



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del comportamiento de Ozono
en la CDMX considerando el modelo de
Cadenas de Márkov**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Adrián Arias Rocha

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Antonio García Villanueva



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Jurado designado:

Presidente: Ing. Marcos Trejo Hernández

Vocal: Dr. Luis Antonio García Villanueva

Secretario: M.H.D. Norma Legorreta Linares

1er. Suplente: M.A.I. Claudia Elisa Sánchez Navarro

2do. Suplente: M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Agradecimientos

Con todo mi amor, a mis padres Edith y Adrián, gracias por concederme, por darme todo el cariño del mundo y por enseñarme a valorar todo lo que tengo en la vida. Agradezco sus regaños, consejos, la motivación y apoyo para estudiar esta carrera, es algo que jamás me cansare de agradecerles. Sin ustedes este momento nunca hubiera llegado, todos esos sacrificios y la confianza que han depositado en mí. han logrado que éste sea un triunfo de los tres.

A mi tutor Dr. Luis Antonio García Villanueva siendo un símbolo de inspiración, por la pasión con la que transmite conocimientos, así como de su incalculable disposición e interés de ayudarme a crecer tanto en el plano profesional como en lo personal y por ser mi guía en la presente tesis.

A amigo más cercano, Mauricio David Albitar Cervantes por estar conmigo en todo momento y situaciones únicas. Sin él, mi vida sería muy diferente, ojalá todo el mundo tuviera un amigo así.

A mis amigos: Analy, Diego, Felipe y Salvador, por el apoyo, cariño y confianza que me han brindado, es un gran honor para mí contar con su amistad. A pesar de la distancia pienso mucho en ustedes y siempre los llevo en mi corazón.

A mis sinodales por leer mi investigación, por sus observaciones y por su confianza.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater. Por brindarme una profesión. Entrar aquí, es lo mejor que me ha pasado en la vida, me dio infinitos momentos de felicidad y al mismo tiempo me enriqueció de conocimientos.

A Dios, por darme la vida que tengo y de no abandonarme, dándome la fortaleza de seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.



ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO I - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos	4
1.3. Limitaciones y alcances	5
1.4. Zona de estudio	5
CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes generales	7
2.2. Contaminación atmosférica	7
2.3. Topografía de la Ciudad de México	8
2.4. Clima	9
2.5. Ozono estratosférico	12
2.6. Ozono como contaminante	13
2.7. Daños a la salud por ozono	15
2.8. Mortalidad en la Ciudad de México a causa de la contaminación del aire	17
2.9. Monitoreo	17
2.10. Registro de emisiones	19
2.11. Índice Metropolitano de Calidad del Aire "IMECA"	19
2.12. Cadenas de Márkov	23
2.12.1. Clasificación de procesos estocásticos	24
2.12.2. Matriz de transición	26
2.12.3. Clases de estados	28
2.12.4. Clasificación de cadenas de Márkov	29
2.12.5. Aplicaciones de Cadenas de Márkov en temas de investigación	30
CAPÍTULO III - NORMATIVIDAD ATMOSFÉRICA, NACIONAL E INTERNACIONAL	33
3.1. Problemática	34
3.2. Marco de Normatividad Ambiental en México	35
3.3. Programas y planes de acción a nivel nacional	35
3.4. Implementación de Contingencia ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México "ZMVM"	37
3.5. Ley General de la Calidad de Aire y Protección a la Atmósfera	39
3.6. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	40



3.7. Normatividad Internacional	43
3.8. Ley General de Cambio Climático	44
3.9. Protocolo de Montreal	45
3.10. Protocolo de Kioto	45
3.11. Acuerdo de París.....	46
3.12. Consideraciones actuales	46
CAPITULO IV - ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA	48
4.1. Justificación de la Zona de estudio	49
4.2. Aplicación del inventario de IMECA al modelo de Cadenas de Márkov.....	50
4.3. Obtención de matriz.....	55
4.4. Obtención de matriz de transición.....	58
4.8. Diagrama de transición	58
4.9. Estado estable	60
CAPITULO V - RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
ANEXOS	70
GLOSARIO Y ACRONIMOS	125
REFERENCIAS CONSULTADAS.	127



Índice de figuras

Figura 2.1. Relieve Montañoso de la ZMVM. Recuperado de: (Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, 2017)	11
Figura 2.2. Capas de conforman la atmosfera. Fuente: Elaboración propia a partir de: (Bermejo et. al, 2009)	13
Figura 2.3. Precursores de ozono y formación de ozono troposférico. Fuente: Elaboración propia a partir de: (Bermejo et. al, 2009)	14
Figura 2.4. Daños del ozono a la salud. Elaboración propia a partir de: (Nuvolone, 2018) y (Kampa and Castanas, 2008)	16
Figura 2.5. Esquema de operación de un analizador de ozono. Recuperado de: (Martínez D, 2014)	18
Figura 2.6. Parámetros de monitoreo Fuente: (Datos recuperados de IMECA)	20
Figura 2.7. Estaciones de monitoreo de la ZMVM. Fuente: recuperada de: (Portal oficial de IMECA)	22
Figura 2.8. Proceso estocástico Fuente: elaboración propia a partir de: (Wayne, 2008)	24
Figura 2.9. Matriz de transición. Elaboración propia a partir de: (Bini, 2005)	27
Figura 2.10. Diagrama de transición de estados. Fuente: elaboración propia a partir de: (Wayne, 2008)	27
Figura 3.1 Objetivo del Derecho ambiental. Fuente: elaboración propia a partir de: (Romanello et. al, 2021)	34
Figura 4.1. Mapa centro histórico. Fuente: Recuperado de: (PUEC-UNAM, 2016)	49
Figura 4.2. Acceso al inventario de emisiones de ozono. Fuente: (Acceso a inventario por estación IMECA)	51
Figura 4.3. Comportamiento de ozono en el año 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado	52
Figura 4.4. Comportamiento de ozono en el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.....	52
Figura 4.5. Comportamiento de ozono en el año 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado	53
Figura 4.6. Comportamiento de ozono en el año 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado	53
Figura 4.7. Comportamiento de ozono en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado	54
Figura 4.8. Conceptualización de matrices Fuente: elaboración propia a partir de: (Hillier et. Al, 2010)	55



Figura 4.9. Diagrama de transición para el mes de mayo. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de transición P_E 59

Figura 5.1. Comportamiento de ozono para la Ciudad de México en el año 2023.....64

Índice de tablas.

Tabla 2.1. Lista total de estaciones de monitoreo. Fuente: Datos recuperados de IMECA.....21

Tabla 2.2. Aplicaciones de Cadenas de Markov a la contaminación atmosférica en el mundo.....32

Tabla 3.1. Programas para reducir la contaminación del aire a nivel federal. Fuente: Elaboración propia a partir de: (PROAIRE).....35

Tabla 3.2. Normas que regulan las emisiones de cada contaminante. Fuente: Elaboración propia a partir de: (Normas Oficiales Mexicanas).....37

Tabla 3.3. Índice de concentración (Ozono) fases de contingencia Fuente: Elaboración propia a partir de: PCAA.....38

Tabla 3.4. Leyes más relevantes para el tema de contaminación del aire.....43

Tabla 4.1. Características de la estación seleccionada. Fuente: (Directorio de estaciones de IMECA).....51

Tabla 4.2. Nomenclatura para cada mes.....55

Tabla 4.3. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de mayo.....61

Tabla 5.1. Resultados por mes.63

Tabla 5.2. Pronósticos por mes.....64



RESUMEN

El objetivo de la ingeniería, sin importar de que rama sea, es mejorar las condiciones de vida del ser humano, después de haber cursado diversas materias aplicadas a la ingeniería civil resulta común hacer investigaciones relacionadas con Hidráulica, Geotecnia, Planeación y Transporte, Construcción, Estructuras, etc. En la presente tesis se dio un enfoque a Ingeniería Ambiental, que es tan necesario, pero desconocido para diversos sectores al tratarse de una ciencia relativamente nueva y que si se le diera la seriedad que amerita, las condiciones de vida serian mucho mejores que las actuales, el impacto ambiental no es algo exclusivo de México, afecta a diversos países tanto desarrollados como en vías de desarrollo.

En los últimos años se ha visto un impacto de contaminación ambiental significativo, en la presente investigación se abordará al ozono como contaminante principal, debido a que es el que predomina más en la ciudad y de los más dañinos para el ser humano y la naturaleza.

La investigación se divide en cuatro capítulos, en cada uno se abordará un tema diferente con un fin común con el tema central de la tesis.

- En el primer capítulo se detalla el planteamiento del problema y cómo surge la necesidad de hacer una investigación que proporcione una aplicación de Cadenas de Márkov para predecir el comportamiento de ozono en días futuros.

- El segundo capítulo consta del Marco Teórico; se redactó una breve introducción de cada tema que se aborda y que servirá para comprender conceptos básicos, así como de salud e ingeniería, recordando que la contaminación del aire es un problema multidisciplinario en el que intervienen todas las ciencias.



- El tercer capítulo se recapitulará y debatirán las normas atmosféricas más relevantes e importantes de México y en el mundo, esto con la finalidad de apreciar cómo se está combatiendo actualmente este gran problema, con esto se busca encontrar los principales problemas y de esta manera proponer soluciones que sean viables.

- En el cuarto capítulo se centrará en aplicar y analizar el modelo de Cadenas de Márkov a la zona de estudio “Zona centro de la CDMX”, por lo que toda la memoria de cálculo se verá reflejada en este capítulo, de igual modo se justificará el porqué de la selección de esta zona, describiéndola para tener un mejor panorama, estos cálculos se llevaron a cabo mediante el inventario de registros IMECA diarios, en el periodo de enero de 2018 a enero de 2023, con base en los registros máximos por día tomando solo en consideración al ozono (O_3), desglosados por mes, graficándolos y después simplificándolos para poder definir las matrices de transición, con lo que se pueden obtener pronósticos de los niveles de ozono (O_3) en la Zona centro de la Ciudad de México.

- Finalmente, en el quinto y último capítulo se pondrá a discusión los resultados obtenidos del cuarto capítulo, estos valores que se obtuvieron a partir del inventario de IMECA fueron analizados y por ende se obtuvieron diferentes pronósticos con base a cada mes que se hizo el análisis, es posible hacer propuestas para tratar de mitigar el daño a causa del ozono, por lo que se logrará integrar una parte de cada capítulo para proponer soluciones reales que estén al alcance de una manera factible que conste de un punto de vista ingenieril pero también humanista.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Vivir en la Ciudad de México es muy agradable por todas las accesibilidades que hay en cuestión de bienes, servicios, programas, etc. Solo que al mirar hacia el cielo es fácil percatarse que hay una espesa nata gris y que pocas veces se puede apreciar un cielo claro y limpio. Esto tiene una justificación, cada año las emisiones de contaminantes atmosféricos han aumentado evidentemente, dichas condiciones son perjudiciales en temas de salud, ámbito económico e incluso a nivel psicológico, afectando a todos los residentes de la CDMX y ZMVM (SEMARNAT, 2014; SIMAT, 2019).

Ante esta problemática se han implementado diversos planes de acción de emergencia o temporales que no han tenido un acertamiento óptimo para solucionar dicha problemática ambiental, pues el crecimiento acelerado de la población es insostenible. Con esto se busca incentivar un interés hacia la aplicación de instrumentos científicos en cuestión de cuidado ambiental, para con eso justificar y obligar un cumplimiento estricto de la legislación de cuidado ambiental (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Debido a esta problemática se vio la necesidad de usar un modelo probabilístico fuera de lo habitual, por lo que se optó por Cadenas de Márkov, a diferencia de otros, este se distingue por ser un proceso estocástico en el que se puede analizar la transición de estados para tener un pronóstico óptimo. El modelo se puede ajustar perfectamente al inventario del Índice Metropolitano de Contingencia Ambiental (IMECA) (Hillier & Lieberman, 2010).



1.1. Objetivo general

Realizar un análisis del comportamiento del Ozono (O_3) en la Ciudad de México considerando el modelo de Cadenas de Márkov, que permita la identificación de los días en que la concentración del ozono (O_3) represente un riesgo a la población; para la implementación de normas, mitigando la contaminación del aire y mejorando la calidad de vida de la población.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica, sobre la situación actual de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México, consultando fuentes relevantes referentes a contaminación atmosférica, para la identificación de las principales causas de contaminación y consecuencias para la salud, analizando las normativas nacionales e internacionales para la propuesta de posibles soluciones.
- Investigar las características de ozono (O_3), considerando literatura base para justificar el por qué se considera un agente peligroso.
- Analizar los registros máximos de ozono (O_3) por día, tomando como fuente el inventario de enero de 2018 a enero de 2023 para tener un mejor pronóstico a días futuros.
- Justificar la problemática ambiental con una propuesta de aplicación, definiendo las variables que permitan el planteamiento de Cadenas de Márkov, considerando los datos de IMECA para el caso de estudio de la zona centro de la Ciudad de México.
- A partir de los resultados obtenidos y después de hacer un análisis exhaustivo, se procurará reducir los niveles de ozono, proponiendo medidas congruentes para controlar la problemática ambiental que se vive en la Ciudad de México.



- Exponer recomendaciones pertinentes para la población y las mejoras hacia las normas ya establecidas, para la disminución de los niveles de contaminación, mismas que tendrán un impacto universal.

1.3. Limitaciones y alcances

En el presente estudio se considerará al Ozono como el contaminante ambiental principal, por ser el que más abunda en la Ciudad de México y uno de los más nocivos para la salud humana.

1.4. Zona de estudio

Para el presente trabajo se considerarán las condiciones de calidad de aire de la estación atmosférica de la zona centro en la Ciudad de México.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes generales

La problemática ambiental no es un problema exclusivo de la Ciudad de México de estas aleñados, es un asunto regional y para mitigar este daño es necesario de la participación de todos los niveles de gobierno, abarcando desde municipios, delegaciones, estatal y federal.

En días presentes la regulación de la calidad del aire no se está rigiendo como se tenía programado, pues la mayor parte de las emisiones no están reguladas, se necesita de una pronta solución porque es un hecho que el nivel de contaminación atmosférica seguirá aumentando debido al incremento acelerado de población, mancha urbana y flota vehicular, por consiguiente, las contingencias ambientales serán más frecuentes. Se han implementado soluciones a corto plazo para disminuir la contaminación del aire, pero han fracasado, porque solo es cuestión de tiempo para notar como pierden su eficacia, esto se debe a que tienen como principal característica ser muy económicas y no se basan en una proyección a futuro, solo mitigan un porcentaje muy pequeño del problema, la mejor manera de combatirlo será con soluciones a largo plazo (Wolfram, 2016).

2.2. Contaminación atmosférica

En la actualidad, el problema de la contaminación atmosférica se ha ido incrementando de manera significativa en ciudades altamente pobladas, principalmente en la Ciudad de México y Área Metropolitana, esto quiere decir que todas las medidas implementadas por el gobierno hasta ahora ya no son suficientes para controlar y disminuir este problema, lo cual resulta en una emergencia ambiental (Peralta et. al, 2021).

La contaminación atmosférica sucede cuando las sustancias toxicas emitidas por la combustión de materias primas no pueden ser diluidas rápidamente por el ecosistema, lo que



origina una aglomeración de estas y por consiguiente la contaminación. Cuando los niveles de contaminación en el aire son altos, representan un riesgo para la salud, el gobierno de la Ciudad de México tiene la obligación de salvaguardar a los ciudadanos cuando los niveles de contaminación atmosférica sobrepasan los estándares permitidos (Manahan, 2006).

Es un hecho que el ser humano no tiene control sobre el clima y que los daños ocasionados hasta ahora es algo que no se puede cambiar, pero sí mitigar. Lamentablemente los niveles de contaminación de aire presentan un aumento en temporadas de calor, clima seco y vientos ligeros, a esto sumarle el sistema de alta presión que no permite la correcta dispersión de los contaminantes, sino también por la drástica deforestación de áreas verdes en la ciudad, es importante conocer estas características cuando se integre una incidencia en los factores que si se pueden modificar en soluciones a largo plazo (Greenpeace, 2020).

Es importante conocer las características geo climáticas de la Ciudad de México, pues cada entidad presenta condiciones únicas y diferentes, lo que genera una influencia considerable en el comportamiento del aire, esto influye directamente con el nivel de acumulación y dispersión de la contaminación. Toda esta información se puede obtener a partir de inventarios climatológicos.

2.3. Topografía de la Ciudad de México

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática, (INEGI, 2022), la Ciudad de México se encuentra en la región central del territorio nacional, para ser más precisos en la meseta de Anáhuac, que geológicamente está conformada por lagos y volcanes. Sus fronteras geográficas están asentadas hacia el norte por la Sierra de Guadalupe y el cerro

del Tepeyac, en el centro oriente la sierra de Santa Catarina, que se constituye por una serie de volcanes extintos y el cerro de la Estrella, al sur se encuentra el volcán Ajusco que es la elevación más alta de la Ciudad de México.

La elevación de la Ciudad de México es de 2,239 metros sobre el nivel del mar, esto depende de cada zona, esto con base en que se presentan pequeñas lomas y cerros en algunas alcaldías. Desafortunadamente, la altitud no beneficia a la ciudad; a esta altura los niveles de oxígeno son 24% menor que a nivel del mar, lo que tiene como consecuencia que los procesos de combustión sean desfavorables ocasionando una mayor cantidad de emisiones de contaminación a la atmósfera (INEGI, 2022).

2.4. Clima

La ciudad de México se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo, con una temperatura media de 16.6°C, llegando a tener temperaturas máximas que sobre pasan los 29°C en primavera y verano, en invierno las temperaturas pueden superar los -0°C (INECC & UNAM, 2015).

En el periodo de mayo a noviembre se presenta un clima húmedo, aunque la temporada de lluvia se concentran mayormente entre junio y agosto, las lluvias son con más frecuencia en zonas de mayor altitud, por lo que en zonas altas como el Ajusco son más húmedas a comparación de las zonas bajas como el lago de Texcoco que es más seca y presenta condiciones similares en zonas como Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero (CONAGUA, 2018).

Es relevante mencionar que debido al cambio climático se han presentado modificaciones en la temperatura a nivel mundial, ocasionando un desorden en la precipitación y anomalías en las temperaturas. Al ser una planicie y con un alto historial de deforestación se ha propiciado una



intensa recepción de radiación solar, a esto hay que añadirle la altitud a la que se encuentra agrava los niveles de rayos UV hasta un 20% más, lo que acelera una reacción fotoquímica ocasionando la formación de ozono, es por esto que los mayores índices de ozono son en verano, debido a que los días son más prolongados a comparación de otras estaciones del año (SEMARNAT, 2014).

Estas condiciones dan origen a un fenómeno llamado inversión térmica, tiene una relación estrecha con la altitud respecto al nivel del mar, pues es una capa de la atmosfera en el que la temperatura del aire aumenta con la altura, debido a que el aire menos caliente y denso no puede elevarse con lo que afecta la trayectoria del viento y por ende ayuda a la sobre acumulación de contaminantes atmosféricos; esto tienen una recurrencia en invierno (SEDEMA, 2005).

Una desventaja que presenta la Ciudad de México es su ubicación (Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, 2017). Pues, se encuentra rodeada por ejes montañosos en todos los sentidos, de norte a sur y de este a oeste, como se aprecia en la figura 2.1. Con base a que México se localiza entre el Océano Pacífico y el Golfo de México se presenta un fenómeno anticiclónico, lo que genera una estabilidad atmosférica, esto disminuye la formación de nubes por la ausencia de vientos con fuerza, teniendo como resultado que los niveles de radiación solar sean considerablemente altos. Estas dos condiciones mencionadas repercuten en la dirección y velocidad de los vientos que les ocasiona una circulación compleja en la planicie del valle de México, provocando una pésima dispersión de contaminantes.

En temporadas de verano resulta beneficioso, pues las lluvias favorecen a los movimientos del aire, lo que disminuye las inversiones térmicas antes mencionadas (SEMARNAT, 2014).

