<-forecast(autoarimah9,h=185)
406.   plot(arimah9)
407.

```

```

408.   autoarimah10<-auto.arima(Serie_datosh2, d=1,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
409.   arimah10<-forecast(autoarimah10,h=185)
410.   plot(arimah10)
411.
412.   autoarimah11<-auto.arima(Serie_datosh2, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
413.   arimah11<-forecast(autoarimah11,h=185)
414.   plot(arimah11)
415.
416.   autoarimah12<-auto.arima(Serie_datosh2, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
417.   arimah12<-forecast(autoarimah12,h=185)
418.   plot(arimah12)
419.
420.
421.   #Estimacion de dióxido de azufre con ARIMAS
422.
423.   #con frecuencias de 12
424.
425.   Serie_datoss<-ts(datososo2$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 12)
426.   ggtsdisplay(Serie_datoss)
427.
428.   datos.sdiffs<-diff(Serie_datoss,lag=12, differences = 1)
429.   ggtsdisplay(datos.sdiffs)
430.
431.   datos.rdiffs<-diff(Serie_datoss, differences = 1)
432.   ggtsdisplay(datos.rdiffs)
433.
434.   datos.rdiff.sdiffs<-
    diff(diff(Serie_datoss,lag=12,differences = 1),differences =
    1)
435.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffs)
436.
437.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
438.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
439.   layout(Conf3x2)
440.   layout.show(6)
441.
442.   autoarimas<-auto.arima(Serie_datoss, d=0,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
443.   arimas<-forecast(autoarimas,h=185)
444.   plot(arimas)
445.
446.   autoarimas2<-auto.arima(Serie_datoss, d=1,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
447.   arimas2<-forecast(autoarimas2,h=185)
448.   plot(arimas2)

```

```

449.
450.   autoarimas3<-auto.arima(Serie_datoss, d=0,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
451.   arimas3<-forecast(autoarimas3,h=185)
452.   plot(arimas3)
453.
454.   autoarimas4<-auto.arima(Serie_datoss, d=1,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
455.   arimas4<-forecast(autoarimas4,h=185)
456.   plot(arimas4)
457.
458.   autoarimas5<-auto.arima(Serie_datoss, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
459.   arimas5<-forecast(autoarimas5,h=185)
460.   plot(arimas5)
461.
462.   autoarimas6<-auto.arima(Serie_datoss, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
463.   arimas6<-forecast(autoarimas6,h=185)
464.   plot(arimas6)
465.
466.   #con frecuencias de 24
467.
468.   Serie_datoss2<-ts(datososo2$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 24)
469.   ggtsdisplay(Serie_datoss2)
470.
471.   datos.sdiffs2<-diff(Serie_datoss2,lag=24,
    differences = 1)
472.   ggtsdisplay(datos.sdiffs2)
473.
474.   datos.rdiffs2<-diff(Serie_datoss2, differences = 1)
475.   ggtsdisplay(datos.rdiffs2)
476.
477.   datos.rdiff.sdiffs2<-
    diff(diff(Serie_datoss2,lag=24,differences = 0),differences =
    1)
478.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffs2)
479.
480.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
481.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
482.   layout(Conf3x2)
483.   layout.show(6)
484.
485.   autoarimas7<-auto.arima(Serie_datoss2, d=0,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
486.   arimas7<-forecast(autoarimas7,h=185)
487.   plot(arimas7)
488.

```

```

489.   autoarimas8<-auto.arima(Serie_datoss2, d=1,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
490.   arimas8<-forecast(autoarimas8,h=185)
491.   plot(arimas8)
492.
493.   autoarimas9<-auto.arima(Serie_datoss2, d=0,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
494.   arimas9<-forecast(autoarimas9,h=185)
495.   plot(arimas9)
496.
497.   autoarimas10<-auto.arima(Serie_datoss2, d=1,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
498.   arimas10<-forecast(autoarimas10,h=185)
499.   plot(arimas10)
500.
501.   autoarimas11<-auto.arima(Serie_datoss2, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
502.   arimas11<-forecast(autoarimas11,h=185)
503.   plot(arimas11)
504.
505.   autoarimas12<-auto.arima(Serie_datoss2, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
506.   arimas12<-forecast(autoarimas12,h=185)
507.   plot(arimas12)
508.
509.   #Estimacion de ozono con ARIMAS
510.
511.   #con frecuencias de 12
512.
513.   Serie_datoso<-ts(datos3$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 12)
514.   ggtsdisplay(Serie_datoso)
515.
516.   datos.sdiffo<-diff(Serie_datoso,lag=12, differences = 1)
517.   ggtsdisplay(datos.sdiffo)
518.
519.   datos.rdiffo<-diff(Serie_datoso, differences = 1)
520.   ggtsdisplay(datos.rdiffo)
521.
522.   datos.rdiff.sdiffo<-
    diff(diff(Serie_datoso,lag=12,differences = 1),differences =
    2)
523.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffo)
524.
525.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
526.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
527.   layout(Conf3x2)
528.   layout.show(6)
529.

```

```

530.   autoarimao<-auto.arima(Serie_datoso, d=0,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
531.   arimao<-forecast(autoarimao,h=185)
532.   plot(arimao)
533.
534.   autoarimao2<-auto.arima(Serie_datoso, d=1,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
535.   arimao2<-forecast(autoarimao2,h=185)
536.   plot(arimao2)
537.
538.   autoarimao3<-auto.arima(Serie_datoso, d=0,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
539.   arimao3<-forecast(autoarimao3,h=185)
540.   plot(arimao3)
541.
542.   autoarimao4<-auto.arima(Serie_datoso, d=1,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
543.   arimao4<-forecast(autoarimao4,h=185)
544.   plot(arimao4)
545.
546.   autoarimao5<-auto.arima(Serie_datoso, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
547.   arimao5<-forecast(autoarimao5,h=185)
548.   plot(arimao5)
549.
550.   autoarimao6<-auto.arima(Serie_datoso, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
551.   arimao6<-forecast(autoarimao6,h=185)
552.   plot(arimao6)
553.
554.   #con frecuencias de 24
555.
556.   Serie_datoso2<-ts(datoso3$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 24)
557.   ggtsdisplay(Serie_datoso2)
558.
559.   datos.sdiffo2<-diff(Serie_datoso2,lag=24,
    differences = 1)
560.   ggtsdisplay(datos.sdiffo2)
561.
562.   datos.rdiffo2<-diff(Serie_datoso2, differences = 1)
563.   ggtsdisplay(datos.rdiffo2)
564.
565.   datos.rdiff.sdiffo2<-
    diff(diff(Serie_datoso2,lag=24,differences = 0),differences =
    1)
566.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffo2)
567.
568.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA

```

```

569. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
570. layout(Conf3x2)
571. layout.show(6)
572.
573. autoarimao7<-auto.arima(Serie_datoso2, d=0,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
574. arimao7<-forecast(autoarimao7,h=185)
575. plot(arimao7)
576.
577. autoarimao8<-auto.arima(Serie_datoso2, d=1,D=0,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
578. arimao8<-forecast(autoarimao8,h=185)
579. plot(arimao8)
580.
581. autoarimao9<-auto.arima(Serie_datoso2, d=0,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
582. arimao9<-forecast(autoarimao9,h=185)
583. plot(arimao9)
584.
585. autoarimao10<-auto.arima(Serie_datoso2, d=1,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
586. arimao10<-forecast(autoarimao10,h=185)
587. plot(arimao10)
588.
589. autoarimao11<-auto.arima(Serie_datoso2, d=2,D=1,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
590. arimao11<-forecast(autoarimao11,h=185)
591. plot(arimao11)
592.
593. autoarimao12<-auto.arima(Serie_datoso2, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
594. arimao12<-forecast(autoarimao12,h=185)
595. plot(arimao12)
596.
597.
598. #Estimacion de acido nitrico con ARIMAS
599.
600. #con frecuencias de 12
601.
602. Serie_datosn<-ts(datosno2$Kohunlich, start=c(1),
    frequency = 12)
603. ggtsdisplay(Serie_datosn)
604.
605. datos.sdiffn<-diff(Serie_datoso,lag=12, differences = 1)
606. ggtsdisplay(datos.sdiffn)
607.
608. datos.rdiffn<-diff(Serie_datoso, differences = 1)
609. ggtsdisplay(datos.rdiffn)
610.

```