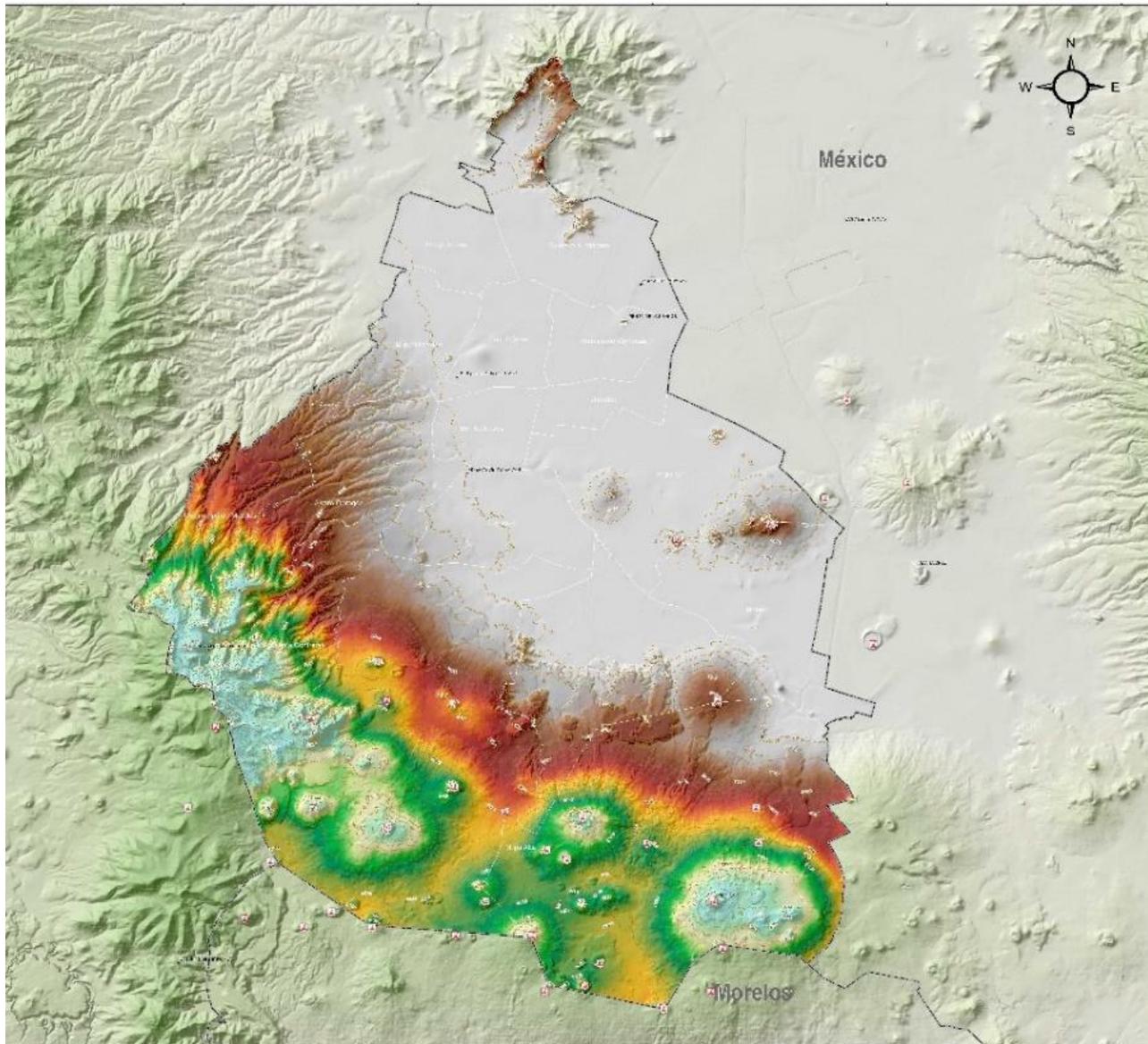


Figura 2.1. Relieve Montañoso de la ZMVM. Recuperado de: (Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, 2017).



2.5. Ozono estratosférico

Químicamente se comprende como una molécula constituida por tres átomos de oxígeno, obteniendo como resultado la terminología O_3 , su estado es gaseoso y es un factor importante para la vida en la tierra, el ozono se localiza principalmente en la estratósfera y tropósfera, en humanos es fácil detectarlo por medio de la respiración pues es un gas irritante con un fuerte olor metálico acompañado de picazón (Stedman D, 1987).

El ozono se crea todos los días, es a partir de un ciclo de óxidos de nitrógeno, radiación solar y compuestos orgánicos volátiles. Al llegar la noche todo esto se destruye casi en su totalidad. En temporada de invierno los niveles de radiación ultravioleta decrecen, lo que ocasiona que los niveles de ozono disminuyan en la tropósfera, otra temporada beneficiosa para el ambiente es la temporada de lluvias, porque las condiciones meteorológicas ayudan a limpiar la atmosfera, no solo del ozono, sino también de otros contaminantes. Cuando se presenta este (clima favorable) los contaminantes tienen una perduración de ocho horas aproximadamente, en clima desfavorable la perduración de contaminantes es mayor (Bermejo et. al, 2009).

La mayor concentración de (ozono bueno) tiene lugar en la estratósfera debido a un proceso natural en el que el oxígeno actúa ante la radiación solar ocasionando que se rompan los átomos de moléculas de oxígeno y es debido a esto el mayor índice de concentración de ozono en la estratósfera, aquí desempeña una función de suma importancia, pues filtra los rayos ultravioleta (UV). Éstos tienen como característica la radiación eritemática y ésta es nociva para el ser humano, al igual que muchas especies de flora y fauna, en la figura 2.2 se detallan las capas que conforman a la atmósfera (Bermejo et. al, 2009).

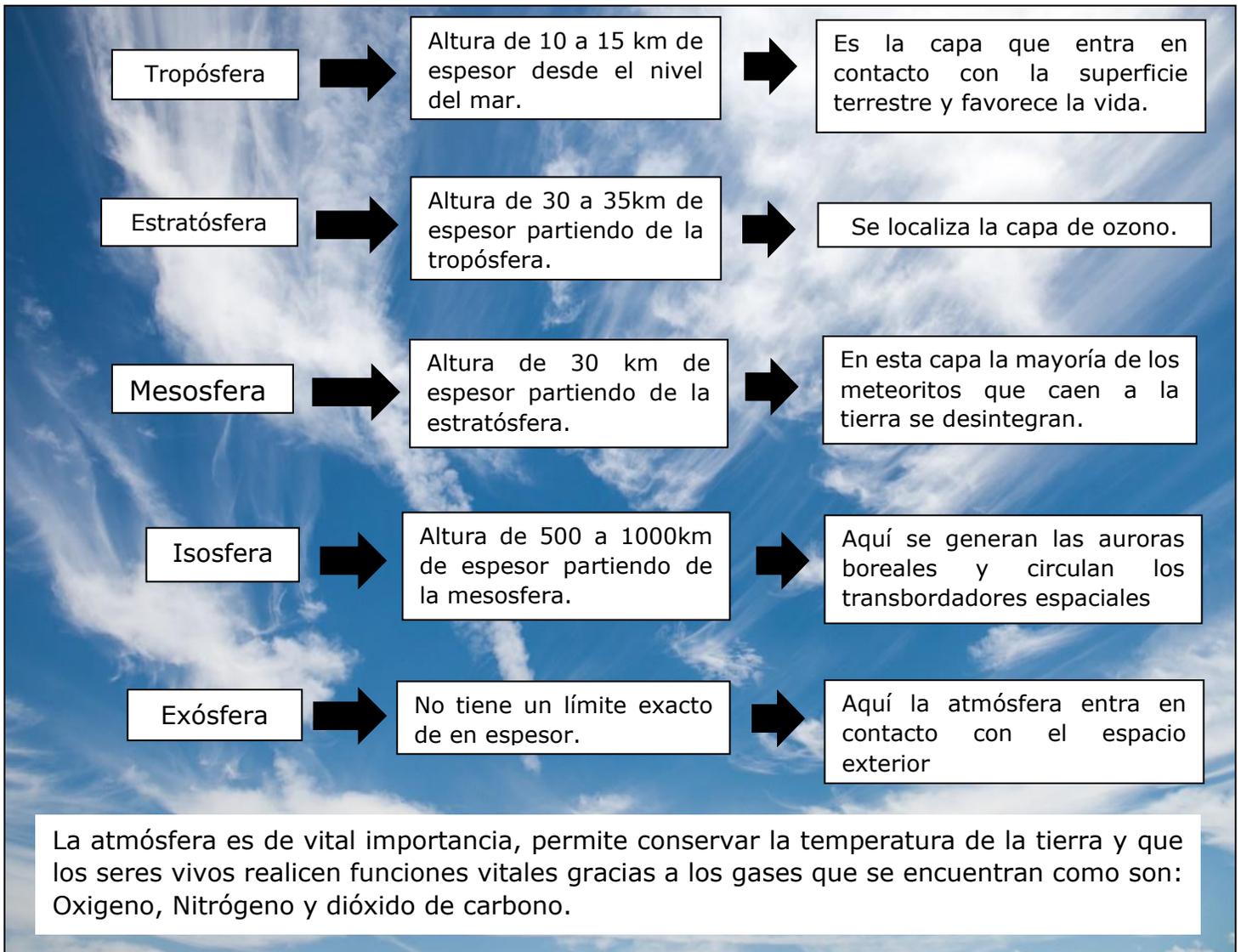


Figura 2.2. Capas de conforman la atmosfera. Fuente: elaboración propia a partir de: (Bermejo et. al, 2009).

2.6. Ozono como contaminante

Como lo menciona (Stedman D, 1987), el ozono que se concentra en la tropósfera, “lugar donde entra en contacto la atmósfera con la corteza terrestre”, no es saludable, este tiene su origen debido a la integración de otros contaminantes (precursores compuestos), que con la presencia de la luz solar provocan una reacción fotoquímica. Respecto a estas condiciones se

considera al ozono como un contaminante secundario, porque no se origina exclusivamente como resultado de un proceso en particular, como se detalla en la figura 2.3.

Aunque es parte de un ciclo natural que exista un bajo nivel de densidad de ozono a nivel superficial por ser un proceso fotoquímico (resultado de emisiones de seres vivos), otro fenómeno natural que produce ozono es la iteración con altos niveles de campos electromagnéticos (tormentas eléctricas), incluso intrusiones estratosféricas que se originan bajo condiciones de paso de frentes (Lei et. al,2008).

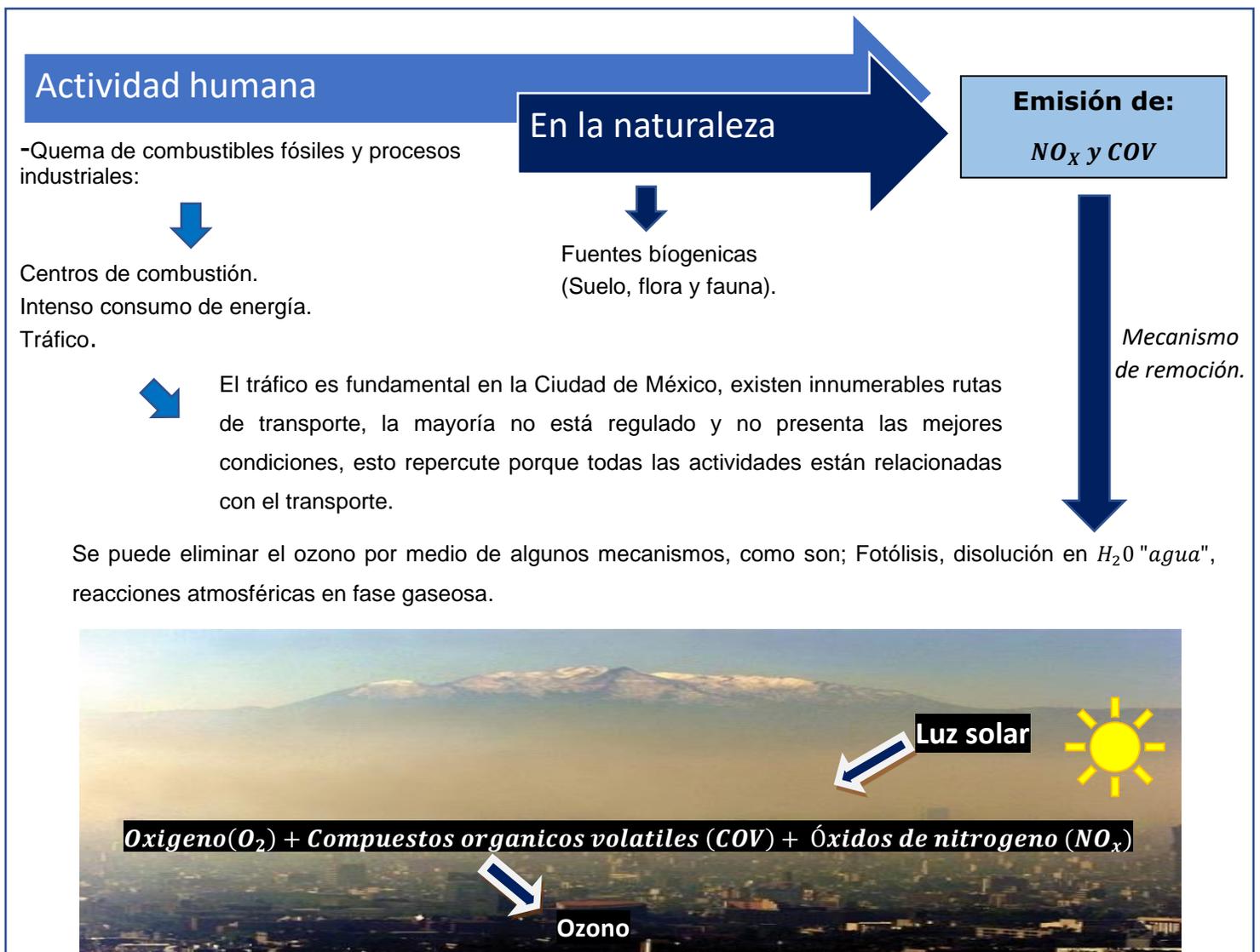


Figura 2.3. Precusores de ozono y formación de ozono troposférico. Fuente: elaboración propia a partir de: (Bermejo et. al, 2009).



Así como cualquier contaminante, los niveles de ozono no se presentan siempre de manera constante debido a que sus índices de concentración varían con base en la época del año e incluso en el transcurso del día, teniendo un auge en los niveles durante las últimas horas de la mañana y cuando el sol está en su mayor esplendor, los niveles decrecen a medida que va oscureciendo. Algunos estudios realizados en Holanda, Reino Unido y Francia demostraron un incremento de mortalidad cuando se presentó una ola de calor, debido a que esta es precursora a altas concentraciones de ozono y de otros contaminantes atmosféricos, su precursor fue la ola de calor (Stedman John, 2004).

2.7. Daños a la salud por ozono

Aunque los niveles de ozono troposférico sean bajos representan un peligro para la salud del ser humano y medio ambiente. Esto se debe a que el ozono es un oxidante muy fuerte que irrita las vías respiratorias. Las personas más vulnerables son aquellas que padecen asma, adultos mayores, personas que realizan actividades al aire libre e incluso aquellas con características genéticas desfavorables, personas con malos hábitos alimenticios por la ingesta reducida de nutrientes principalmente vitaminas C y E (Nuvolone et. al, 2018).

Los niños son los más vulnerables a daños por el ozono, esto con base a que todos sus órganos continúan en crecimiento, principalmente los pulmones y es común que estén activos al aire libre cuando los niveles de ozono son elevados, es alarmante debido a que los niños son más propensos que los adultos a padecer asma y enfermedades cardiovasculares. Desafortunadamente los recién nacidos también presentan un alto riesgo, pues al estar expuestos a ozono se incrementa un 20% la probabilidad de muerte (Gent et. al, 2003).

Los daños a causa de ozono son bastos, pues al notar daño en órganos debería considerarse altamente peligroso, solo que sus efectos son relativamente más lentos a comparación de otros gases dañinos, pues las anomalías son a largo plazo, como se puede apreciar en la figura 2.4.

Según el nivel y tiempo de exposición a aire contaminado por ozono puede ocasionar.

- Provocar tos, flema y picazón de garganta.
- Causar dolor al inhalar profundamente, por consiguiente, dificulta respirar profunda y vigorosamente.
- Aumenta la frecuencia de los ataques de asma.
- Inflama y daña las vías respiratorias.
- Ocasiona que los pulmones sean más propensos a infecciones.
- Agrava enfermedades pulmonares como enfisema, bronquitis y asma.
- Las personas sanas no quedan exentas de estos problemas, pues algunos de estos efectos se han manifestado en ellas. La exposición al ozono a largo plazo está directamente relacionada con el agravamiento de asma, convirtiéndolo en una de las principales causas de asma.
- El ozono debilita las respuestas inmunes, locales y sistemáticas, si la exposición es prolongada puede ocasionar fibrosis local.
- Los estudios en lugares con concentraciones elevadas de ozono también reflejan asociaciones de ozono por causas respiratorias con muertes e incluso cáncer de pulmón.

Figura 2.4. Daños del ozono a la salud. Elaboración propia a partir de: (Nuvolone, 2018; Kampa and Castanas, 2008).

2.8. Mortalidad en la Ciudad de México a causa de contaminación del aire

Si todas las normas de calidad del aire establecidas en la Ciudad de México se cumplieran, se evitarían miles de muertes al año. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estimó más de dos mil defunciones a causa de la mala calidad del aire en el año 2010. Lamentablemente en el año 2022 las muertes por contaminación del aire en la CDMX ascendieron a un rango de ocho mil a catorce mil muertes (Health Effects Institute, 2019).

Las concentraciones promedio de ozono en la CDMX es de 57.3 ppb, el valor promedio de la norma mexicana es de 70 ppb, aunque los niveles se consideran aceptables para el caso del ozono, sigue siendo aire nocivo para la salud, sin embargo, al conocer estos datos dan como resultado que se pueden prevenir innumerables muertes y reducir el índice de enfermedades cardiovasculares. Con base a la advertencia que ha emitido la OMS, pues advierte que para el año 2030 alrededor de 23.6 millones de personas fallecerán a nivel mundial a causa de enfermedades cardiovasculares, lo que será la principal causa de muerte en el planeta (SIMAT, 2019).

2.9. Monitoreo

Este instrumento se caracteriza por analizar el comportamiento de un evento y conocer su comportamiento a través del tiempo desde su inicio hasta los datos más recientes, con base en datos capturados de una integración de diferentes metodologías que procesan mediciones de forma continua y ordenada. Es fundamental para combatir la contaminación atmosférica, porque se logra apreciar cómo han ido evolucionando los niveles de concentraciones en un lugar que presente condiciones específicas. Gracias al monitoreo se sabe si las medidas implementadas han tenido éxito o no (SEDEMA, 2018).

Para hacer un correcto monitoreo de los contaminantes se utilizan equipos que están certificados por la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante, lo que genera resultados evaluados y aprobados con los mejores estándares por una autoridad certificada. El mecanismo de cada instrumento será en un contaminante en específico y la medición será determinada por una propiedad física o química en particular del compuesto a evaluar (OMS-CEPIS, 2009).

Para este caso el objeto de estudio es el ozono (O_3), su método de operación para detectar el nivel de moléculas en el aire es la “Fotometría UV”, es un método equivalente que se basa en la absorción de luz ultravioleta, con ayuda de resonancia electrónica interna en un rango de longitud de onda de 254 [nm], utiliza una lámpara de mercurio con cátodo frío, lo que genera iluminación dentro de la celda que se integra con gas depurado, esto lo determina a partir de la diferencia de intensidad que tiene un comportamiento proporcional a la concentración de ozono en el aire, todo fundamentado con base en la Ley de Beer-Lambert (CENMA, 2013).

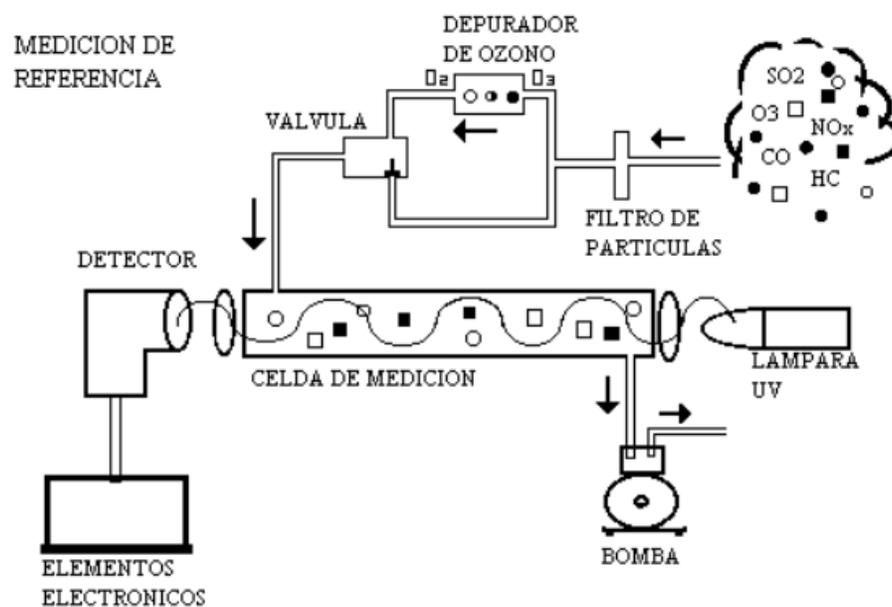


Figura 2.5. Esquema de operación de un analizador de ozono. Recuperado de: (Martínez D, 2014).

2.10. Registro de emisiones

Con los instrumentos de medición designados se registran los datos de contaminación diarios, lo que da origen a un inventario de alta confiabilidad ya que está establecido para un rango territorial, hora, tipo de contaminante, fuentes de emisión e incluso una escala en un tiempo establecido. Con ciertos datos establecidos se puede tener una mejor perspectiva del comportamiento de los niveles de la contaminación del aire, lo que ayuda a implementar medidas para el control de emisiones, con esto se sabrá si están tomando un efecto positivo o negativo en días futuros (Borge et. al, 2014).