```

611.   datos.rdiff.sdiffrn<-
      diff(diff(Serie_datosn,lag=12,differences = 1),differences =
        1)
612.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffrn)
613.
614.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
615.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
616.   layout(Conf3x2)
617.   layout.show(6)
618.
619.   autoariman<-auto.arima(Serie_datosn, d=0,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
620.   ariman<-forecast(autoariman,h=185)
621.   plot(ariman)
622.
623.   autoariman2<-auto.arima(Serie_datosn, d=1,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
624.   ariman2<-forecast(autoariman2,h=185)
625.   plot(ariman2)
626.
627.   autoariman3<-auto.arima(Serie_datosn, d=0,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
628.   ariman3<-forecast(autoariman3,h=185)
629.   plot(ariman3)
630.
631.   autoariman4<-auto.arima(Serie_datosn, d=1,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
632.   ariman4<-forecast(autoariman4,h=185)
633.   plot(ariman4)
634.
635.   autoariman5<-auto.arima(Serie_datosn, d=2,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
636.   ariman5<-forecast(autoariman5,h=185)
637.   plot(ariman5)
638.
639.   autoariman6<-auto.arima(Serie_datosn, d=1,D=2,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
640.   ariman6<-forecast(autoariman6,h=185)
641.   plot(ariman6)
642.
643.   #con frecuencias de 24
644.
645.   Serie_datosn2<-ts(datosno2$Kohunlich, start=c(1),
      frequency = 24)
646.   ggtsdisplay(Serie_datosn2)
647.
648.   datos.sdiffrn2<-diff(Serie_datosn2,lag=24,
      differences = 1)
649.   ggtsdisplay(datos.sdiffrn2)

```

```

650.
651.   datos.rdiffn2<-diff(Serie_datosn2, differences = 1)
652.   ggtsdisplay(datos.rdiffn2)
653.
654.   datos.rdiff.sdiffn2<-
      diff(diff(Serie_datosn2,lag=24,differences = 1),differences =
        1)
655.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdiffn2)
656.
657.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
658.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
659.   layout(Conf3x2)
660.   layout.show(6)
661.
662.   autoariman7<-auto.arima(Serie_datosn2, d=0,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
663.   ariman7<-forecast(autoariman7,h=185)
664.   plot(ariman7)
665.
666.   autoariman8<-auto.arima(Serie_datosn2, d=1,D=0,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
667.   ariman8<-forecast(autoariman8,h=185)
668.   plot(ariman8)
669.
670.   autoariman9<-auto.arima(Serie_datosn2, d=0,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
671.   ariman9<-forecast(autoariman9,h=185)
672.   plot(ariman9)
673.
674.   autoariman10<-auto.arima(Serie_datosn2, d=1,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
675.   ariman10<-forecast(autoariman10,h=185)
676.   plot(ariman10)
677.
678.   autoariman11<-auto.arima(Serie_datosn2, d=2,D=1,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
679.   ariman11<-forecast(autoariman11,h=185)
680.   plot(ariman11)
681.
682.   autoariman12<-auto.arima(Serie_datosn2, d=1,D=2,
      stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
683.   ariman12<-forecast(autoariman12,h=185)
684.   plot(ariman12)
685.
686.
687.
688.   #Estimacion de temperatura con ARIMAS
689.
690.   #con frecuencias de 12

```