Este gran logro de tener un registro de datos surgió en el año 1979 debido a la necesidad de combatir la contaminación, el convenio sobre Contaminación Transfronteriza a Gran Distancia (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution), Inventario de CORINAIR y Evaluación de los Contaminantes Atmosféricos en Europa (EMEP), estas dos últimas se integraron lo que ayudó a la creación de Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII), dando un gran paso en el monitoreo ambiental pues se consiguió una evaluación y análisis detallado de las emisiones de Europa y Norteamérica fueron los primeros en implementarlo, después lo implementó Asia, América Latina y África (Borge et. al, 2014).

2.11. Índice Metropolitano de Calidad del Aire “IMECA”

Es de suma importancia conceptualizar al IMECA en el presente capítulo, pues es de aquí de donde se conseguirán los datos que se usarán más adelante en el análisis de cadenas de Markov. IMECA es herramienta analítica que fue desarrollada en el año 1982 para proporcionar los niveles de contaminación diarios, de manera sencilla y rápida a la población, de tal manera indica las medidas más oportunas de precaución que se han de tomar ante una contingencia. Para comprender su identificación cada rango se representa mediante un color, por lo que el

índice se divide en cinco categorías y señalan el nivel de riesgo para la salud, como se puede apreciar en la figura 2.4 (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Sus mediciones pueden registrar la presencia de los cinco principales contaminantes: SO_2 "Dióxido de azufre", CO "Monóxido de carbono", NO_2 "Dióxido de nitrógeno", O_3 "Ozono", PM_{10} "Partículas suspendidas", la finalidad de este indicador es prevenir riesgos de salud a corto y largo plazo con base en los niveles de contaminación registrados.

Puntos.	Calidad.	Riesgo.	O_3 ppm
0-50	BUENA	No representa ningún riesgo para la salud.	<0.11
51-100	REGULAR	Riesgo moderado para la salud.	0.11
101-150	MALA	Posibles efectos para personas con problemas cardiovasculares o cardiacos.	0.123
151-200	MUY MALA	Efectos adversos a la salud de la población en general y se agravan los síntomas en personas con problemas respiratorios.	0.35
201-500	EXTREMADAMENTE MALA	Efectos graves a la salud de la población en general, se pueden presentar complicaciones en personas con problemas respiratorios.	0.60

Figura 2.6. Parámetros de monitoreo Fuente: (Datos recuperados de IMECA).

Actualmente IMECA cuenta con una distribución de 44 estaciones de monitoreo, que trabajan de manera uniforme y continua las 24 horas del día, los 365 días del año, se encuentran distribuidas en puntos clave de toda la Zona Metropolitana del Valle de México, lo que permite su correcta medición y evaluación de gases contaminantes y partículas suspendidas, véase en la tabla 2.1 y figura 2.6.

Clave de estación	Nombre	Alcaldía o municipio	Entidad
ACO	Acolman	Acolman	Estado de México
AJU	Ajusco	Tlalpan	CDMX
AJM	Ajusco Medio	Tlalpan	CDMX
ATI	Atizapán	Atizapán de Zaragoza	Estado de México
BJU	Benito Juárez	Benito Juárez	CDMX
CAM	Camarones	Azcapotzalco	CDMX
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera	Coyoacán	CDMX
TEC	Cerro del Tepeyac	Gustavo A. Madero	CDMX
CHO	Chalco	Chalco	Estado de México
COR	CORENA	Xochimilco	CDMX
CUA	Cuajimalpa	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
CUT	Cuautitlán	Cuautitlán Izcalli	Estado de México
DIC	Diconsa	Tlalpan	CDMX
EAJ	Eco guardas Ajusco	Tlalpan	CDMX
EDL	Exconvento Desierto de los Leones	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
FAC	FES Acatlán	Naucalpan de Juárez	Estado de México
FAR	FES Aragón	Nezahualcóyotl	Estado de México
GAM	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	CDMX
HGM	Hospital General de México	Cuauhtémoc	CDMX
INN	Investigaciones Nucleares	Ocoyoacac	Estado de México
IZT	Iztacalco	Iztacalco	CDMX
LPR	La Presa	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental	Gustavo A. Madero	CDMX
IBM	Legaria	Miguel Hidalgo	CDMX
LOM	Lomas	Miguel Hidalgo	CDMX
LLA	Los Laureles	Ecatepec de Morelos	Estado de México
MER	Merced	Venustiano Carranza	CDMX
MGH	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	CDMX
MPA	Milpa Alta	Milpa Alta	CDMX
MON	Montecillo	Texcoco	Estado de México
MCM	Museo de la Ciudad de México	Cuauhtémoc	CDMX
NEZ	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	Estado de México
PED	Pedregal	Álvaro Obregón	CDMX
SAG	San Agustín	Ecatepec de Morelos	Estado de México
SNT	San Nicolás Totolapan	La Magdalena Contreras	CDMX
SFE	Santa Fe	Cuajimalpa de Morelos	CDMX
SAC	Santiago Acahualtepec	Iztapalapa	CDMX
TAH	Tláhuac	Xochimilco	CDMX
TLA	Tlalnepantla	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
TLI	Tultitlán	Tultitlán	Estado de México
UIZ	UAM Iztapalapa	Iztapalapa	CDMX
UAX	UAM Xochimilco	Coyoacán	CDMX
VIF	Villa de las Flores	Coacalco de Berriozábal	Estado de México
XAL	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	Estado de México

Tabla. 2.1. Lista total de estaciones de monitoreo. Fuente: Datos recuperados de IMECA.

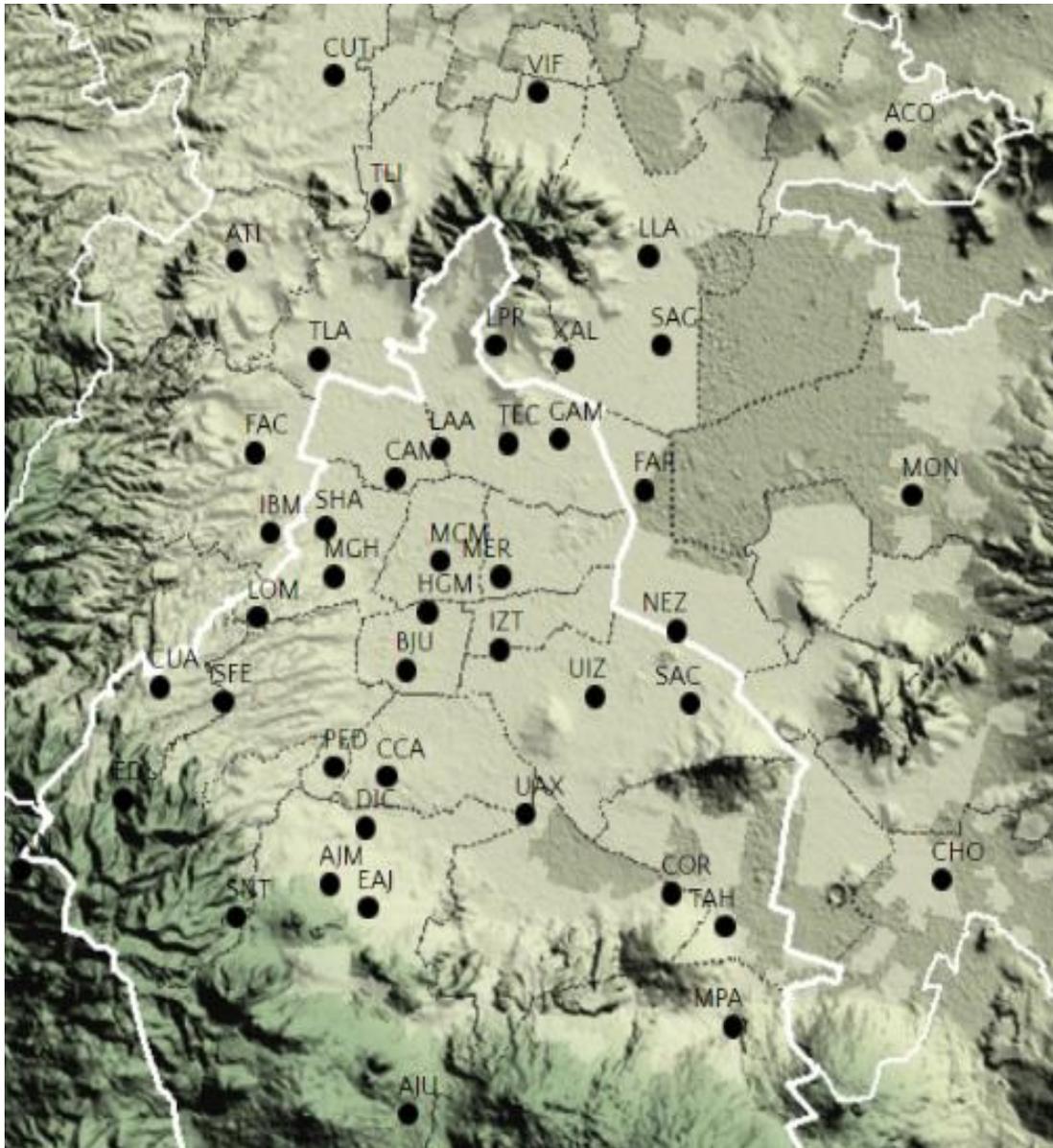


Figura 2.7. Estaciones de monitoreo de la ZMVM. Fuente: recuperada de: (Portal oficial de IMECA).

En la figura antes mencionada se puede apreciar la dispersión de estaciones de monitoreo, es importante recordar que la Zona Metropolitana del Valle de México es muy extensa territorialmente, con esto se avala que los valores de cada estación diferirán una de otra y que no es motivo de preocupación que los valores obtenidos sean diferentes, pues son valores independientes de otra estación, ya sea cercana o lejana.

2.12. Cadenas de Márkov

Las cadenas de Márkov fueron introducidas en 1906 por el matemático ruso Andréi Andreyevich Márkov (1856-1922) y fueron nombrados así en su honor, en probabilidad existe gran número de métodos que son viables para usarse en pronósticos de todo tipo, sin embargo, en el presente estudio se aplicara el modelo antes mencionado por ser uno de los más viables e interesantes.

Las cadenas de Márkov pueden ser de gran ayuda para responder preguntas como:

- ¿En cuánto tiempo sucederá un evento próximo?
- ¿Qué probabilidad existe de que un evento suceda?
- ¿Cuánto tiempo durara un evento u suceso?
- ¿Cuál es la probabilidad de tener éxito o fracaso?

Existen diversas aplicaciones, tienen un auge en la medicina, negocios, química, biología, física, ingeniería, etc. Resulta de gran utilidad para el estudio de cualquier sistema, por la involucración de matriz de transición, con lo que es posible predecir de que un sistema se encuentre específicamente en un momento definido (Hillier & Lieberman, 2010).

Como lo describe (Wayne L, 2008), este modelo tiene la peculiaridad de basarse de la historia del sistema, partiendo desde un pasado establecido, hasta el instante presente en que se cierra, lo que lo convierte en un proceso estocástico. Tal proceso tiene una ventaja, la cual consta de un conjunto de variables aleatorias que representan la evolución de un conjunto de valores aleatorios conforme transcurre el tiempo. Esto significa que los resultados futuros dependen de

manera proporcional de los resultados anteriores del cambio de un estado a otro, con base en que el proceso de decisión evoluciona con el tiempo. Véase en la figura 2.8.

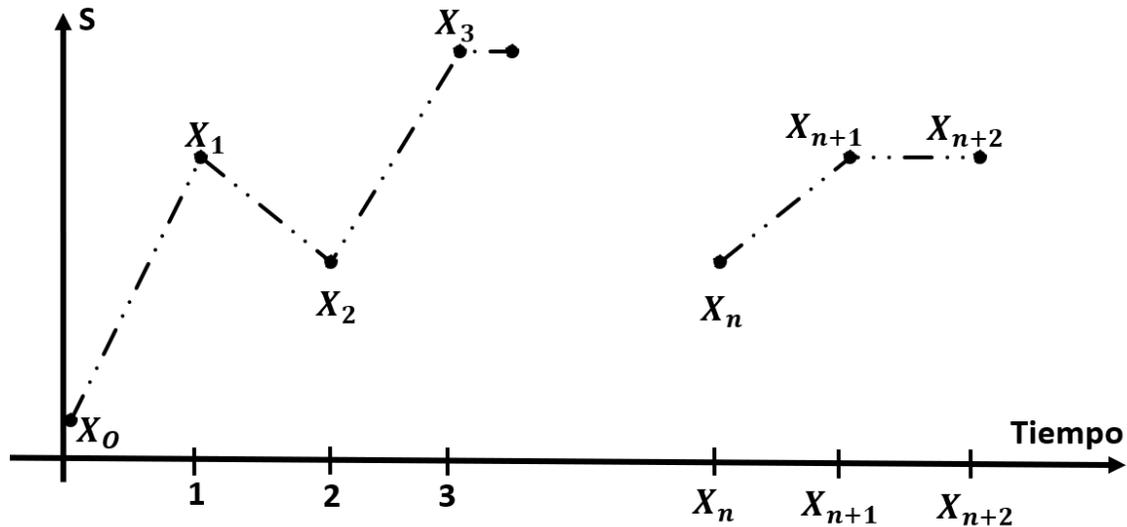


Figura 2.8. Proceso estocástico Fuente: elaboración propia a partir de: (Wayne, 2008).

2.12.1. Clasificación de procesos estocásticos

De acuerdo con (Wayne, 2008), los procesos estocásticos pueden dividirse de las siguientes maneras:

-Procesos estocásticos de tiempo discreto

Es un proceso en el que la variable temporal toma solo valores discretos, pudiendo cambiar en una serie de momentos determinados (como ejemplo, cada relevo de trabajador en turno).

-Procesos estocásticos de tiempo continuo

Proceso de estado y tiempo continuos, el valor de la variable puede cambiar en cualquier instante de tiempo (por ejemplo, la velocidad de un cohete).

-Variable Discreta

Esta variable está condicionada a poder solo cambiar valores en un rango o estados discretos (ejemplo, el rango de carga de una grúa).

-Variable Continua

Esta variable puede tomar cualquier valor de acuerdo con un rango establecido (ejemplo, la temperatura).

El planteamiento del proceso estocástico estará sujeta al comportamiento de una variable X a lo largo del tiempo “horizonte” t .

$\chi \rightarrow$ Espacio de estados.

$P \rightarrow$ Matriz de transición.

De acuerdo con (Hillier & Lieberman, 2010), una cadena de Márkov es un proceso que se mueve entre los elementos de un conjunto χ , como se muestra a continuación: cuando $x \in \chi$, la siguiente posición se elige con base a una distribución de probabilidad fija $P(x, \cdot)$, que depende únicamente de x . Más precisamente una secuencia de variables aleatorias (X_0, X_1, \dots, X_n) , es una Cadena de Márkov con espacio de estado χ y matriz de transición P , si para todo $x, y \in \chi$, todo $t \geq 1$, y todos los eventos $H_{t-1} = \cap_{s=0}^{t-1} \{X_s = x_s\}$ satisfaciendo $P(H_{t-1} \cap \{X_t = x\}) > 0$, \therefore tenemos:

$$P\{X_{t+1} = y | H_{t-1} \cap \{X_t = x\}\} = P\{X_{t+1} = y | X_t = x\} = P(x, y) \dots (i)$$

La ecuación (i), es la propiedad de Márkov, esto tiene una probabilidad condicional de pasar del estado x al estado y es la misma, sin importar la secuencia de estados precedentes al estado actual x . $\rightarrow (x_0, x_1, \dots, x_{t-1})$. Esto sucede porque $|\chi| \times |\chi|$ la matriz P basta para describir las transiciones.

La x^n fila de P es la distribución $P(x, \cdot)$. \therefore , P es estocástico, es decir, sus entradas son todas no negativas.

$$\sum_{y \in \mathcal{X}} P(x, y) = 1 \quad \text{para todo } x \in \mathcal{X}$$

2.12.2. Matriz de transición

Es la probabilidad condicional de que un sistema coincida en el estado j justo después de n pasos (tiempo), debido a que empezó en el estado i en tiempo t cualquiera. Dado que $p_{ij}^{(n)}$ es una probabilidad condicional no deben ser negativas, con base a que el proceso debe hacer una transición a otro estado cualquiera se debe cumplir las siguientes propiedades.

$$p_{ij}^{(n)} \geq 0, \quad \text{Para toda } i \text{ y } j; n = 0, 1, 2, \dots$$

y

$$\sum_{j=0}^M p_{ij}^{(n)} = 1, \quad \text{Para toda } i; n = 0, 1, 2, \dots$$

Cómo se puede apreciar en la figura 2.7. Suponiendo que las probabilidades son constantes y cambian a través del tiempo, las probabilidades de transición se representan de mejor manera en forma matricial, recordando que es un experimento aleatorio que inicia en un tiempo cero (t_0), por lo que un sistema puede acertar en cualquier estado, sea: a_{0j} ($j = 0, 1, 2, \dots, k$) la probabilidad de encontrar el estado E_j en t_0 , Es una matriz de $n \times n$ y tiene la propiedad de que la sumatoria de cada columna o fila debe ser uno (Bini, 2005).

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \dots & \lambda_{1k} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \dots & \lambda_{2k} \\ \vdots & & & \dots & \\ \lambda_{k1} & \lambda_{k2} & \lambda_{k3} & \dots & \lambda_{kk} \end{bmatrix} \begin{matrix} \Sigma = 1 \\ \Sigma = 1 \\ \Sigma = 1 \\ \Sigma = 1 \end{matrix}$$

Figura 2.9. Matriz de transición. Fuente: elaboración propia a partir de: (Bini, 2005).

Los datos registrados en la matriz de transición también se pueden reflejar mediante un diagrama de transición de estados, como se puede apreciar en la figura 2.10. Es relevante aclarar que el diagrama debe de contener las mismas dimensiones de la matriz de origen, nótese que los estados presentan flechas con sentido y dirección e incluso flechas que regresan al estado de origen, en todas las flechas se proporcionara la probabilidad de que ocurra tal transición en particular para cada estado (Wayne, 2008).

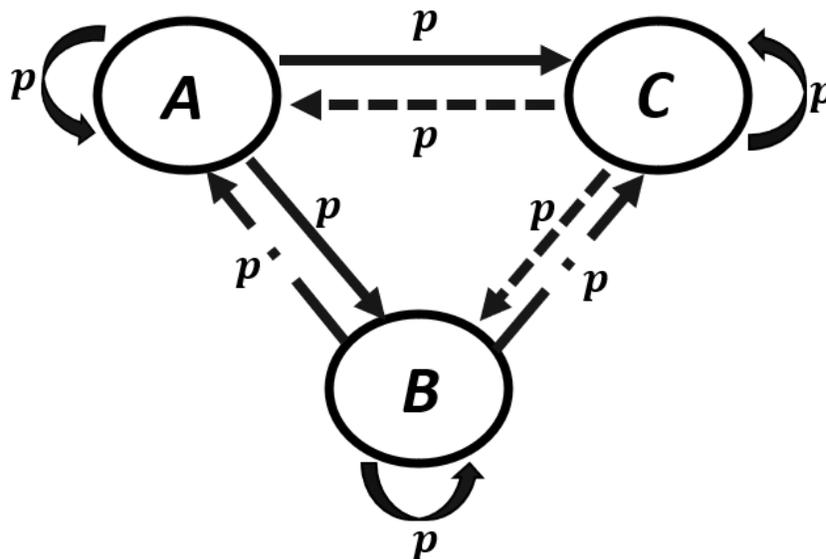


Figura 2.10. Diagrama de transición de estados. Fuente: elaboración propia a partir de: (Wayne, 2008).

Vector de probabilidades

El vector de probabilidades \bar{v}_n determina la probabilidad para el estado de la cadena en el segundo instante de tiempo en n pasos, por lo que el vector de probabilidades ayuda a visualizar el comportamiento inicial o actual, estos vectores se obtienen a partir de la matriz de transición (Ross, 2014).

2.12.3. Clases de estados

Como análisis de una matriz cualquiera, se podrá apreciar las infinitas combinaciones de transición, es importante conocer estas propiedades porque al final cada estado está en sintonía (Hillier & Lieberman, 2010).

Estados Absorbentes

Se clasifica estado absorbente cuando un proceso entra a un estado, pero ya no sale, se considera un caso especial de estado, por lo que un estado i es absorbente si y solo si $P_i = 1$

Estados Transitorios

Es cuando un estado carece de la posibilidad de regresar al estado de inicio, por lo que el estado será transitorio i si y solo si existe un estado $j(j \neq i)$ que sea aceptable desde el estado i , pero no de manera contraria, con lo que el estado j no le será accesible al estado i .

Estados Recurrentes

En este estado existe la probabilidad de que un estado i regrese al mismo estado, pues cada estado será visitado n veces y continuara por siempre, con esto se deduce que un estado es recurrente si y solo si no es un estado transitorio.

De todo lo mencionado antes, se logra deducir que las cadenas de Márkov han sido implementadas a gran medida y su aplicación a las ciencias es muy vasta, siendo objeto de investigación en términos científicos, por lo que las aplicaciones seguirán creciendo de manera indefinida, para el presente trabajo se aplicara de una manera modesta y concreta, pues los argumentos que se usaran van más hacia una solución social e ingenieril.

2.12.4. Clasificación de cadenas de Márkov

Partiendo de (Ross, 2014), existen diferentes tipos de cadenas de Márkov, cada una presenta características únicas, estas se clasifican de la siguiente manera:

Cadena ergódica

Se presenta cuando existe la misma probabilidad en el tiempo como probabilidad en el espacio de todos los estados del sistema, por lo que es posible acertar de un estado j a cualquier otro, se debe cumplir que $\lim_{n \rightarrow \infty} P^n$ existe, si y solo si los estados de la cadena son de una misma clase y recurrentes.

Cadenas Regulares

Es cadena regular cuando cualquier matriz de transición que no tenga ceros determina una cadena regular de Márkov, aunque es posible que una cadena regular contenga una matriz de transición con ceros, con base en que al momento de ser elevada a P^n se le asignaran valores en dichos estados, por lo que se tratara de una cadena regular.

Cadena absorbente

Una cadena absorbente no puede ser regular. Se presenta cuando existe, aunque sea un estado absorbente y es posible llegar a él en n número de pasos.

Estado estable

Como lo menciona (Ross, 2014), las cadenas de Márkov poseen una propiedad única con base en que tienden a aproximarse a lo que se conoce como estado estable, este estado es común representarlo con π .

El estado estable se determina con la siguiente condición $\sum_{j=1}^m \pi_j = 1$, de esta manera se podrán obtener m ecuaciones.

Probabilidades de transición en n etapas

Es la probabilidad de que después de transcurridas n etapas se llegue a un estado j , para obtener esta probabilidad es obligatorio contar con una matriz de transición, esta acción se justifica con la ecuación Chapman-Kolmogorov, que es una identidad que debe satisfacer las probabilidades de transición para cualquier proceso markoviano, en tal identidad el orden de tiempos es fundamental (Ross, 2014).

$$p^{(n)} = p^n$$

2.12.5. Aplicaciones de Cadenas de Márkov en temas de investigación

Las aplicaciones del presente modelo son vastas, su auge es notorio, aunque en temas de investigación se enfoca más en el sector industrial, bancario y procesos biológicos. Después de hacer una revisión detallada en diferentes fuentes de información se encontraron pocas

aplicaciones enfocadas a la contaminación atmosférica, a comparación de las ramas antes mencionadas. Es interesante notar como se comprende la idea que plasma cada autor, aunque está sea de otro continente, con costumbres muy diferentes y que finalmente presentan una incertidumbre por ayudar a la región a la que pertenecen. Lamentablemente de todas las investigaciones recopiladas ninguna fue de países de América Latina, los que presentan un mayor interés fueron los países asiáticos. Como se puede apreciar en la tabla 2.2.

Autor	Región y Año	Título	Objeto de estudio	Población analizada	Datos de análisis
A. Carpinone, M. Giorgio, R. Langella	Aversa, CE, Italy. 2015	Markov chain modeling for very-short-term wind power forecasting	Se desarrolla un método de pronóstico de energía eólica basado en modelos discretos de cadenas de Márkov.	Datos de series temporales de energía eólica real.	Para formular los modelos propuestos, se divide el eje del tiempo en intervalos contiguos y equiespaciados de longitud $\Delta t = 10$ min.
María Isabel Carretero León	Sevilla, España. 2016	Caracterización de la contaminación atmosférica debida a aportes antropogénicos y naturales mediante la aplicación de modelos de mixturas finitas, de Márkov homogéneos y otras técnicas de minería de datos	Modelizaciones estadísticas empleadas en contaminación atmosférica.	Contaminantes atmosféricos en entornos urbanos	Conjuntó de datos de concentraciones medias diarias.
Yousif Alyousifi, Nur ulkamal Masseran & Kamarulzaman Ibrahim	Selangor, Malaysia. 2018	Modeling the stochastic dependence of air pollution index data	En este estudio, se aplica un modelo de cadena de Márkov en tiempo discreto para describir el comportamiento estocástico de los datos API	El índice de contaminación del aire (API) por sus siglas en ingles.	El estudio informado en este documento se lleva a cabo con base a los datos recopilados de la ciudad de Klang en Malasia durante un período de 3 años (2012-2014).



Asaf Nebenzal, Barak Fishbain	Haifa, Israel. 2018	Long-term forecasting of nitrogen dioxide ambient levels in metropolitan areas using the discrete-time Markov model	Se presenta un modelo basado en Márkov en tiempo discreto para pronosticar patrones de óxidos de nitrógeno ambientales.	El modelo se aplicó a cinco regiones distintas en Israel y Australia.	Distribuciones generales del nivel de contaminación y la expectativa del nivel de contaminación de mañana dado el nivel de hoy, con base a datos históricos longitudinales
Jeng-Chung Chen & Yenchun Jim Wu	Taipéi, Taiwán. 2020	Discrete-time Markov chain for prediction of air quality index	Propone un proceso basado en cadenas de Márkov de tiempo discreto (DTMC), para predecir el índice de calidad del aire (ICA) e identificar los principales contaminantes del aire en un área específica.	Este estudio utiliza datos de monitoreo de la calidad del aire en línea obtenidos de la Administración de Protección Ambiental de Taiwán.	Estaciones de monitoreo con datos de tres períodos de tiempo
Jason Holmes and Sonia Hassini	Ontario, Canadá. 2021	Discrete-Time Markov Chain Modelling of the Ontario Air Quality Health Index	Proporcionar una mayor comprensión del comportamiento estocástico de las categorías de riesgo AQHI medidas en Ontario	El índice de salud de la calidad del aire (AQHI) por sus siglas en ingles.	Estación de monitoreo de aire, tiempo medio de persistencia en horas
Anurag Barthwal	Uttar Pradesh, India. 2023	A Markov chain based IoT system for monitoring and analysis of urban air quality.	Se desarrolla un sistema IoT basado en cadenas de Márkov para monitorear, analizar y predecir la calidad del aire urbano.	Calidad de aire en Uttar Pradesh	La configuración de detección propuesta está integrada con un automóvil y se utiliza para recopilar información sobre la calidad del aire

Tabla 2.2. Aplicaciones de Cadenas de Márkov a la contaminación atmosférica en el mundo.



CAPÍTULO III

NORMATIVIDAD ATMOSFÉRICA, NACIONAL E INTERNACIONAL

3.1. Problemática

Así como la contaminación ambiental está presente en todo el planeta, también lo está el derecho ambiental, el cual se basa en un conjunto de normas que van enfocadas a regular conductas humanas que inciden de manera perjudicial al medio ambiente, se enfoca en conductas que ocasionen un desequilibrio ecológico, las normas pueden ser descriptivas y cada país cuenta con una constitución que se encarga de emitir normas de acuerdo con su geografía y costumbres propias de su región. Estas normas son efectivas cuando se modifica e impacta de manera beneficiosa, con esto ayuda a generaciones presentes como futuras, no solo de un país sino también puede ayudar a nivel internacional, por lo que es importante una buena comunicación e intercambio de soluciones a nivel mundial para combatir la contaminación atmosférica y por ende ambiental, recordando que el medio ambiente es un conjunto de sistemas que interactúan entre sí y que ayudan a una evolución en el planeta (Romanello et. al, 2021).

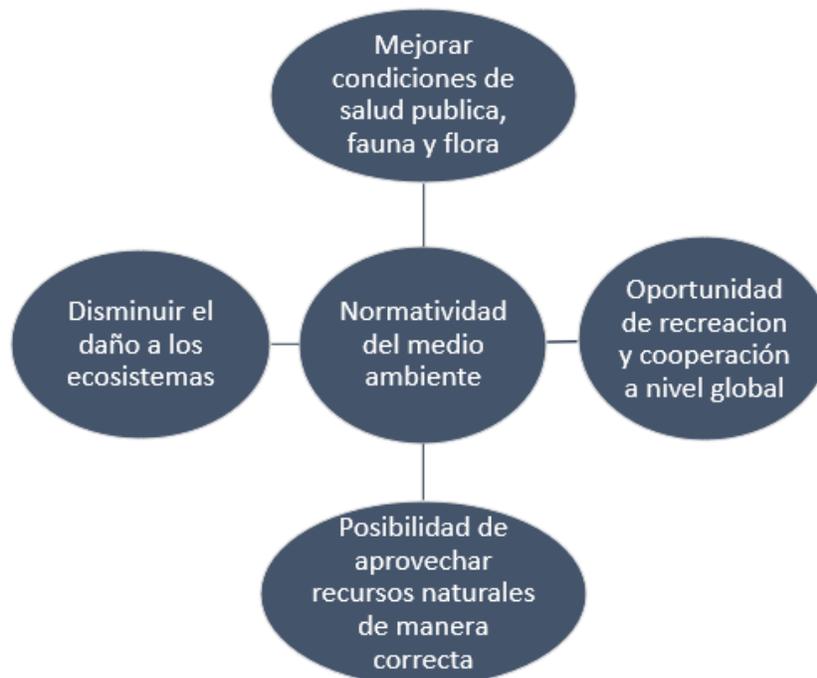


Figura 3.1 Objetivo del Derecho ambiental. Fuente: elaboración propia a partir de: (Romanello et. al, 2021).



3.2. Marco de Normatividad Ambiental en México

Actualmente México es un país que se encuentra en vías de desarrollo, sin embargo, es uno de los países más ricos a nivel global en cuestión de biodiversidad. Desde hace años surgió la necesidad de implementar diferentes dependencias regulatorias enfocadas a la protección del medio ambiente, con lo que se busca vivir en condiciones más sanas para poder subsistir de manera digna, no solo se ayudara a la fauna y flora que prevalece en el territorio nacional, sino que también garantizara un desarrollo sostenible a largo plazo.

México cuenta con una legislación ambiental muy importante que ha estado vigente desde 1970; actualmente tienen como nombre, Normas Mexicanas (NMX). También se han creado decretos y acuerdos, constituciones estatales, leyes estatales e incluso bandos municipales. Todas estas normas se desencadenan en cada rublo ambiental, agua, aire, residuos peligrosos etc. Estas dependencias se basan en brindar indicaciones de cómo hacer uso de los recursos naturales, la temporalidad, quienes están autorizados para poder hacerlo, y lo más importante, las sanciones y castigos que se otorgaran en caso de irrumpir alguna de las normas establecidas, sumándole a esto reparar los daños ocasionados que se ocasionaron (Corrales Gil, 2009).

3.3. Programas y planes de acción a nivel nacional

En tiempos pasados la normatividad ambiental era muy débil, pues solo se respaldaba de la Ley sobre normas industriales promulgada el 11 de febrero de 1946, el cambio relevante fue hasta en la década de 1990 cuando surge PROAIRE en diferentes estados de la república, como se puede apreciar en la tabla 3.1.



Programa	Año
Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica.	1990-1995
Programa para Mejorar la calidad del Aire en el Valle de México (PROAIRE).	1995-2000
Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey (PACADAMM).	1997-2000
Programa para el Valle de Toluca (Aire Limpio).	1997-2000
Programa para el mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara.	1997-2001
Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez.	1998-2002
Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México.	2002-2010

Tabla 3.1. Programas para reducir la contaminación del aire a nivel federal. Fuente: Elaboración propia a partir de: (PROAIRE)

Aunque la responsabilidad ambiental no es algo que le corresponde totalmente al estado, hay políticas que tratan de fomentar el conocimiento respecto de las normas que se aplican, incluso en algunas empresas se someten abiertamente a análisis y revisiones, llegando a poner un buen ejemplo de ejercer buenas prácticas lo que ayuda a hacer conciencia a la sociedad de concebir esta responsabilidad compartida y es donde se obtiene una equidad ambiental.

Las leyes a las que se hizo énfasis fueron a las que repercuten en calidad del aire ya que es el tema central del presente trabajo. Actualmente la SEMARNAT se encarga de monitorear los siguientes contaminantes atmosféricos los cuales son: monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) dióxido de nitrógeno (NO_2), partículas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), dióxido de azufre (SO_2) y plomo (Pb), a través de la NOM proporcionando un rango de concentraciones máximas permisibles, como se puede referenciar en la tabla 3.1. sin embargo, con el paso de los años se han ido modificando los estándares de acuerdo con el crecimiento de la mancha urbana. Como se puede apreciar en la tabla 3.2.

Contaminante	NOM	Norma técnica
Carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	NOM-034-SEMARNAT-1993
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	NOM-036-SEMARNAT-1993
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1993	NOM-037-SEMARNAT-1993
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2010	NOM-034-SEMARNAT-1993
$PM_{2.5}$	NOM-025-SSA1-2014	NOM-035-SEMARNAT-1993
PM_{10}	NOM-025-SSA1-2014	NOM-035-SEMARNAT-1993

Tabla 3.2. Normas que regulan las emisiones de cada contaminante. Fuente: Elaboración propia a partir de: (Normas Oficiales Mexicanas).

Otras instituciones que ayudan es el Instituto de Ecología y Cambio Climático de México (INECC) que apoya directamente a la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) que también monitorea los niveles de contaminación del aire. De todas estas mencionadas la que más poder tiene es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), y rige los lineamientos a seguir en los sectores públicos y privados que se encuentran dentro del territorio nacional, así se garantiza que todas las personas que se encuentren en México tendrán derecho a un documento que sustente sus garantías individuales (SEMARNAT, 2013).

3.4. Implementación de Contingencia ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México “ZMVM”

Es un programa que sirve para brindar información por parte de las autoridades a toda la población cuando los niveles de contaminación sean altos “que representen un peligro ambiental”, invitando a los residentes de esta ciudad a no exponerse al aire libre hasta que este ya no represente un peligro a la salud. De igual manera, su objetivo principal es hacer todo lo posible para reducir los índices elevados de contaminación, para que este no se agrave más de



lo que se encuentra; todo esto se lleva a cabo implementando una limitación de emisiones en sectores y medios de contaminación específicos (CAM, 2013).

Esta iniciativa tuvo inicio en el año 1986, Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA); trabajan en coordinación los gobiernos del Estado de México, CDMX y Federal. A través de los años los niveles de contaminación se han elevado en gran medida, por lo que ha sido necesario que el PCAA modifique sus estándares de niveles de contaminación para sus distintas fases debido a que los criterios de contaminación son cada vez más estrictos. Desafortunadamente al ajustar los rangos de niveles para la activación de contingencias ambientales no garantizan que los niveles decrezcan, ya que solo es una acción rápida de corto plazo, para que sea efectiva, la solución debe de ser un programa a largo plazo que reduzca las emisiones a causa de contaminantes primarios y secundarios (CAM, 2013).

Fase de contingencia	Activación	Suspensión.
Fase I	>150 puntos (154 ppb)	< 150 puntos con pronóstico meteorológico beneficioso para el siguiente día.
Fase II	>200 puntos (204 ppb)	
Fase combinada	>150 puntos (154 ppb) >140 puntos (142 ppb)	< 150 y <140 puntos con pronóstico meteorológico beneficioso para el siguiente día.
Fase preventiva	Pronostico del día siguiente mayor a 140 puntos IMECA, con probabilidad superior al %70 de ocurrencia.	De manera automática a las 19:00 horas del día siguiente.

Tabla 3.3. Índice de concentración (Ozono) fases de contingencia Fuente: Elaboración propia a partir de: PCAA.



Fase de contingencia.

En el año 1990 debido a que ya se presentaba un crecimiento considerable de población, surgió la iniciativa para control de flujo automovilístico, por lo que se creó la verificación vehicular, por consiguiente, entró en vigor el programa “Hoy no circula” que tiene como objetivo disminuir y así regular el tránsito de automóviles en la Ciudad de México y Estado de México, al mismo tiempo que se reducen los niveles de contaminación en la ZMVM (Circula, 2016)

Dicho programa consiste en evaluar el nivel de emisiones que produce cada automóvil, con lo que partiendo de su desempeño se le otorgara un holograma al momento de circular, los hologramas se expresan mediante la siguiente notación:

- Holograma exento.
- Holograma Doble cero o 00.
- Holograma Cero o 0.
- Holograma Uno o 1.
- Holograma Dos o 2.

3.5. Ley General de la Calidad de Aire y Protección a la Atmosfera

Exige la operación de sistemas automáticos de monitoreo de calidad del aire en todos los niveles de gobierno “federativas y municipales”, también se deberá compartir los niveles registrados, con la finalidad de indicar y justificar los índices de calidad del aire, así como posibles riesgos a la salud (SEMARNAT, 2014).

Consideraciones para el índice Aire y Salud

- Su principal propósito es informar los niveles de contaminación diarios del aire para difundir medidas de protección a la población.
- Para el caso del ozono O_3 los reportes de concentraciones se elaborarán con base a las Normas Oficiales Mexicanas actuales, que establezcan un procedimiento adecuado para la medición, también es aplicable para: dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2).

3.6. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

En el año 1987 se implementó la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y ha resultado ser uno de los modelos más eficaces para el cuidado de los ecosistemas. Algunos de los artículos más sobresalientes se pueden apreciar en la tabla 3.4 para el presente trabajo se tomaron en consideración solo a los artículos más sobresalientes con relación a calidad del aire (SEMARNAT, 2014).

A continuación, en la tabla 3.4 se muestra una tabla con las leyes más relevantes para el tema de contaminación del aire, a consideración del autor de la presente tesis.

Artículo	Fracción	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)
IV		<i>“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”.</i>
Artículo	Fracción	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
110		<i>Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:</i>
110	I	<i>La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del País.</i>



110	II	<i>Las emisiones de contaminantes de la atmósfera sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.</i>
111	I	<i>Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional, con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud.</i>
111	II	<i>Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera de jurisdicción federal, y coordinarse con los gobiernos locales para la integración del inventario nacional y los regionales correspondientes.</i>
111	III	<i>Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan por contaminante y por fuente de contaminación, los niveles máximos permisibles de emisión de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles.</i>
111	IV	<i>Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera, con base en la calidad del aire que se determine para cada área, zona o región del territorio nacional. Dichos programas deberán prever los objetivos que se pretende alcanzar, los plazos correspondientes y los mecanismos para su instrumentación.</i>
111	V	<i>Promover y apoyar técnicamente a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas de gestión de calidad del aire, que tengan por objeto el cumplimiento de la normatividad aplicable.</i>
111	VII	<i>Expedir las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire.</i>
111	IX	<i>Expedir, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, las normas oficiales mexicanas que establezcan los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, provenientes de vehículos automotores nuevos en planta y de vehículos automotores en circulación, considerando los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud.</i>
111	X	<i>Definir niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes, áreas, zonas o regiones, de tal manera que no se rebasen las capacidades de asimilación de las cuencas atmosféricas y se cumplan las normas oficiales mexicanas de calidad del aire.</i>



111	XIII	<i>Promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de nuevas tecnologías, con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera,</i>
112		<i>En materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, de conformidad con la distribución de atribuciones establecida en los artículos 7o., 8o. y 9o. de esta Ley, así como con la legislación local en la materia: Párrafo reformado DOF <u>13-12-1996</u></i>
112	II	<i>Aplicarán los criterios generales para la protección a la atmósfera en los planes de desarrollo urbano de su competencia, definiendo las zonas en que sea permitida la instalación de industrias contaminantes; Fracción reformada DOF 13-12-1996</i>
112	III	<i>Requerirán a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción local, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley y en las normas oficiales mexicanas respectivas; Fracción reformada DOF 13-12-1996</i>
112	IV	<i>Integrarán y mantendrán actualizado el inventario de fuentes de contaminación; Fracción reformada DOF 13-12-1996</i>
112	V	<i>Establecerán y operarán sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación.</i>
112	VII	<i>Establecerán requisitos y procedimientos para regular las emisiones del transporte público, excepto el federal, y las medidas de tránsito, y en su caso, la suspensión de circulación, en casos graves de contaminación.</i>
112	VIII	<i>Tomarán las medidas preventivas necesarias para evitar contingencias ambientales por contaminación atmosférica.</i>
112	IX	<i>Elaborarán los informes sobre el estado del medio ambiente en la entidad o municipio correspondiente, que convengan con la Secretaría a través de los acuerdos de coordinación que se celebren.</i>
112	X	<i>Impondrán sanciones y medidas por infracciones a las leyes que al efecto expidan las legislaturas locales, o a los bandos y reglamentos de policía y buen gobierno que expidan los ayuntamientos, de acuerdo con esta Ley; Fracción reformada DOF 13-12-1996</i>
113		<i>No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente. En todas las emisiones a la atmósfera, deberán ser observadas las previsiones de esta Ley y de las disposiciones reglamentarias que de ella emanen, así como las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría. Artículo reformado DOF <u>13-12-1996</u></i>
114		<i>Las autoridades competentes promoverán, en las zonas que se hubieren determinado como aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales, la instalación de industrias que utilicen tecnologías y combustibles que generen menor contaminación.</i>
115		<i>La Secretaría promoverá que en la determinación de usos del suelo que definan los programas de desarrollo urbano respectivos, se consideren las condiciones topográficas, climatológicas y meteorológicas, para asegurar la adecuada dispersión de contaminantes.</i>



116		<i>Para el otorgamiento de estímulos fiscales, las autoridades competentes considerarán a quienes:</i>
116	I	<i>Adquieran, instalen u operen equipo para el control de emisiones contaminantes a la atmósfera.</i>
116	II	<i>Fabriquen, instalen o proporcionen mantenimiento a equipo de filtrado, combustión, control, y en general, de tratamiento de emisiones que contaminen la atmósfera.</i>
116	III	<i>Realicen investigaciones de tecnología cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes.</i>
116	IV	<i>Ubiquen o relocalicen sus instalaciones para evitar emisiones contaminantes en zonas urbanas.</i>

Tabla 3.4. Leyes más relevantes para el tema de contaminación del aire.