```

691.
692.   Serie_datost<-ts(datost$Kohunlich, start=c(1),
   frequency = 12)
693.   ggtsdisplay(Serie_datost)
694.
695.   datos.sdifft<-diff(Serie_datost,lag=12, differences = 1)
696.   ggtsdisplay(datos.sdifft)
697.
698.   datos.rdifft<-diff(Serie_datost, differences = 1)
699.   ggtsdisplay(datos.rdifft)
700.
701.   datos.rdiff.sdifft<-
   diff(diff(Serie_datost,lag=12,differences = 1),differences =
   1)
702.   ggtsdisplay(datos.rdiff.sdifft)
703.
704.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
705.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
706.   layout(Conf3x2)
707.   layout.show(6)
708.
709.   autoarimat<-auto.arima(Serie_datost, d=0,D=0,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
710.   arimat<-forecast(autoarimat,h=185)
711.   plot(arimat)
712.
713.   autoarimat2<-auto.arima(Serie_datost, d=1,D=0,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
714.   arimat2<-forecast(autoarimat2,h=185)
715.   plot(arimat2)
716.
717.   autoarimat3<-auto.arima(Serie_datost, d=0,D=1,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
718.   arimat3<-forecast(autoarimat3,h=185)
719.   plot(arimat3)
720.
721.   autoarimat4<-auto.arima(Serie_datost, d=1,D=1,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
722.   arimat4<-forecast(autoarimat4,h=185)
723.   plot(arimat4)
724.
725.   autoarimat5<-auto.arima(Serie_datost, d=2,D=1,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
726.   arimat5<-forecast(autoarimat5,h=185)
727.   plot(arimat5)
728.
729.   autoarimat6<-auto.arima(Serie_datost, d=1,D=2,
   stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
730.   arimat6<-forecast(autoarimat6,h=185)

```

```

731. plot(arimat6)
732.
733. #con frecuencias de 24
734.
735. Serie_datost2<-ts(datost$Kohunlich, start=c(1),
  frequency = 24)
736. ggtsdisplay(Serie_datost2)
737.
738. datos.sdifft2<-diff(Serie_datost2,lag=24,
  differences = 1)
739. ggtsdisplay(datos.sdifft2)
740.
741. datos.rdifft2<-diff(Serie_datost2, differences = 1)
742. ggtsdisplay(datos.rdifft2)
743.
744. datos.rdiff.sdifft2<-
  diff(diff(Serie_datost2,lag=24,differences = 1),differences =
  1)
745. ggtsdisplay(datos.rdiff.sdifft2)
746.
747. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
748. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
749. layout(Conf3x2)
750. layout.show(6)
751.
752. autoarimat7<-auto.arima(Serie_datost2, d=0,D=0,
  stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
753. arimat7<-forecast(autoarimat7,h=185)
754. plot(arimat7)
755.
756. autoarimat8<-auto.arima(Serie_datost2, d=1,D=0,
  stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
757. arimat8<-forecast(autoarimat8,h=185)
758. plot(arimat8)
759.
760. autoarimat9<-auto.arima(Serie_datost2, d=0,D=1,
  stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
761. arimat9<-forecast(autoarimat9,h=185)
762. plot(arimat9)
763.
764. autoarimat10<-auto.arima(Serie_datost2, d=1,D=1,
  stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
765. arimat10<-forecast(autoarimat10,h=185)
766. plot(arimat10)
767.
768. autoarimat11<-auto.arima(Serie_datost2, d=2,D=1,
  stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
769. arimat11<-forecast(autoarimat11,h=185)
770. plot(arimat11)

```

```

771.
772.   autoarimat12<-auto.arima(Serie_datost2, d=1,D=2,
    stepwise = FALSE, approximation = FALSE, trace = TRUE)
773.   arimat12<-forecast(autoarimat12,h=185)
774.   plot(arimat12)
775.
776.
777.   #Estimaciones
778.   #Estimacion de precipitacion con ARIMAS
779.   #con frecuencias de 12
780.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
781.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
782.   layout(Conf3x2)
783.   layout.show(6)
784.
785.   arimap<-forecast(autoarimap,h=185)
786.   plot(arimap)
787.
788.   arimap2<-forecast(autoarimap2,h=185)
789.   plot(arimap2)
790.
791.   arimap3<-forecast(autoarimap3,h=185)
792.   plot(arimap3)
793.
794.   arimap4<-forecast(autoarimap4,h=185)
795.   plot(arimap4)
796.
797.   arimap5<-forecast(autoarimap5,h=185)
798.   plot(arimap5)
799.
800.   arimap6<-forecast(autoarimap6,h=185)
801.   plot(arimap6)
802.
803.   #con frecuencias de 24
804.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
805.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
806.   layout(Conf3x2)
807.   layout.show(6)
808.
809.   arimap7<-forecast(autoarimap7,h=185)
810.   plot(arimap7)
811.
812.   arimap8<-forecast(autoarimap8,h=185)
813.   plot(arimap8)
814.
815.   arimap9<-forecast(autoarimap9,h=185)
816.   plot(arimap9)
817.
818.   arimap10<-forecast(autoarimap10,h=185)

```