3.7. Normatividad Internacional

En días presentes existe un panorama conforme a la legislación sobre calidad del aire, pues es muy diverso en cada país, debido a que cada nación ha decretado diferentes criterios, normas y obligaciones, conforme a su sistema de gobierno, riesgos sanitarios, economía, cultura socio jurídica, nivel de conocimientos en tecnología y su pasado como patrón de influencia en relación con la legislación de calidad de aire presente (WHO, 2018).

La principal dependencia a nivel mundial que se encarga de emitir recomendaciones para tratar los niveles de contaminación en el aire es la Organización Mundial de la Salud (OMS), la ventaja de esta dependencia es que sus métodos están justificados de un alto grado de consenso científico, incluso se podría redactar un tratado mundial integrando las normas de calidad de aire más sobresalientes que respalde el derecho al aire limpio de una manera universal.

En el año 2005 la Organización Mundial de la Salud emitió uno de los instrumentos más sobresalientes a nivel internacional, las Guías de Calidad del Aire (GCA), con la finalidad de orientar a todos los países pertenecientes a la ONU a fijar límites en los niveles de contaminación dentro de sus territorios. Es sumamente importante para México, debido a que, a partir de los



niveles establecidos por la OMS, fueron el pilar para decretar la mayoría de las medidas vigentes para la mitigación de la contaminación ambiental en toda la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), e incluso el instrumento PROAIRE 2021-2030 “el instrumento más reciente emitido en México” se guiara de la guía antes mencionada. (WHO, 2018).

Para conocer el desempeño de cada país la OMS implementó: Objetivos Intermedios (OI); con este instrumento se conocerá el avance de cada país por salvar a su población de la contaminación atmosférica. Sin embargo, su objetivo primordial es alentar a seguir las Guías de Calidad de Aire (GCA).

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se encarga de evaluar condiciones y tendencias ambientales a nivel mundial, continental y nacional, ha diseñado instrumentos ambientales para fortalecer las instituciones para una gestión adecuada, con esto facilita el uso racional y desarrollo sostenible a nivel mundial (SMAR, 2015).

3.8. Ley General de Cambio Climático

En el año 2012 se promulgo la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y México fue el segundo país en el planeta en integrarlo, debido a la lamentable situación y características que presenta bajo el cambio climático. Esto demostró el alto compromiso que se tiene, pues se induce a nuevas formas de trabajo institucionales, nueva logística de planeación e incluso temas políticos para una correcta implementación de política climática, con esto se lograran soluciones a largo plazo basado de un trabajo en equipo y participativo, esto con base a que se incentivó a una cooperación del Sistema Nacional de Cambio Climático (EL CONGRESO GENERAL DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, 2012).

3.9. Protocolo de Montreal

Se firmó en el año 1987, y su principal objetivo es la protección a la capa de ozono y mitigar el cambio climático. Éste protocolo está constituido por 197 países; México fue de los primeros países en integrarse en el año 1988. Se caracteriza por el financiamiento de proyectos con fines ambientales de países desarrollados hacia países en vías de desarrollo (PNUMA, 1987).

Sus resultados han sido muy beneficiosos, la participación de México en este protocolo ha sido destacada, por disminuir el consumo de SAO “sustancias que agotan la capa de ozono”, con lo que se estima que la regeneración parcial de la capa de ozono se pueda lograr en el año 2060.

3.10. Protocolo de Kioto

Se encarga de que se cumpla lo establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático exhortando a los países a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), se implementó el 11 de diciembre de 1997, entrando en vigor en 2005. Está conformado por 37 países industrializados y la Unión Europea, México es uno de ellos y se encuentra en el quinto lugar en Mecanismo para Desarrollo Limpio (MDL), lamentablemente países altamente contaminantes como Australia, China y Estados Unidos desaprobaron este acuerdo argumentando que afectaba considerablemente a su economía (Ballester et. al, 2006).

3.11. Acuerdo de Paris

Es un tratado internacional para combatir el cambio climático. Actualmente 196 países lo conforman y fue promulgado en la COP21 en París, deriva del Protocolo de Kioto, entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, su objetivo es a largo plazo y se basa en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para así limitar el aumento de la temperatura del planeta a dos grados centígrados y alcanzar una neutralidad climática. Es notorio que no todos los países participantes en el tratado presentan un buen desarrollo económico, tomando esta consideración, se opta por una asistencia financiera de países desarrollados hacia países en vías de desarrollo. Hay que reconocer que la financiación para la salud del planeta es la mejor inversión que cualquier país pueda hacer, pues son inversiones sumamente fuertes incluyendo la adopción de nuevas costumbres de la sociedad para alentar cambios en favor del clima (Glaneman et. al, 2020).

3.12. Consideraciones actuales

Se puede afirmar que la normatividad ambiental a nivel global es considerablemente fuerte, esto se puede comprobar por el crecimiento e interés de la democracia ambiental que ha repercutido en muchos países en cuestión de participación pública e implementación de derechos y normas de cada país. De acuerdo con (OPS, 2022).

- i. Solo el 33% incluye en su constitución el derecho a participar en la implementación de planes y acciones para combatir la contaminación del aire.
- ii. Se especula que solo el 25% de los países presentan derechos justiciables con relación a contaminación atmosférica.



- iii. El 27% de los países monitorea los índices de calidad del aire para compartir los estados de calidad de aire en tiempo real a la población.
- iv. 11% de los países integran a derechos que comprenden la participación en la implementación de normas de calidad del aire en su constitución.
- v. El 61% de países que cuenta con una legislación ambiental, entre ellos México brindan acceso de la información sobre los niveles de contaminación diarios a la población en general. Sin embargo, un 14% de países que cuentan con legislación ambiental se reserva a no compartir dichos datos a la población.
- vi. El 31% de los países cuenta con leyes para gestionar o abordar la contaminación ambiental transfronteriza, esto porque existe un transporte transnacional y transcontinental de contaminantes atmosféricos que repercute en la calidad del aire a nivel nacional.



CAPÍTULO IV

ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describirá la aplicación de las Cadenas de Márkov con base en los capítulos que se desarrollaron anteriormente, brindando un análisis de datos para cumplir con los objetivos propuestos de la presente investigación.

4.1. Justificación de la Zona de estudio

Para la zona de estudio se decidió enfocarlo en la zona centro de la Ciudad de México, de todas las zonas esta es la que cuenta con más afluencia de toda la ciudad gracias al gran auge cultural que perdura (calles, museos, monumentos, edificaciones, templos, iglesias, exconventos, etc.), lo que ocasiona una gran atracción de personas nativas y extranjeras, por consiguiente, lo hace una atractiva para emprender negocios “gran aporte económico para la sociedad” (INEGI, 2020).

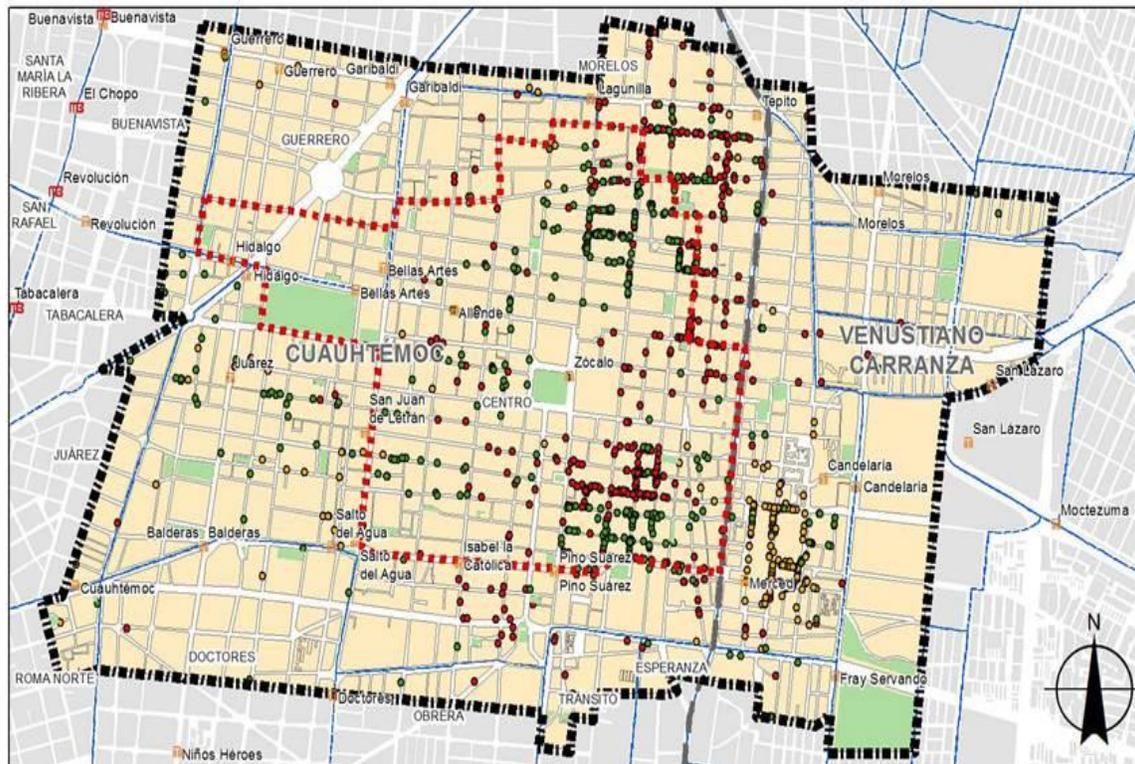


Figura 4.1. Mapa centro histórico. Fuente: recuperada de: (PUEC-UNAM, 2016).



Desafortunadamente, al ser una zona de gran actividad se presenta un alto nivel de tránsito vehicular, lo que agrava los índices de contaminación del aire, auditiva e incluso visual, teniendo como resultado un alto nivel de fatiga en personas que no son oriundas de la CDMX. Esto se justifica porque no están acostumbradas a que en su lugar de origen se presenten altos niveles de contaminación (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

El turismo es muy notorio en esta parte del país y es un comportamiento que probablemente aumentara por la riqueza cultural de la zona. La mayoría de las personas que vienen de visita son adultos mayores, al igual que los residentes, por lo que surge la necesidad de implementar medidas para disminuir los niveles de contaminación, con lo que se lograra salvaguardar la salud de estos y hacer una estadía más saludable y placentera. Además, no solo se verían resultados en la zona centro, sino también en todas las zonas de la Ciudad de México y otras ciudades que presenten la misma problemática (Carvache F, et al. 2003).

La ventaja que presenta la zona centro es que si los resultados son favorables se podrá dar un seguimiento a nivel mundial de manera rápida, como se sabe, la ciudad de México cuenta con un estatus muy elevado y es idolatrada por muchos gobiernos por distintas cualidades, como son: planeación urbana, transporte, implementación de medidas de seguridad, programas de ayuda a la comunidad, etc. (PUEC-UNAM, 2016).

4.2. Aplicación del inventario de IMECA al modelo de Cadenas de Márkov

Datos para el estudio

Para tener éxito en el presente estudio, es necesario contar con una bitácora altamente confiable donde se muestre un monitoreo detallado de los niveles de ozono presentes día a día,

para la cual se eligió la zona centro. Dicha estación pertenece al IMECA administrada por el gobierno de la Ciudad de México, que comparte la información e inventarios de los índices de concentración de ozono O_3 la estación que se eligió fue la siguiente:

Nombre	Merced
Clave	MER
No. ID	4.8409E+11
Domicilio	Congreso de la Unión esq. Stan de Tiro s/n, Col. Merced Balbuena, C.P. 15860
Alcaldía	Venustiano Carranza
Estado	CDMX
Latitud	19.42461
Longitud	-99.119594
Altitud	2245 msnm

Tabla 4.1. Características de la estación seleccionada. Fuente: (Directorio de estaciones de IMECA).

Fecha inicial 1 Enero 2018
Fecha final 1 Enero 2023

Contaminantes:

SO2
 CO
 NO2
 O3
 PM10
 PM2.5
 Todos

Zonas:

Noroeste
 Noreste
 Centro
 Suroeste
 Sureste
 Todas

Criterios disponibles del IMECA:

IMECA Horarios
 IMECA Maximos Diarios
 Días con IMECA Mayor a:

Figura 4.2. Acceso al inventario de emisiones de ozono. Fuente: (Acceso a inventario por estación IMECA).

Para el funcionamiento del modelo con base en los datos capturados de IMECA, estos datos constan de registros máximos por día de ozono (O_3), en la Zona Centro de la CDMX, en total se capturaron 1826 datos, para el periodo de 1 de enero del 2018 a 1 enero del 2023, siendo un total de 60 meses (*12 meses X 5 años*). Es importante contemplar cómo ha sido el comportamiento del ozono (O_3) en los últimos cinco años, para esto se creyó prudente graficar los niveles de ozono (O_3) en los años de estudio antes mencionado, partiendo de los datos del inventario, Véase en las figuras: 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.

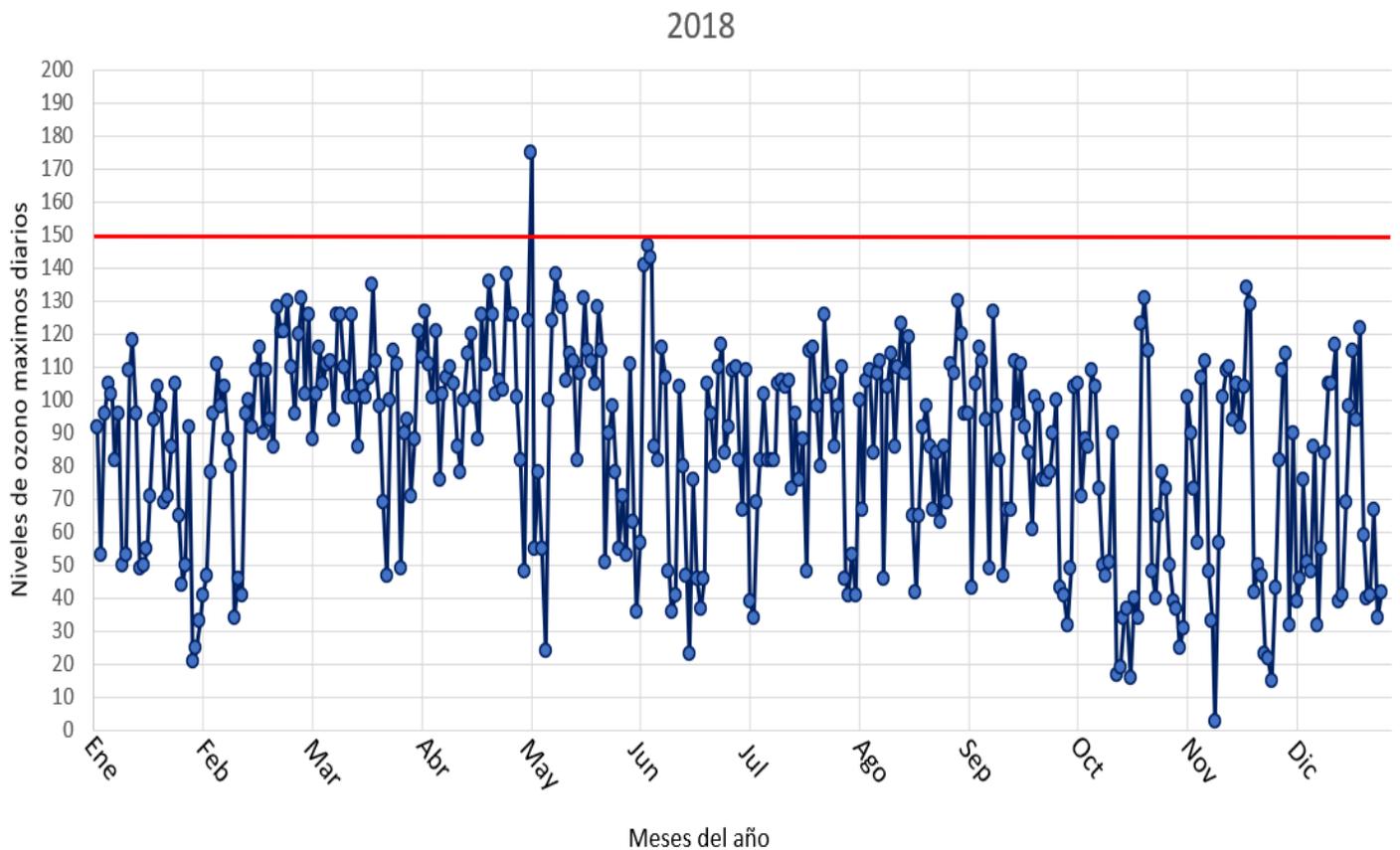


Figura 4.3. Comportamiento de ozono en el año 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.

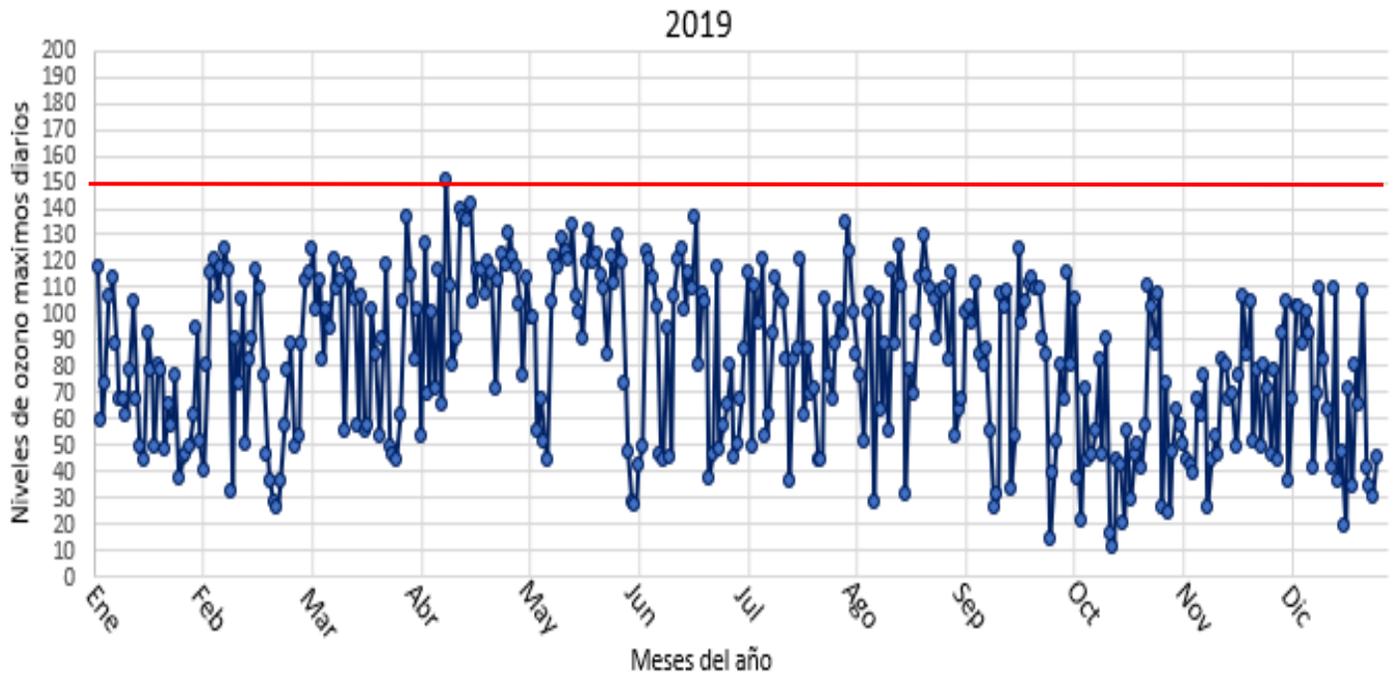


Figura 4.4. Comportamiento de ozono en el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.