```

819.     plot(arimap10)
820.
821.     arimap11<-forecast(autoarimap11,h=185)
822.     plot(arimap11)
823.
824.     arimap12<-forecast(autoarimap12,h=185)
825.     plot(arimap12)
826.
827.
828.     #Estimacion de humedad con ARIMAS
829.     #con frecuencias de 12
830.     #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
831.     Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
832.     layout(Conf3x2)
833.     layout.show(6)
834.
835.     arimah<-forecast(autoarimah,h=185)
836.     plot(arimah)
837.
838.     arimah2<-forecast(autoarimah2,h=185)
839.     plot(arimah2)
840.
841.     arimah3<-forecast(autoarimah3,h=185)
842.     plot(arimah3)
843.
844.     arimah4<-forecast(autoarimah4,h=185)
845.     plot(arimah4)
846.
847.     arimah5<-forecast(autoarimah5,h=185)
848.     plot(arimah5)
849.
850.     arimah6<-forecast(autoarimah6,h=185)
851.     plot(arimah6)
852.
853.     #con frecuencias de 24
854.     #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
855.     Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
856.     layout(Conf3x2)
857.     layout.show(6)
858.
859.     arimah7<-forecast(autoarimah7,h=185)
860.     plot(arimah7)
861.
862.     arimah8<-forecast(autoarimah8,h=185)
863.     plot(arimah8)
864.
865.     arimah9<-forecast(autoarimah9,h=185)
866.     plot(arimah9)
867.

```

```

868.   arimah10<-forecast(autoarimah10,h=185)
869.   plot(arimah10)
870.
871.   arimah11<-forecast(autoarimah11,h=185)
872.   plot(arimah11)
873.
874.   arimah12<-forecast(autoarimah12,h=185)
875.   plot(arimah12)
876.
877.
878.   #Estimacion de dióxido de azufre con ARIMAS
879.
880.   #con frecuencias de 12
881.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
882.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
883.   layout(Conf3x2)
884.   layout.show(6)
885.
886.   arimas<-forecast(autoarimas,h=185)
887.   plot(arimas)
888.
889.   arimas2<-forecast(autoarimas2,h=185)
890.   plot(arimas2)
891.
892.   arimas3<-forecast(autoarimas3,h=185)
893.   plot(arimas3)
894.
895.   arimas4<-forecast(autoarimas4,h=185)
896.   plot(arimas4)
897.
898.   arimas5<-forecast(autoarimas5,h=185)
899.   plot(arimas5)
900.
901.   arimas6<-forecast(autoarimas6,h=185)
902.   plot(arimas6)
903.
904.   #con frecuencias de 24
905.   #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
906.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
907.   layout(Conf3x2)
908.   layout.show(6)
909.
910.   arimas7<-forecast(autoarimas7,h=185)
911.   plot(arimas7)
912.
913.   arimas8<-forecast(autoarimas8,h=185)
914.   plot(arimas8)
915.
916.   arimas9<-forecast(autoarimas9,h=185)

```

```

917. plot(arimas9)
918.
919. arimas10<-forecast(autoarimas10,h=185)
920. plot(arimas10)
921.
922. arimas11<-forecast(autoarimas11,h=185)
923. plot(arimas11)
924.
925. arimas12<-forecast(autoarimas12,h=185)
926. plot(arimas12)
927.
928. #Estimacion de ozono con ARIMAS
929.
930. #con frecuencias de 12
931. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
932. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
933. layout(Conf3x2)
934. layout.show(6)
935.
936. arimao<-forecast(autoarimao,h=185)
937. plot(arimas)
938.
939. arimao2<-forecast(autoarimao2,h=185)
940. plot(arimao2)
941.
942. arimao3<-forecast(autoarimao3,h=185)
943. plot(arimao3)
944.
945. arimao4<-forecast(autoarimao4,h=185)
946. plot(arimao4)
947.
948. arimao5<-forecast(autoarimao5,h=185)
949. plot(arimao5)
950.
951. arimao6<-forecast(autoarimao6,h=185)
952. plot(arimao6)
953.
954. #con frecuencias de 24
955. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
956. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
957. layout(Conf3x2)
958. layout.show(6)
959.
960. arimao7<-forecast(autoarimao7,h=185)
961. plot(arimao7)
962.
963. arimao8<-forecast(autoarimao8,h=185)
964. plot(arimao8)
965.

```