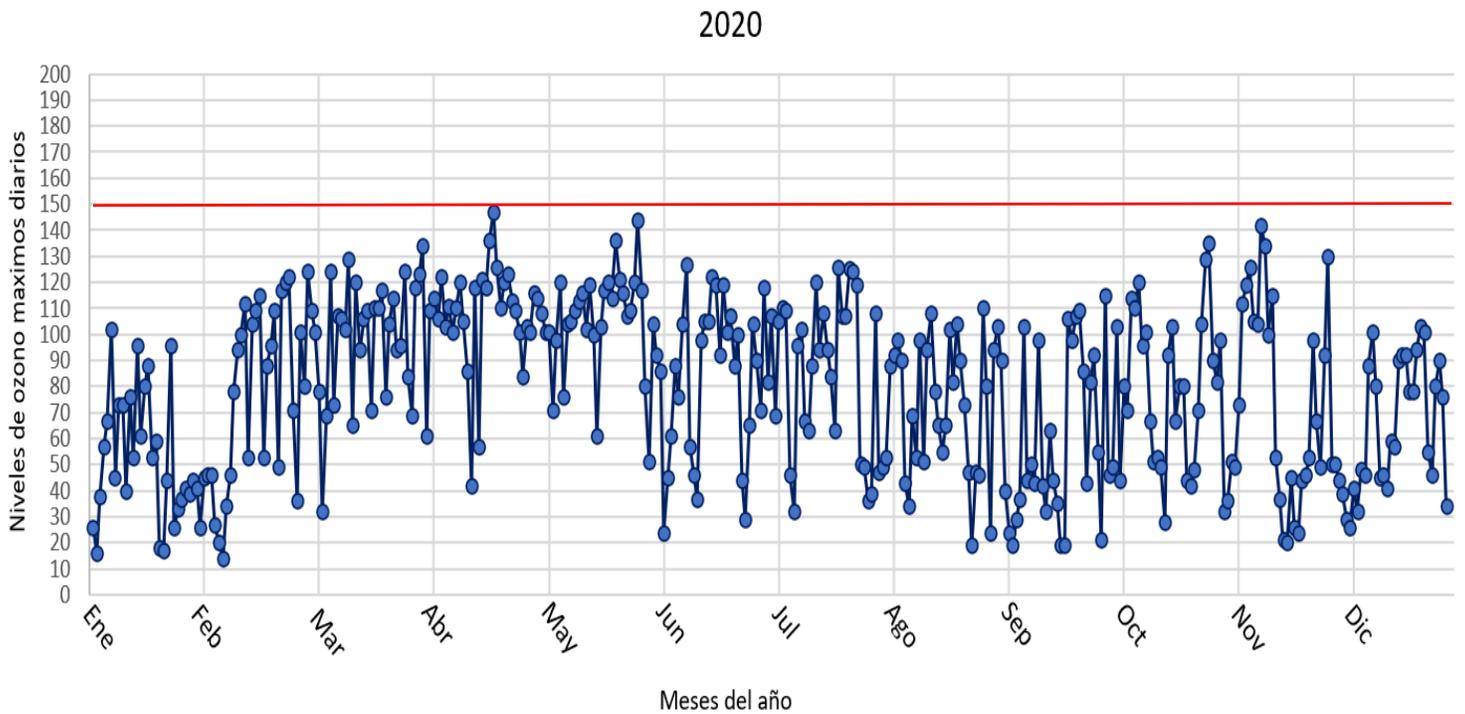


Figura 4.5. Comportamiento de ozono en el año 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.

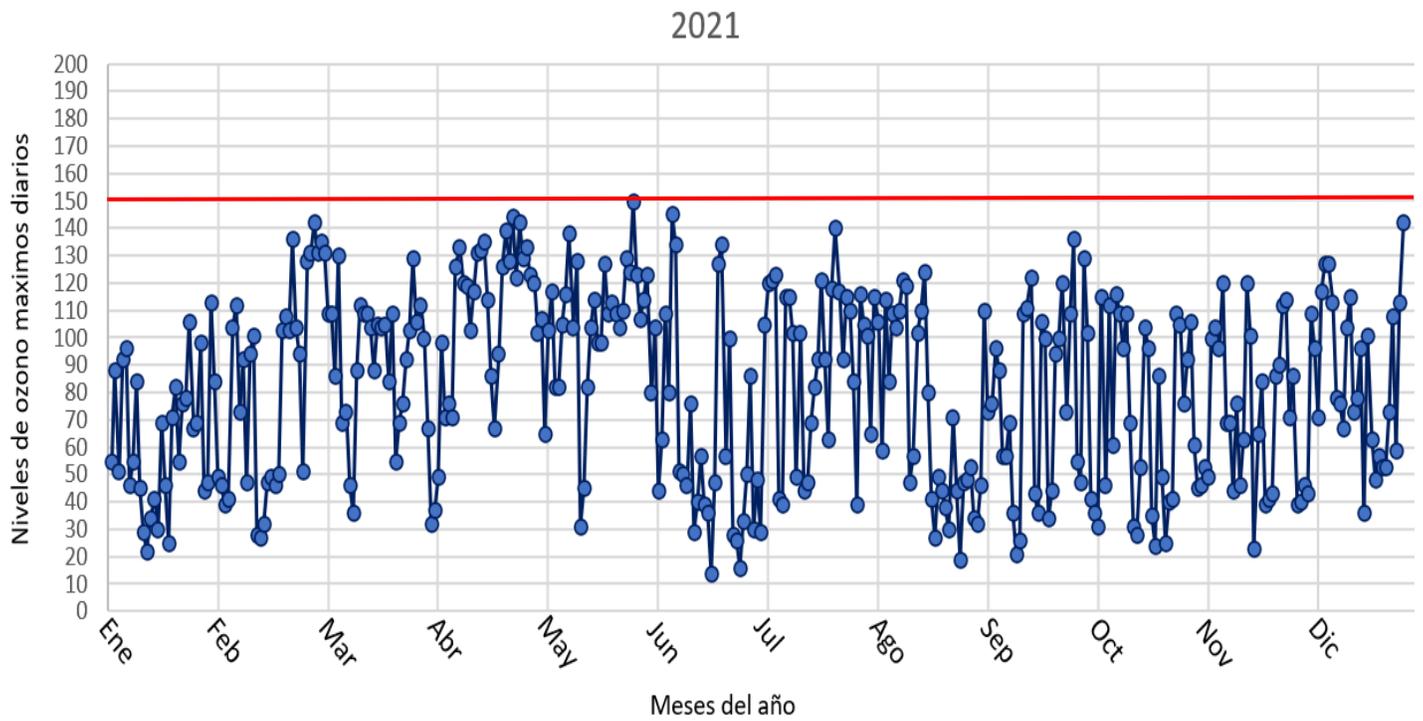


Figura 4.6. Comportamiento de ozono en el año 2021. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.

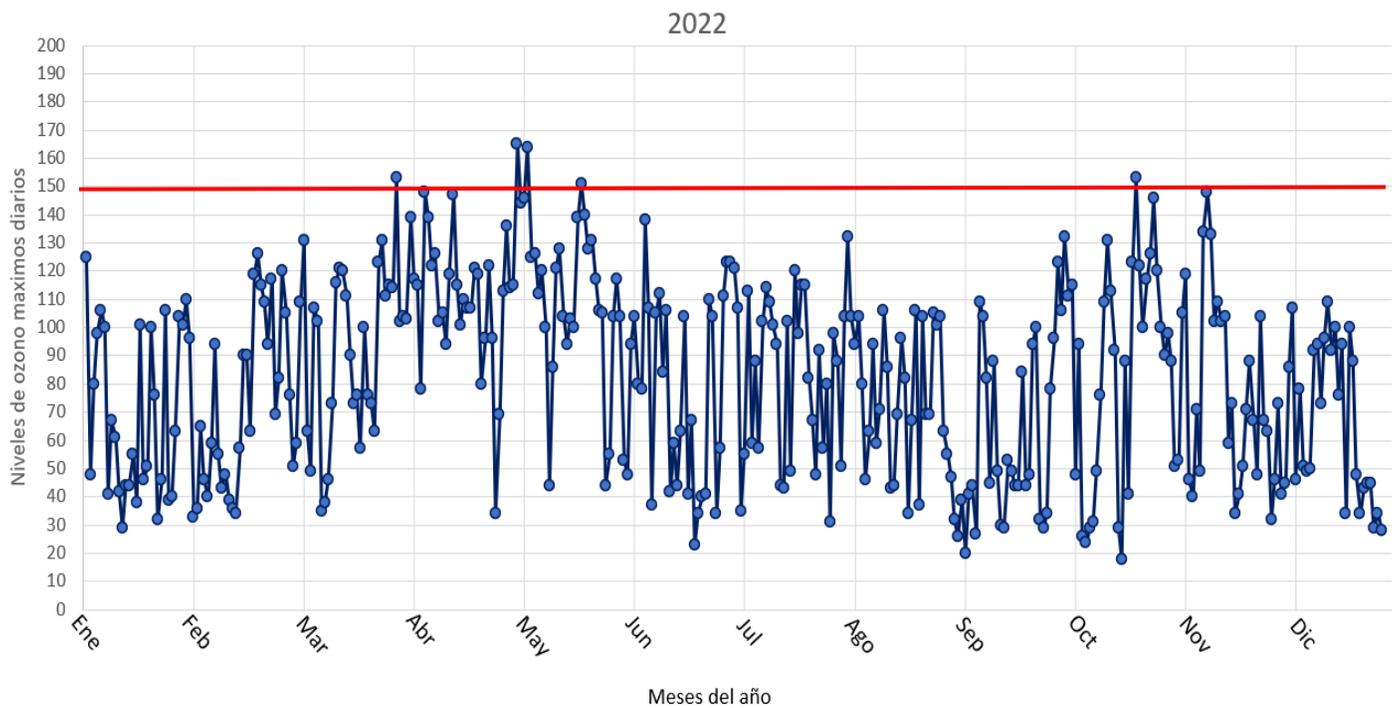


Figura 4.7. Comportamiento de ozono en el año 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario capturado.

Se puede observar que el mejor año de todos fue el 2020, la justificación es la cuarentena debido a COVID-19, aunque los niveles disminuyeron notoriamente el comportamiento de concentraciones continuó siendo el mismo. En los meses restantes se presentaron más días con altos niveles de concentración y muy pocos con una buena calidad de aire.

Una ventaja que puede pasar desapercibida del IMECA es que no hay datos faltantes en sus inventarios, lo que ayuda a que el modelo sea más preciso y confiable, aunque si no fuera así y hubiera datos faltantes, la solución sería tomar los datos de la estación más cercana a la zona de estudio, o si esta se encuentra en un límite de distancia no considerable, la obtención de los datos faltantes se puede calcular con un promedio aritmético de datos anteriores y posteriores al dato de estudio.

4.3. Obtención de matriz

La conceptualización de las matrices está definida por cuatro estados, (“Bueno”, “Regular”, “Malo” y “Muy Malo”) que determinaran el desempeño descriptivo de los rangos de ozono que prevalecen día a día, cada uno presenta diferentes condiciones climatológicas, sin embargo, los 4 estados se definieron en cada matriz, aunque no haya registro de algún estado por mes resulta indispensable conocer la carencia de ese estado en dicho mes.

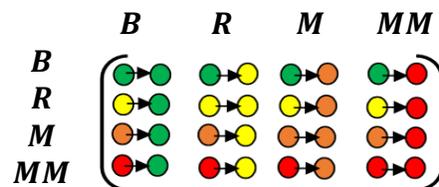


Figura 4.8. Conceptualización de matrices Fuente: elaboración propia a partir de: (Hillier et. Al, 2010).

Para este proceso markoviano se propuso dividir el inventario de datos por cada mes del año “en total doce matrices” permitiendo apreciar el comportamiento único que presenta cada mes, por lo que el ajuste de probabilidades se definirá de la siguiente manera:

Mes	Asignacion
Enero	→ A
Febrero	→ B
Marzo	→ C
Abril	→ D
Mayo	→ E
Junio	→ F
Julio	→ G
Agosto	→ H
Septiembre	→ I
Octubre	→ J
Noviembre	→ K
Diciembre	→ L

Tabla 4.2. Nomenclatura para cada mes.

Como se ha mencionado antes, para el presente análisis se tomó una muestra de cinco años, de tal manera que se agrupo cada mes con su año de registro para tener una base más sólida del estudio. Debido a que los índices de contaminación son diferentes en cada mes y la extensión de la memoria de cálculo por mes, se propuso tomar como ejemplo al mes de mayo, ya que en este mes se manifiestan todos los estados.

Aplicación de modelo para el mes de mayo

Los datos que se muestran a continuación son resultado de un exhaustivo análisis en donde se capturaron los cambios de estado que había día a día, así es como se lograron obtener las siguientes matrices.

may-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	1	1	0
REGULAR	2	8	2	0
MALA	0	2	12	1
MUY MALA	0	1	0	0

$$\longrightarrow E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 8 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 12 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	1	0
REGULAR	1	5	3	0
MALA	0	5	15	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 5 & 3 & 0 \\ 0 & 5 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	0	0
REGULAR	0	3	4	0
MALA	0	4	19	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	1	0	0
REGULAR	0	2	4	0
MALA	1	3	18	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 \\ 1 & 3 & 18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	2	0	0
REGULAR	1	0	3	0
MALA	1	2	15	3
MUY MALA	0	0	3	0

$$\longrightarrow E_5 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 15 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

Una vez obtenidas las matrices por cada año se procede a integrarlas para así tener solo una, esto se justifica a que las muestras pertenecen al mismo caso de estudio, recordando que se trata de un solo mes.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 0 \\ 4 & 18 & 16 & 0 \\ 2 & 16 & 79 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

4.4. Obtención de Matriz de transición

Llegado a este paso, es cuando ya se puede obtener la matriz de transición y se logrará dividiendo cada elemento de cada estado por la sumatoria de los elementos de la columna correspondiente.

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 0 \\ 4 & 18 & 16 & 0 \\ 2 & 16 & 79 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 7 \\ \rightarrow \Sigma = 38 \\ \rightarrow \Sigma = 101 \\ \rightarrow \Sigma = 4 \end{array}$$

La matriz de transición permitirá conocer el probable estado futuro de un proceso a partir del probable estado actual, de tal manera, la matriz de transición para el mes de mayo queda de la siguiente forma:

$$P_E = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.143 & 0.571 & 0.286 & 0 \\ 0.105 & 0.474 & 0.421 & 0 \\ 0.020 & 0.158 & 0.782 & 0.039 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

Como lo menciona (Bini, 2005), se puede confirmar que la matriz de transición cumple, por ser:

- Una matriz cuadrada.
- La sumatoria por columna es igual a 1.

4.8. Diagrama de transición

Para comprender mejor la matriz de transición, se puede hacer uso de un diagrama de transición, véase en la figura 4.9, en él se reflejarán los flujos correspondientes, donde las flechas “nótese que tienen origen y dirección” representan las probabilidades de pasar de un estado a

otro. Esto brinda un mejor panorama del comportamiento que se presenta, al igual que se logra deducir que tipo de cadena se obtuvo. Es una ventaja que existe en cadenas de Márkov ya que la ayuda visual ayuda bastante (Hillier et. al, 2010).

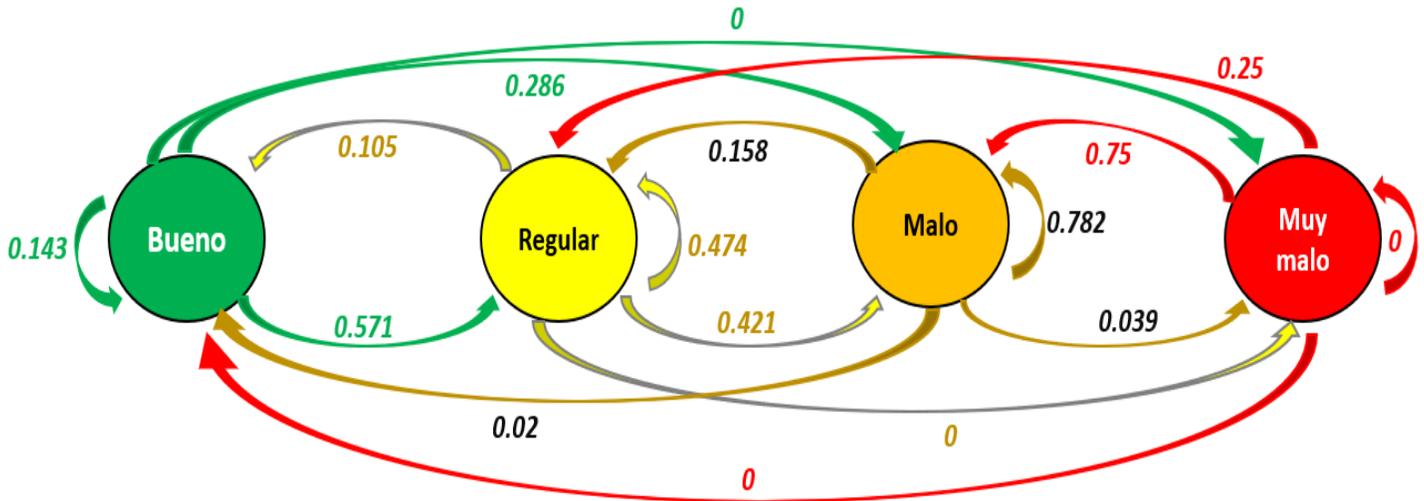


Figura 4.9. Diagrama de transición para el mes de mayo. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de transición P_E .

A simple vista se pueden apreciar detalles importantes:

- La transición de un estado a otro puede ser en un solo movimiento.
- De acuerdo con el comportamiento que se presenta en las matrices y diagramas de transición, se confirma que se trata de una Cadena Ergódica y esto aplica para los doce meses del año.
- Los estados que predominan son Regular y Malo, esto aplica para todos los meses.
- No se presentó una transición de un estado Muy Malo a Muy Malo, este comportamiento es similar para todos los meses del año.
- Como se observa en el diagrama no hubo transiciones de estado Muy Malo a estado Bueno, de igual manera en todos los meses del año.

4.9. Estado estable

Partiendo de (Ross, 2014), una Cadena de Márkov Ergódica de S estados es posible encontrar un vector $\vec{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots \pi_n]$ de estado estable, es así como se estabilizará la matriz de transición, con base en $\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}(n + 1) = \pi_j$

$$\text{cumpliendo que: } \sum_{j=1}^S \pi_j = 1$$

La ecuación de Chapman permitirá multiplicar la matriz de transición por sí misma n veces P^n , hasta encontrar el estado estable, de esta manera procedemos a elevar la matriz de transición P_E^{n+1} , no existe un límite establecido de iteraciones, de esta manera se procede a elevar la matriz para llegar al estado estable, como se aprecia en las siguientes matrices.

1	B	R	M	MM	9	B	R	M	MM
B	0.1429	0.5714	0.2857	0	B	0.047776	0.263957	0.662067	0.026199
R	0.1053	0.4737	0.4211	0	R	0.047743	0.263843	0.662203	0.026212
M	0.0198	0.1584	0.7822	0.0396	M	0.047647	0.263513	0.662591	0.026248
MM	0	0.2500	0.7500	0	MM	0.047661	0.263559	0.662537	0.026243
2	B	R	M	MM	10	B	R	M	MM
B	0.086216	0.397571	0.504897	0.011315	B	0.047720	0.263765	0.662294	0.026220
R	0.073237	0.351229	0.558859	0.016675	R	0.047706	0.263716	0.662352	0.026226
M	0.034993	0.220165	0.713865	0.030977	M	0.047666	0.263576	0.662517	0.026241
MM	0.041167	0.237233	0.691897	0.029703	MM	0.047671	0.263596	0.662494	0.026239
3	B	R	M	MM	11	B	R	M	MM
B	0.064164	0.320402	0.595438	0.019996	B	0.047697	0.263683	0.662391	0.026229
R	0.058500	0.300922	0.618445	0.022133	R	0.047691	0.263662	0.662415	0.026232
M	0.042310	0.245116	0.684302	0.028272	M	0.047673	0.263603	0.662485	0.026238
MM	0.044554	0.252931	0.675113	0.027402	MM	0.047676	0.263611	0.662476	0.026237
4	B	R	M	MM	12	B	R	M	MM
B	0.054684	0.287760	0.633974	0.023582	B	0.047687	0.263648	0.662432	0.026233
R	0.052280	0.279475	0.643752	0.024493	R	0.047684	0.263639	0.662442	0.026234
M	0.045397	0.255757	0.671745	0.027101	M	0.047677	0.263614	0.662472	0.026237
MM	0.046358	0.259068	0.667837	0.026737	MM	0.047678	0.263618	0.662468	0.026237

5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.050656	0.273882	0.650353	0.025108	B	0.047682	0.263634	0.662449	0.026235
R	0.049635	0.270361	0.654509	0.025495	R	0.047681	0.263630	0.662454	0.026235
M	0.046709	0.260279	0.666408	0.026604	M	0.047678	0.263619	0.662466	0.026237
MM	0.047117	0.261687	0.664747	0.026449	MM	0.047679	0.263621	0.662465	0.026236

6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.048945	0.267984	0.657315	0.025757	B	0.047680	0.263627	0.662457	0.026236
R	0.048510	0.266487	0.659082	0.025921	R	0.047680	0.263626	0.662459	0.026236
M	0.047267	0.262202	0.664139	0.026392	M	0.047679	0.263621	0.662464	0.026236
MM	0.047440	0.262800	0.663433	0.026327	MM	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236

7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.048217	0.265476	0.660274	0.026032	B	0.047680	0.263625	0.662460	0.026236
R	0.048032	0.264840	0.661025	0.026102	R	0.047679	0.263624	0.662461	0.026236
M	0.047504	0.263019	0.663175	0.026303	M	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236
MM	0.047578	0.263273	0.662875	0.026275	MM	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236

8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.047908	0.264410	0.661532	0.026149	B	0.047679	0.263623	0.662461	0.026236
R	0.047829	0.264140	0.661851	0.026179	R	0.047679	0.263623	0.662462	0.026236
M	0.047605	0.263366	0.662765	0.026264	M	0.047679	0.263622	0.662462	0.026236
MM	0.047636	0.263474	0.662638	0.026252	MM	0.047679	0.263622	0.662462	0.026236

Tabla 4.3. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de mayo.