```

966. arimao9<-forecast(autoarimao9,h=185)
967. plot(arimao9)
968.
969. arimao10<-forecast(autoarimao10,h=185)
970. plot(arimao10)
971.
972. arimao11<-forecast(autoarimao11,h=185)
973. plot(arimao11)
974.
975. arimao12<-forecast(autoarimao12,h=185)
976. plot(arimao12)
977.
978.
979. #Estimacion de acido nitrico con ARIMAS
980.
981. #con frecuencias de 12
982. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
983. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
984. layout(Conf3x2)
985. layout.show(6)
986.
987. ariman<-forecast(autoariman,h=185)
988. plot(ariman)
989.
990. ariman2<-forecast(autoariman2,h=185)
991. plot(ariman2)
992.
993. ariman3<-forecast(autoariman3,h=185)
994. plot(ariman3)
995.
996. ariman4<-forecast(autoariman4,h=185)
997. plot(ariman4)
998.
999. ariman5<-forecast(autoariman5,h=185)
1000. plot(ariman5)
1001.
1002.
1003. ariman6<-forecast(autoariman6,h=185)
1004. plot(ariman6)
1005.
1006. #con frecuencias de 24
1007. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
1008. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1009. layout(Conf3x2)
1010. layout.show(6)
1011.
1012. ariman7<-forecast(autoariman7,h=185)
1013. plot(ariman7)
1014.

```

```

1015. ariman8<-forecast(autoariman8,h=185)
1016. plot(ariman8)
1017.
1018. ariman9<-forecast(autoariman9,h=185)
1019. plot(ariman9)
1020.
1021. ariman10<-forecast(autoariman10,h=185)
1022. plot(ariman10)
1023.
1024. ariman11<-forecast(autoariman11,h=185)
1025. plot(ariman11)
1026.
1027. ariman12<-forecast(autoariman12,h=185)
1028. plot(ariman12)
1029.
1030.
1031. #Estimacion de temperatura con ARIMAS
1032.
1033. #con frecuencias de 12
1034. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
1035. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1036. layout(Conf3x2)
1037. layout.show(6)
1038.
1039. arimat<-forecast(autoarimat,h=185)
1040. plot(arimat)
1041.
1042. arimat2<-forecast(autoarimat2,h=185)
1043. plot(arimat2)
1044.
1045. arimat3<-forecast(autoarimat3,h=185)
1046. plot(arimat3)
1047.
1048. arimat4<-forecast(autoarimat4,h=185)
1049. plot(arimat4)
1050.
1051. arimat5<-forecast(autoarimat5,h=185)
1052. plot(arimat5)
1053.
1054. arimat6<-forecast(autoarimat6,h=185)
1055. plot(arimat6)
1056.
1057. #con frecuencias de 24
1058. #GENERACION DE MATRIS GRAFICA
1059. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1060. layout(Conf3x2)
1061. layout.show(6)
1062.
1063. arimat7<-forecast(autoarimat7,h=185)

```

```

1064. plot(arimat7)
1065.
1066. arimat8<-forecast(autoarimat8,h=185)
1067. plot(arimat8)
1068.
1069. arimat9<-forecast(autoarimat9,h=185)
1070. plot(arimat9)
1071.
1072.
1073. arimat10<-forecast(autoarimat10,h=185)
1074. plot(arimat10)
1075.
1076.
1077. arimat11<-forecast(autoarimat11,h=185)
1078. plot(arimat11)
1079.
1080. arimat12<-forecast(autoarimat12,h=185)
1081. plot(arimat12)
1082.
1083.
1084. #mapas listas
1085. #precipitación
1086. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1087. layout(Conf3x2)
1088. layout.show(6)
1089.
1090. plot(arimap)
1091. plot(arimap2)
1092. plot(arimap3)
1093. plot(arimap4)
1094. plot(arimap5)
1095. plot(arimap6)
1096.
1097. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1098. layout(Conf3x2)
1099. layout.show(6)
1100.
1101. plot(arimap7)
1102. plot(arimap8)
1103. plot(arimap9)
1104. plot(arimap10)
1105. plot(arimap11)
1106. plot(arimap12)
1107.
1108. write.csv(x = arimap10, file = "precipitacion
ARIMA(0,1,2)(2,1,0).csv", row.names = FALSE)
1109.
1110. #Humedad
1111. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)

```