El número de iteraciones no está definido, una vez llegado al estado estable si se continuara elevando la matriz el resultado sería exactamente el mismo, como se aprecia en las matrices anteriores y en las demás matrices para los meses faltantes de estudio (véase en Anexo A2) se utilizaron hasta seis decimales para tener un mejor pronóstico, de tal modo se logra observar como las sucesivas potencias de la matriz van asemejándose cada vez más entre sí, es a partir de P_E^{16} que los resultados permanecen constantes y no cambian (por debajo del sexto decimal). Por lo tanto, el pronóstico que se espera en calidad de aire por ozono para el mes de mayo es el siguiente:

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Mayo	4.8%	26.4%	66.2%	2.6%



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la metodología aplicada de Cadenas de Márkov y un exhaustivo análisis para cada mes, siguiendo la misma metodología que se mostró anteriormente en el mes de mayo, se llegaron a los siguientes resultados, mismos que la memoria de cálculo está justificada en el Anexo A2. Por consiguiente, se integraron los resultados en una tabla resumen que se muestra a continuación.

Mes	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Enero	0.397112	0.487365	0.115523	0.000000
Febrero	0.231566	0.364578	0.403856	0.000000
Marzo	0.096713	0.350309	0.546621	0.006356
Abril	0.022163	0.212756	0.758433	0.006649
Mayo	0.047679	0.263623	0.662461	0.026236
Junio	0.343357	0.296843	0.359800	0.000000
Julio	0.191247	0.400875	0.407877	0.000000
Agosto	0.191211	0.475612	0.333177	0.000000
Septiembre	0.361494	0.401135	0.237372	0.000000
Octubre	0.375290	0.322358	0.295779	0.006573
Noviembre	0.378217	0.372636	0.249147	0.000000
Diciembre	0.363884	0.447243	0.188873	0.000000

Tabla 5.1. Resultados por mes.

Dichos resultados se pueden expresar en notación porcentual para tener una mejor perspectiva de estos, como se observa en la tabla 5.2, de tal manera se pueden justificar los resultados afirmando que los pronósticos para el año 2023 fueron obtenidos de un inventario de 5 años y que es muy seguro por ser una muestra grande, todo lo mencionado resulta más fácil de analizar si se expresa en una gráfica (Figura 5.1).

Mes	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Enero	39.7%	48.7%	11.6%	0.0%
Febrero	23.2%	36.5%	40.4%	0.0%
Marzo	9.7%	35.0%	54.7%	0.6%
Abril	2.2%	21.3%	75.8%	0.7%
Mayo	4.8%	26.4%	66.2%	2.6%
Junio	34.3%	29.7%	36.0%	0.0%
Julio	19.1%	40.1%	40.8%	0.0%
Agosto	19.1%	47.6%	33.3%	0.0%
Septiembre	36.1%	40.1%	23.7%	0.0%
Octubre	37.5%	32.2%	29.6%	0.7%
Noviembre	37.8%	37.3%	24.9%	0.0%
Diciembre	36.4%	44.7%	18.9%	0.0%

Tabla 5.2. Pronósticos por mes.

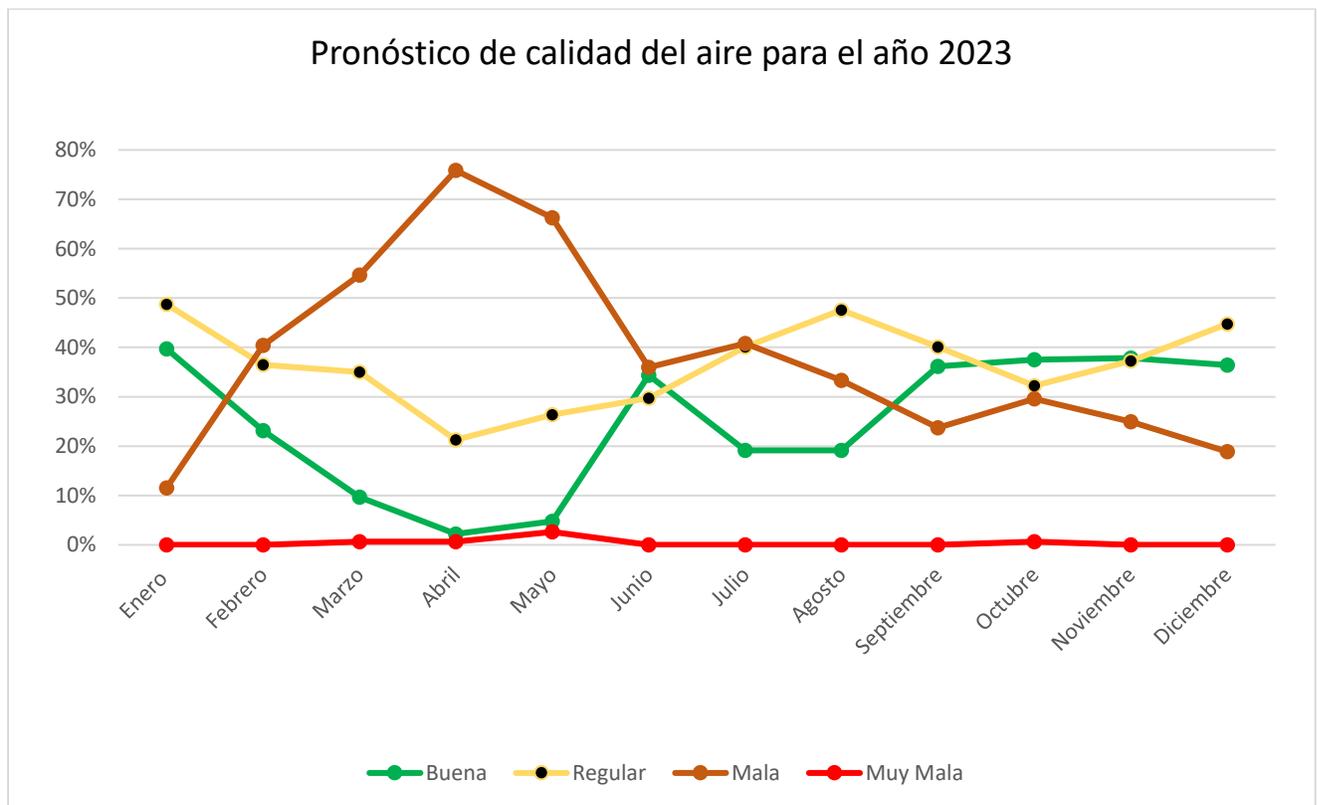


Figura 5.1. Comportamiento de ozono para la Ciudad de México en el año 2023.

Desafortunadamente los pronósticos que se obtuvieron no son nada agradables, pues las probabilidades por mes de llegar a un día con buena calidad de aire son muy bajas a comparación de días con calidad regular y calidad mala en los que la probabilidad es sumamente elevada, para los ciudadanos de esta ciudad se ha vuelto completamente normal vivir en condiciones así, pasando desapercibido el interés por temas relevantes a contaminación.

Aun así se puede hacer un análisis para cada mes, y este es el motivo de que el estudio se haya repartido por cada mes y no por año, con lo que se puede argumentar que:

- * Enero es el mes que presenta un mejor pronóstico, con base en que la probabilidad de tener una buena calidad de aire es la más alta de todos los meses, aunque prevalece la calidad regular, de igual manera las probabilidades de tener una calidad mala son considerablemente bajo y muy mala la probabilidad es nula.

- * Los meses que representan un alto riesgo para la salud son: mayo, abril, marzo y febrero; debido a que la probabilidad de tener un día con mala calidad es relativamente alta, también hay probabilidad de tener días con calidad muy mala lo que significa que es muy posible afrontar contingencias ambientales, como se mencionó en el marco teórico las condiciones climatológicas propician estos niveles y es algo en común que presentan estos meses, es por eso baja probabilidad de tener un día con buena calidad.

- * En julio y agosto la probabilidad de tener un día bueno es la misma, pero baja, a comparación de las probabilidades de tener un día de calidad regular y mala que predominan.

- * En los meses de junio, septiembre y diciembre la probabilidad de tener calidad regular es más alta a comparación de otros meses exceptuando a enero, sin embargo, la probabilidad de tener calidad de aire mala es más baja si se compara con los demás meses del año.



* En octubre y noviembre tienden a tener una probabilidad de calidad de aire buena más alta a comparación de otros meses. Aunque, también presentan la misma probabilidad de tener calidad regular y mala.

* Los resultados generados son altamente confiables, a diferencia de cualquier método probabilístico, el presente modelo, involucra el comportamiento de cambio de estado, la única desventaja al aplicarlo es capturar toda la información del inventario en la matriz de datos, debido a que el número de estados a analizar será el cuadrado de la muestra, en este caso 16 posibles combinaciones, gracias a esto se pudo obtener el análisis y pronóstico anterior.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se realizó una aplicación de las cadenas de Markov a los índices diarios de ozono en la Ciudad de México. Se percibió que este modelo no es muy común de aplicar en temas de contaminación atmosférica, sin embargo, se desarrolló una correcta aplicación gracias al basto inventario que proporciona IMECA.

De tal modo, este modelo podría aplicarse a cualquier rama de la ingeniería, así como de otras ciencias. Afortunadamente en México existen numerosas dependencias de todo tipo, que cuentan con un gran inventario de monitoreo, por lo que el campo de aplicación es vasto, aunque, en algunos inventarios existe la cadencia de datos, existen métodos para remediar tal problema.

Particularmente se logró apreciar que la ZMVM se encuentra en una crisis ambiental con base en los pronósticos que se obtuvieron para el año 2023, con esto se justifica que es urgente la implementación de medidas que, si sean congruentes para mitigar el daño ocasionado, partiendo de toda la investigación realizada se puede redactar lo siguiente:

Recomendaciones

- Promover más campañas de educación ambiental en todos los rangos de edad.
- Utilizar productos que contengan una menor cantidad de compuestos orgánicos volátiles.
- Reparar fugas, principalmente de agua, drenaje y gas LP.
- Si se adquieren nuevos electrodomésticos, procurar que sean ahorradores de energía.



- Solo utilizar los recursos naturales y combustibles que sean necesarios, invertir en un sistema de energía solar, pues será muy beneficioso para el medio ambiente, al igual que representara un ahorro económico muy fuerte.
- Modificar hábitos propios de consumo, al disminuir la compra de materias primas, como plásticos o materiales que no sean reciclables.
- Con el propósito de obtener resultados más precisos en términos de probabilidad, se recomienda la integración de medición de valores atmosféricos para cada estación de monitoreo en el inventario de emisiones de IMECA, como son: temperatura, presión atmosférica, velocidad de viento, etc. Este aspecto se consideró al momento de hacer la investigación, solo que si se integraran sería un trabajo sumamente laborioso en cuestión de hacer compatibles los registros de cada uno.
- Promover el reciclaje, no solo local, sino también a otros sectores de la industria, como, por ejemplo: construcción, siderúrgica, textil, etc.
- Incentivar y obligar a que se cumplan todas las normas ya propuestas, de no ser así que se imponga un castigo, “Reforzar el sistema de inspección”, sobre todo en empresas que sean altos consumidores de recursos naturales.
- Debido a que Compuestos orgánicos volátiles “principal precursor de ozono” se forman por la quema de combustibles y el uso de disolventes, se debe exigir a las empresas que originan productos que ayudan en la generación de COV, la implementación de modelos que sean menos contaminantes (fuentes de energía a nivel industrial, sector automotriz, motores, productos de hogar, etc.).
- Si se implementaran las medidas propuestas es cierto que el cambio no se vería de un día a otro, al obtener los pronósticos correspondientes servirán para acomodar actividades al aire libre que sean de considerable aglomeración en las mañanas o tardes, con base en que los niveles más altos de contaminación por ozono se presentan a medio día.



- Un plan de acción a largo plazo en el que no tenga contemplado ser logro de un periodo de gobierno, debido a que representara un tiempo considerable y una inversión muy fuerte sustituir todos los medios de transporte y regulación de la industria que son altamente contaminantes por transporte que sea más híbrido e industrias más limpias energéticamente, con lo que se buscara disminuir el uso de combustibles fósiles.
- Para días en los que se presenten elevadas concentraciones de ozono es indispensable diseñar un plan de acción a corto plazo para salvaguardar a la población que es más propensa a la contaminación del aire.
- Crear un lazo únicamente con países que tengan la misma problemática ambiental, debido a que existe la misma inquietud y urgencia a comparación de tratados en los que hay presencia de países que en su territorio no se manifiesta de la misma manera y, por ende, no le ponen la atención que se merece, así solo se podrá tener un diálogo quizá un poco más cerrado, pero más efectivo, con información libre para todo el mundo.
- La solución que más ayudaría al planeta es sin duda, un control de natalidad, principalmente en países en vías de desarrollo, explícitamente en México no cuenta con ninguna ley que controle cuantos hijos se puede tener por hogar, sería una medida extremadamente eficaz.

Todas estas recomendaciones no solo ayudaran a reducir los niveles de ozono, si no también contaminantes secundarios del aire y por ende ayudara a combatir el calentamiento global. Como país que atraviesa una emergencia de esta magnitud es indispensable crear más campos de estudio para este delicado tema, no hay que esperar a que otros países propongan soluciones, pues en ellos no se vive una necesidad como en nuestra comunidad. El cuidado al planeta es un tema muy polémico y multidisciplinario, elogiado y criticado por muchos, lastimosamente no todos comparten las mismas expectativas porque en su lugar de residencia no se manifiesta tanto como en otras regiones donde si es un peligro, la clave para el cambio es hacer conciencia social.



ANEXOS

Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
01/01/2018	92	09/02/2018	34	20/03/2018	135	28/04/2018	126
02/01/2018	53	10/02/2018	46	21/03/2018	112	29/04/2018	126
03/01/2018	96	11/02/2018	41	22/03/2018	98	30/04/2018	101
04/01/2018	105	12/02/2018	96	23/03/2018	69	01/05/2018	82
05/01/2018	102	13/02/2018	100	24/03/2018	47	02/05/2018	48
06/01/2018	82	14/02/2018	92	25/03/2018	100	03/05/2018	124
07/01/2018	96	15/02/2018	109	26/03/2018	115	04/05/2018	175
08/01/2018	50	16/02/2018	116	27/03/2018	111	05/05/2018	55
09/01/2018	53	17/02/2018	90	28/03/2018	49	06/05/2018	78
10/01/2018	109	18/02/2018	109	29/03/2018	90	07/05/2018	55
11/01/2018	118	19/02/2018	94	30/03/2018	94	08/05/2018	24
12/01/2018	96	20/02/2018	86	31/03/2018	71	09/05/2018	100
13/01/2018	49	21/02/2018	128	01/04/2018	88	10/05/2018	124
14/01/2018	50	22/02/2018	121	02/04/2018	121	11/05/2018	138
15/01/2018	55	23/02/2018	121	03/04/2018	113	12/05/2018	131
16/01/2018	71	24/02/2018	130	04/04/2018	127	13/05/2018	128
17/01/2018	94	25/02/2018	110	05/04/2018	111	14/05/2018	106
18/01/2018	104	26/02/2018	96	06/04/2018	101	15/05/2018	114
19/01/2018	98	27/02/2018	120	07/04/2018	121	16/05/2018	112
20/01/2018	69	28/02/2018	131	08/04/2018	76	17/05/2018	82
21/01/2018	71	01/03/2018	102	09/04/2018	102	18/05/2018	108
22/01/2018	86	02/03/2018	126	10/04/2018	107	19/05/2018	131
23/01/2018	105	03/03/2018	88	11/04/2018	110	20/05/2018	115
24/01/2018	65	04/03/2018	102	12/04/2018	105	21/05/2018	112
25/01/2018	44	05/03/2018	116	13/04/2018	86	22/05/2018	105
26/01/2018	50	06/03/2018	105	14/04/2018	78	23/05/2018	128
27/01/2018	92	07/03/2018	111	15/04/2018	100	24/05/2018	115
28/01/2018	21	08/03/2018	112	16/04/2018	114	25/05/2018	51
29/01/2018	25	09/03/2018	94	17/04/2018	120	26/05/2018	90
30/01/2018	33	10/03/2018	126	18/04/2018	101	27/05/2018	98
31/01/2018	41	11/03/2018	126	19/04/2018	88	28/05/2018	78
01/02/2018	47	12/03/2018	110	20/04/2018	126	29/05/2018	55
02/02/2018	78	13/03/2018	101	21/04/2018	111	30/05/2018	71
03/02/2018	96	14/03/2018	126	22/04/2018	136	31/05/2018	53
04/02/2018	111	15/03/2018	101	23/04/2018	126	01/06/2018	111
05/02/2018	98	16/03/2018	86	24/04/2018	102	02/06/2018	63
06/02/2018	104	17/03/2018	104	25/04/2018	106	03/06/2018	36
07/02/2018	88	18/03/2018	101	26/04/2018	103	04/06/2018	57
08/02/2018	80	19/03/2018	107	27/04/2018	138	05/06/2018	141

Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
06/06/2018	147	15/07/2018	104	23/08/2018	92	01/10/2018	43
07/06/2018	143	16/07/2018	106	24/08/2018	98	02/10/2018	41
08/06/2018	86	17/07/2018	73	25/08/2018	86	03/10/2018	32
09/06/2018	82	18/07/2018	96	26/08/2018	67	04/10/2018	49
10/06/2018	116	19/07/2018	76	27/08/2018	84	05/10/2018	104
11/06/2018	107	20/07/2018	88	28/08/2018	63	06/10/2018	105
12/06/2018	48	21/07/2018	48	29/08/2018	86	07/10/2018	71
13/06/2018	36	22/07/2018	115	30/08/2018	69	08/10/2018	88
14/06/2018	41	23/07/2018	116	31/08/2018	111	09/10/2018	86
15/06/2018	104	24/07/2018	98	01/09/2018	108	10/10/2018	109
16/06/2018	80	25/07/2018	80	02/09/2018	130	11/10/2018	104
17/06/2018	47	26/07/2018	126	03/09/2018	120	12/10/2018	73
18/06/2018	23	27/07/2018	104	04/09/2018	96	13/10/2018	50
19/06/2018	76	28/07/2018	105	05/09/2018	96	14/10/2018	47
20/06/2018	46	29/07/2018	86	06/09/2018	43	15/10/2018	51
21/06/2018	37	30/07/2018	98	07/09/2018	105	16/10/2018	90
22/06/2018	46	31/07/2018	110	08/09/2018	116	17/10/2018	17
23/06/2018	105	01/08/2018	46	09/09/2018	112	18/10/2018	19
24/06/2018	96	02/08/2018	41	10/09/2018	94	19/10/2018	34
25/06/2018	80	03/08/2018	53	11/09/2018	49	20/10/2018	37
26/06/2018	110	04/08/2018	41	12/09/2018	127	21/10/2018	16
27/06/2018	117	05/08/2018	100	13/09/2018	98	22/10/2018	40
28/06/2018	84	06/08/2018	67	14/09/2018	82	23/10/2018	34
29/06/2018	92	07/08/2018	106	15/09/2018	47	24/10/2018	123
30/06/2018	109	08/08/2018	109	16/09/2018	67	25/10/2018	131
01/07/2018	110	09/08/2018	84	17/09/2018	67	26/10/2018	115
02/07/2018	82	10/08/2018	108	18/09/2018	112	27/10/2018	48
03/07/2018	67	11/08/2018	112	19/09/2018	96	28/10/2018	40
04/07/2018	109	12/08/2018	46	20/09/2018	111	29/10/2018	65
05/07/2018	39	13/08/2018	104	21/09/2018	92	30/10/2018	78
06/07/2018	34	14/08/2018	114	22/09/2018	84	31/10/2018	73
07/07/2018	69	15/08/2018	86	23/09/2018	61	01/11/2018	50
08/07/2018	82	16/08/2018	110	24/09/2018	101	02/11/2018	39
09/07/2018	102	17/08/2018	123	25/09/2018	98	03/11/2018	37
10/07/2018	82	18/08/2018	108	26/09/2018	76	04/11/2018	25
11/07/2018	82	19/08/2018	119	27/09/2018	76	05/11/2018	31
12/07/2018	82	20/08/2018	65	28/09/2018	78	06/11/2018	101
13/07/2018	105	21/08/2018	42	29/09/2018	90	07/11/2018	90
14/07/2018	106	22/08/2018	65	30/09/2018	100	08/11/2018	73