```

1112. layout(Conf3x2)
1113. layout.show(6)
1114.
1115. plot(arimah)
1116. plot(arimah2)
1117. plot(arimah3)
1118. plot(arimah4)
1119. plot(arimah5)
1120. plot(arimah6)
1121.
1122. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1123. layout(Conf3x2)
1124. layout.show(6)
1125.
1126. plot(arimah7)
1127. plot(arimah8)
1128. plot(arimah9)
1129. plot(arimah10)
1130. plot(arimah11)
1131. plot(arimah12)
1132.
1133. write.csv(x = arimah9, file = "humedad
      ARIMA(0,0,1)(2,1,0).csv", row.names = FALSE)
1134.
1135. #temperatura
1136. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1137. layout(Conf3x2)
1138. layout.show(6)
1139.
1140. plot(arimat)
1141. plot(arimat2)
1142. plot(arimat3)
1143. plot(arimat4)
1144. plot(arimat5)
1145. plot(arimat6)
1146.
1147. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1148. layout(Conf3x2)
1149. layout.show(6)
1150.
1151. plot(arimat7)
1152. plot(arimat8)
1153. plot(arimat9)
1154. plot(arimat10)
1155. plot(arimat11)
1156. plot(arimat12)
1157.
1158. write.csv(x = arimat10, file = "temperatura
      ARIMA(1,1,1)(0,1,1).csv", row.names = FALSE)

```

```

1159.
1160.   #so2
1161.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1162.   layout(Conf3x2)
1163.   layout.show(6)
1164.
1165.   plot(arimas)
1166.   plot(arimas2)
1167.   plot(arimas3)
1168.   plot(arimas4)
1169.   plot(arimas5)
1170.   plot(arimas6)
1171.
1172.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1173.   layout(Conf3x2)
1174.   layout.show(6)
1175.
1176.   plot(arimas7)
1177.   plot(arimas8)
1178.   plot(arimas9)
1179.   plot(arimas10)
1180.   plot(arimas11)
1181.   plot(arimas12)
1182.
1183.   write.csv(x = arimas10, file = "so2
      ARIMA(0,1,4)(0,1,1).csv", row.names = FALSE)
1184.
1185.
1186.   #no2
1187.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1188.   layout(Conf3x2)
1189.   layout.show(6)
1190.
1191.   plot(ariman)
1192.   plot(ariman2)
1193.   plot(ariman3)
1194.   plot(ariman4)
1195.   plot(ariman5)
1196.   plot(ariman6)
1197.
1198.   Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1199.   layout(Conf3x2)
1200.   layout.show(6)
1201.
1202.   plot(ariman7)
1203.   plot(ariman8)
1204.   plot(ariman9)
1205.   plot(ariman10)
1206.   plot(ariman11)

```

```

1207. plot(ariman12)
1208.
1209. write.csv(x = ariman12, file = "no2
      ARIMA(0,1,1)(2,2,1).csv", row.names = FALSE)
1210.
1211. #o3
1212. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1213. layout(Conf3x2)
1214. layout.show(6)
1215.
1216. plot(arimao)
1217. plot(arimao2)
1218. plot(arimao3)
1219. plot(arimao4)
1220. plot(arimao5)
1221. plot(arimao6)
1222.
1223. Conf3x2 = matrix(c(1:6), nrow=2, byrow=TRUE)
1224. layout(Conf3x2)
1225. layout.show(6)
1226.
1227. plot(arimao7)
1228. plot(arimao8)
1229. plot(arimao9)
1230. plot(arimao10)
1231. plot(arimao11)
1232. plot(arimao12)
1233.
1234.
1235. write.csv(x = arimao9, file = "o3
      ARIMA(1,0,0)(2,1,0).csv", row.names = FALSE)

```