Índice de calidad del aire máximos diarios

Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
09/11/2018	57	18/12/2018	117	26/01/2019	46	06/03/2019	82
10/11/2018	107	19/12/2018	39	27/01/2019	49	07/03/2019	101
11/11/2018	112	20/12/2018	41	28/01/2019	61	08/03/2019	94
12/11/2018	48	21/12/2018	69	29/01/2019	94	09/03/2019	120
13/11/2018	33	22/12/2018	98	30/01/2019	51	10/03/2019	109
14/11/2018	3	23/12/2018	115	31/01/2019	40	11/03/2019	112
15/11/2018	57	24/12/2018	94	01/02/2019	80	12/03/2019	55
16/11/2018	101	25/12/2018	122	02/02/2019	115	13/03/2019	118
17/11/2018	109	26/12/2018	59	03/02/2019	120	14/03/2019	114
18/11/2018	110	27/12/2018	40	04/02/2019	106	15/03/2019	105
19/11/2018	94	28/12/2018	41	05/02/2019	117	16/03/2019	57
20/11/2018	105	29/12/2018	67	06/02/2019	124	17/03/2019	106
21/11/2018	92	30/12/2018	34	07/02/2019	116	18/03/2019	55
22/11/2018	104	31/12/2018	42	08/02/2019	32	19/03/2019	57
23/11/2018	134	01/01/2019	117	09/02/2019	90	20/03/2019	101
24/11/2018	129	02/01/2019	59	10/02/2019	73	21/03/2019	84
25/11/2018	42	03/01/2019	73	11/02/2019	105	22/03/2019	53
26/11/2018	50	04/01/2019	106	12/02/2019	50	23/03/2019	90
27/11/2018	47	05/01/2019	113	13/02/2019	82	24/03/2019	118
28/11/2018	23	06/01/2019	88	14/02/2019	90	25/03/2019	49
29/11/2018	22	07/01/2019	67	15/02/2019	116	26/03/2019	46
30/11/2018	15	08/01/2019	67	16/02/2019	109	27/03/2019	44
01/12/2018	43	09/01/2019	61	17/02/2019	76	28/03/2019	61
02/12/2018	82	10/01/2019	78	18/02/2019	46	29/03/2019	104
03/12/2018	109	11/01/2019	104	19/02/2019	36	30/03/2019	137
04/12/2018	114	12/01/2019	67	20/02/2019	28	31/03/2019	114
05/12/2018	32	13/01/2019	49	21/02/2019	26	01/04/2019	82
06/12/2018	90	14/01/2019	44	22/02/2019	36	02/04/2019	101
07/12/2018	39	15/01/2019	92	23/02/2019	57	03/04/2019	53
08/12/2018	46	16/01/2019	78	24/02/2019	78	04/04/2019	126
09/12/2018	76	17/01/2019	49	25/02/2019	88	05/04/2019	69
10/12/2018	51	18/01/2019	80	26/02/2019	49	06/04/2019	100
11/12/2018	48	19/01/2019	78	27/02/2019	53	07/04/2019	71
12/12/2018	86	20/01/2019	48	28/02/2019	88	08/04/2019	116
13/12/2018	32	21/01/2019	65	01/03/2019	112	09/04/2019	65
14/12/2018	55	22/01/2019	57	02/03/2019	115	10/04/2019	151
15/12/2018	84	23/01/2019	76	03/03/2019	124	11/04/2019	110
16/12/2018	105	24/01/2019	37	04/03/2019	101	12/04/2019	80
17/12/2018	105	25/01/2019	45	05/03/2019	112	13/04/2019	90



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
14/04/2019	140	23/05/2019	122	01/07/2019	45	09/08/2019	107
15/04/2019	137	24/05/2019	114	02/07/2019	50	10/08/2019	28
16/04/2019	136	25/05/2019	109	03/07/2019	67	11/08/2019	105
17/04/2019	142	26/05/2019	84	04/07/2019	86	12/08/2019	63
18/04/2019	104	27/05/2019	121	05/07/2019	115	13/08/2019	88
19/04/2019	116	28/05/2019	111	06/07/2019	49	14/08/2019	55
20/04/2019	116	29/05/2019	130	07/07/2019	110	15/08/2019	116
21/04/2019	107	30/05/2019	119	08/07/2019	96	16/08/2019	88
22/04/2019	119	31/05/2019	73	09/07/2019	120	17/08/2019	125
23/04/2019	115	01/06/2019	47	10/07/2019	53	18/08/2019	110
24/04/2019	71	02/06/2019	28	11/07/2019	61	19/08/2019	31
25/04/2019	112	03/06/2019	27	12/07/2019	92	20/08/2019	78
26/04/2019	122	04/06/2019	42	13/07/2019	113	21/08/2019	69
27/04/2019	118	05/06/2019	49	14/07/2019	106	22/08/2019	96
28/04/2019	131	06/06/2019	123	15/07/2019	104	23/08/2019	113
29/04/2019	121	07/06/2019	120	16/07/2019	82	24/08/2019	129
30/04/2019	117	08/06/2019	113	17/07/2019	36	25/08/2019	114
01/05/2019	103	09/06/2019	102	18/07/2019	82	26/08/2019	109
02/05/2019	76	10/06/2019	46	19/07/2019	86	27/08/2019	105
03/05/2019	113	11/06/2019	44	20/07/2019	120	28/08/2019	90
04/05/2019	98	12/06/2019	94	21/07/2019	61	29/08/2019	108
05/05/2019	98	13/06/2019	45	22/07/2019	86	30/08/2019	109
06/05/2019	55	14/06/2019	106	23/07/2019	69	31/08/2019	82
07/05/2019	67	15/06/2019	120	24/07/2019	71	01/09/2019	115
08/05/2019	51	16/06/2019	124	25/07/2019	44	02/09/2019	53
09/05/2019	44	17/06/2019	101	26/07/2019	44	03/09/2019	63
10/05/2019	104	18/06/2019	115	27/07/2019	105	04/09/2019	67
11/05/2019	121	19/06/2019	109	28/07/2019	76	05/09/2019	100
12/05/2019	117	20/06/2019	137	29/07/2019	67	06/09/2019	102
13/05/2019	128	21/06/2019	80	30/07/2019	88	07/09/2019	96
14/05/2019	123	22/06/2019	107	31/07/2019	101	08/09/2019	111
15/05/2019	120	23/06/2019	104	01/08/2019	92	09/09/2019	84
16/05/2019	134	24/06/2019	37	02/08/2019	135	10/09/2019	80
17/05/2019	106	25/06/2019	46	03/08/2019	123	11/09/2019	86
18/05/2019	100	26/06/2019	117	04/08/2019	100	12/09/2019	55
19/05/2019	90	27/06/2019	48	05/08/2019	84	13/09/2019	26
20/05/2019	119	28/06/2019	57	06/08/2019	76	14/09/2019	31
21/05/2019	132	29/06/2019	65	07/08/2019	51	15/09/2019	107
22/05/2019	119	30/06/2019	80	08/08/2019	100	16/09/2019	102



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
17/09/2019	108	26/10/2019	57	04/12/2019	92	12/01/2020	53
18/09/2019	33	27/10/2019	110	05/12/2019	104	13/01/2020	96
19/09/2019	53	28/10/2019	102	06/12/2019	36	14/01/2020	61
20/09/2019	124	29/10/2019	88	07/12/2019	67	15/01/2020	80
21/09/2019	96	30/10/2019	107	08/12/2019	102	16/01/2020	88
22/09/2019	104	31/10/2019	26	09/12/2019	102	17/01/2020	53
23/09/2019	111	01/11/2019	73	10/12/2019	88	18/01/2020	59
24/09/2019	113	02/11/2019	24	11/12/2019	100	19/01/2020	18
25/09/2019	109	03/11/2019	47	12/12/2019	92	20/01/2020	17
26/09/2019	109	04/11/2019	63	13/12/2019	41	21/01/2020	44
27/09/2019	90	05/11/2019	57	14/12/2019	69	22/01/2020	96
28/09/2019	84	06/11/2019	50	15/12/2019	109	23/01/2020	26
29/09/2019	14	07/11/2019	44	16/12/2019	82	24/01/2020	33
30/09/2019	39	08/11/2019	42	17/12/2019	63	25/01/2020	37
01/10/2019	51	09/11/2019	39	18/12/2019	41	26/01/2020	41
02/10/2019	80	10/11/2019	67	19/12/2019	109	27/01/2020	39
03/10/2019	67	11/11/2019	61	20/12/2019	36	28/01/2020	44
04/10/2019	115	12/11/2019	76	21/12/2019	47	29/01/2020	41
05/10/2019	80	13/11/2019	26	22/12/2019	19	30/01/2020	26
06/10/2019	105	14/11/2019	44	23/12/2019	71	31/01/2020	45
07/10/2019	37	15/11/2019	53	24/12/2019	34	01/02/2020	46
08/10/2019	21	16/11/2019	46	25/12/2019	80	02/02/2020	46
09/10/2019	71	17/11/2019	82	26/12/2019	65	03/02/2020	27
10/10/2019	44	18/11/2019	80	27/12/2019	108	04/02/2020	20
11/10/2019	46	19/11/2019	67	28/12/2019	41	05/02/2020	14
12/10/2019	55	20/11/2019	69	29/12/2019	34	06/02/2020	34
13/10/2019	82	21/11/2019	49	30/12/2019	30	07/02/2020	46
14/10/2019	46	22/11/2019	76	31/12/2019	45	08/02/2020	78
15/10/2019	90	23/11/2019	106	01/01/2020	26	09/02/2020	94
16/10/2019	16	24/11/2019	84	02/01/2020	16	10/02/2020	100
17/10/2019	11	25/11/2019	104	03/01/2020	38	11/02/2020	112
18/10/2019	44	26/11/2019	51	04/01/2020	57	12/02/2020	53
19/10/2019	42	27/11/2019	78	05/01/2020	67	13/02/2020	104
20/10/2019	20	28/11/2019	49	06/01/2020	102	14/02/2020	109
21/10/2019	55	29/11/2019	80	07/01/2020	45	15/02/2020	115
22/10/2019	29	30/11/2019	71	08/01/2020	73	16/02/2020	53
23/10/2019	46	01/12/2019	46	09/01/2020	73	17/02/2020	88
24/10/2019	50	02/12/2019	78	10/01/2020	40	18/02/2020	96
25/10/2019	41	03/12/2019	44	11/01/2020	76	19/02/2020	109



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
20/02/2020	49	30/03/2020	134	08/05/2020	104	16/06/2020	122
21/02/2020	117	31/03/2020	61	09/05/2020	105	17/06/2020	119
22/02/2020	120	01/04/2020	109	10/05/2020	109	18/06/2020	92
23/02/2020	122	02/04/2020	114	11/05/2020	113	19/06/2020	119
24/02/2020	71	03/04/2020	106	12/05/2020	116	20/06/2020	101
25/02/2020	36	04/04/2020	122	13/05/2020	102	21/06/2020	107
26/02/2020	101	05/04/2020	103	14/05/2020	119	22/06/2020	88
27/02/2020	80	06/04/2020	111	15/05/2020	100	23/06/2020	100
28/02/2020	124	07/04/2020	101	16/05/2020	61	24/06/2020	44
29/02/2020	109	08/04/2020	110	17/05/2020	103	25/06/2020	29
01/03/2020	101	09/04/2020	120	18/05/2020	117	26/06/2020	65
02/03/2020	78	10/04/2020	105	19/05/2020	120	27/06/2020	104
03/03/2020	32	11/04/2020	86	20/05/2020	114	28/06/2020	90
04/03/2020	69	12/04/2020	42	21/05/2020	136	29/06/2020	71
05/03/2020	124	13/04/2020	118	22/05/2020	121	30/06/2020	118
06/03/2020	73	14/04/2020	57	23/05/2020	116	01/07/2020	82
07/03/2020	107	15/04/2020	121	24/05/2020	107	02/07/2020	107
08/03/2020	106	16/04/2020	118	25/05/2020	109	03/07/2020	69
09/03/2020	102	17/04/2020	136	26/05/2020	120	04/07/2020	105
10/03/2020	129	18/04/2020	147	27/05/2020	144	05/07/2020	110
11/03/2020	65	19/04/2020	126	28/05/2020	117	06/07/2020	109
12/03/2020	120	20/04/2020	110	29/05/2020	80	07/07/2020	46
13/03/2020	94	21/04/2020	120	30/05/2020	51	08/07/2020	32
14/03/2020	106	22/04/2020	123	31/05/2020	104	09/07/2020	96
15/03/2020	109	23/04/2020	113	01/06/2020	92	10/07/2020	102
16/03/2020	71	24/04/2020	109	02/06/2020	86	11/07/2020	67
17/03/2020	110	25/04/2020	101	03/06/2020	24	12/07/2020	63
18/03/2020	110	26/04/2020	84	04/06/2020	45	13/07/2020	88
19/03/2020	117	27/04/2020	103	05/06/2020	61	14/07/2020	120
20/03/2020	76	28/04/2020	101	06/06/2020	88	15/07/2020	94
21/03/2020	104	29/04/2020	116	07/06/2020	76	16/07/2020	108
22/03/2020	114	30/04/2020	114	08/06/2020	104	17/07/2020	94
23/03/2020	94	01/05/2020	108	09/06/2020	127	18/07/2020	84
24/03/2020	96	02/05/2020	101	10/06/2020	57	19/07/2020	63
25/03/2020	124	03/05/2020	101	11/06/2020	46	20/07/2020	126
26/03/2020	84	04/05/2020	71	12/06/2020	37	21/07/2020	107
27/03/2020	69	05/05/2020	98	13/06/2020	98	22/07/2020	107
28/03/2020	118	06/05/2020	120	14/06/2020	105	23/07/2020	125
29/03/2020	123	07/05/2020	76	15/06/2020	105	24/07/2020	124

Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
25/07/2020	119	02/09/2020	90	11/10/2020	101	19/11/2020	45
26/07/2020	50	03/09/2020	40	12/10/2020	67	20/11/2020	26
27/07/2020	49	04/09/2020	24	13/10/2020	51	21/11/2020	24
28/07/2020	36	05/09/2020	19	14/10/2020	53	22/11/2020	44
29/07/2020	39	06/09/2020	29	15/10/2020	49	23/11/2020	46
30/07/2020	108	07/09/2020	37	16/10/2020	28	24/11/2020	53
31/07/2020	47	08/09/2020	103	17/10/2020	92	25/11/2020	98
01/08/2020	49	09/09/2020	44	18/10/2020	103	26/11/2020	67
02/08/2020	53	10/09/2020	50	19/10/2020	67	27/11/2020	49
03/08/2020	88	11/09/2020	43	20/10/2020	80	28/11/2020	92
04/08/2020	92	12/09/2020	98	21/10/2020	80	29/11/2020	130
05/08/2020	98	13/09/2020	42	22/10/2020	44	30/11/2020	50
06/08/2020	90	14/09/2020	32	23/10/2020	42	01/12/2020	50
07/08/2020	43	15/09/2020	63	24/10/2020	48	02/12/2020	44
08/08/2020	34	16/09/2020	44	25/10/2020	71	03/12/2020	39
09/08/2020	69	17/09/2020	35	26/10/2020	104	04/12/2020	29
10/08/2020	53	18/09/2020	19	27/10/2020	129	05/12/2020	26
11/08/2020	98	19/09/2020	19	28/10/2020	135	06/12/2020	41
12/08/2020	51	20/09/2020	106	29/10/2020	90	07/12/2020	32
13/08/2020	94	21/09/2020	98	30/10/2020	82	08/12/2020	48
14/08/2020	108	22/09/2020	107	31/10/2020	98	09/12/2020	46
15/08/2020	78	23/09/2020	109	01/11/2020	32	10/12/2020	88
16/08/2020	65	24/09/2020	86	02/11/2020	36	11/12/2020	101
17/08/2020	55	25/09/2020	43	03/11/2020	51	12/12/2020	80
18/08/2020	65	26/09/2020	82	04/11/2020	49	13/12/2020	45
19/08/2020	102	27/09/2020	92	05/11/2020	73	14/12/2020	46
20/08/2020	82	28/09/2020	55	06/11/2020	112	15/12/2020	41
21/08/2020	104	29/09/2020	21	07/11/2020	119	16/12/2020	59
22/08/2020	90	30/09/2020	115	08/11/2020	126	17/12/2020	57
23/08/2020	73	01/10/2020	46	09/11/2020	105	18/12/2020	90
24/08/2020	47	02/10/2020	49	10/11/2020	104	19/12/2020	92
25/08/2020	19	03/10/2020	103	11/11/2020	142	20/12/2020	92
26/08/2020	47	04/10/2020	44	12/11/2020	134	21/12/2020	78
27/08/2020	46	05/10/2020	80	13/11/2020	100	22/12/2020	78
28/08/2020	110	06/10/2020	71	14/11/2020	115	23/12/2020	94
29/08/2020	80	07/10/2020	114	15/11/2020	53	24/12/2020	103
30/08/2020	24	08/10/2020	110	16/11/2020	37	25/12/2020	101
31/08/2020	94	09/10/2020	120	17/11/2020	21	26/12/2020	55
01/09/2020	103	10/10/2020	96	18/11/2020	20	27/12/2020	46



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
28/12/2020	80	05/02/2021	112	16/03/2021	88	24/04/2021	144
29/12/2020	90	06/02/2021	73	17/03/2021	105	25/04/2021	122
30/12/2020	76	07/02/2021	92	18/03/2021	104	26/04/2021	142
31/12/2020	34	08/02/2021	47	19/03/2021	105	27/04/2021	129
01/01/2021	55	09/02/2021	94	20/03/2021	84	28/04/2021	133
02/01/2021	88	10/02/2021	101	21/03/2021	109	29/04/2021	123
03/01/2021	51	11/02/2021	28	22/03/2021	55	30/04/2021	120
04/01/2021	92	12/02/2021	27	23/03/2021	69	01/05/2021	102
05/01/2021	96	13/02/2021	32	24/03/2021	76	02/05/2021	107
06/01/2021	46	14/02/2021	47	25/03/2021	92	03/05/2021	65
07/01/2021	55	15/02/2021	49	26/03/2021	103	04/05/2021	103
08/01/2021	84	16/02/2021	46	27/03/2021	129	05/05/2021	117
09/01/2021	45	17/02/2021	50	28/03/2021	106	06/05/2021	82
10/01/2021	29	18/02/2021	103	29/03/2021	112	07/05/2021	82
11/01/2021	22	19/02/2021	108	30/03/2021	100	08/05/2021	105
12/01/2021	34	20/02/2021	103	31/03/2021	67	09/05/2021	116
13/01/2021	41	21/02/2021	136	01/04/2021	32	10/05/2021	138
14/01/2021	30	22/02/2021	104	02/04/2021	37	11/05/2021	104
15/01/2021	69	23/02/2021	94	03/04/2021	49	12/05/2021	128
16/01/2021	46	24/02/2021	51	04/04/2021	98	13/05/2021	31
17/01/2021	25	25/02/2021	128	05/04/2021	71	14/05/2021	45
18/01/2021	71	26/02/2021	131	06/04/2021	76	15/05/2021	82
19/01/2021	82	27/02/2021	142	07/04/2021	71	16/05/2021	104
20/01/2021	55	28/02/2021	131	08/04/2021	126	17/05/2021	114
21/01/2021	76	01/03/2021	135	09/04/2021	133	18/05/2021	98
22/01/2021	78	02/03/2021	131	10/04/2021	120	19/05/2021	98
23/01/2021	106	03/03/2021	109	11/04/2021	119	20/05/2021	127
24/01/2021	67	04/03/2021	109	12/04/2021	103	21/05/2021	109
25/01/2021	69	05/03/2021	86	13/04/2021	117	22/05/2021	113
26/01/2021	98	06/03/2021	130	14/04/2021	131	23/05/2021	109
27/01/2021	44	07/03/2021	69	15/04/2021	132	24/05/2021	104
28/01/2021	47	08/03/2021	73	16/04/2021	135	25/05/2021	110
29/01/2021	113	09/03/2021	46	17/04/2021	114	26/05/2021	129
30/01/2021	84	10/03/2021	36	18/04/2021	86	27/05/2021	124
31/01/2021	49	11/03/2021	88	19/04/2021	67	28/05/2021	150
01/02/2021	46	12/03/2021	112	20/04/2021	94	29/05/2021	123
02/02/2021	39	13/03/2021	109	21/04/2021	126	30/05/2021	107
03/02/2021	41	14/03/2021	109	22/04/2021	139	31/05/2021	114
04/02/2021	104	15/03/2021	104	23/04/2021	128	01/06/2021	123



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
02/06/2021	80	11/07/2021	115	19/08/2021	80	27/09/2021	73
03/06/2021	104	12/07/2021	102	20/08/2021	41	28/09/2021	109
04/06/2021	44	13/07/2021	49	21/08/2021	27	29/09/2021	136
05/06/2021	63	14/07/2021	102	22/08/2021	49	30/09/2021	55
06/06/2021	109	15/07/2021	44	23/08/2021	44	01/10/2021	47
07/06/2021	80	16/07/2021	47	24/08/2021	38	02/10/2021	129
08/06/2021	145	17/07/2021	69	25/08/2021	30	03/10/2021	102
09/06/2021	134	18/07/2021	82	26/08/2021	71	04/10/2021	41
10/06/2021	51	19/07/2021	92	27/08/2021	44	05/10/2021	36
11/06/2021	50	20/07/2021	121	28/08/2021	19	06/10/2021	31
12/06/2021	46	21/07/2021	92	29/08/2021	47	07/10/2021	115
13/06/2021	76	22/07/2021	63	30/08/2021	48	08/10/2021	46
14/06/2021	29	23/07/2021	118	31/08/2021	53	09/10/2021	112
15/06/2021	40	24/07/2021	140	01/09/2021	34	10/10/2021	61
16/06/2021	57	25/07/2021	117	02/09/2021	32	11/10/2021	116
17/06/2021	39	26/07/2021	92	03/09/2021	46	12/10/2021	109
18/06/2021	36	27/07/2021	115	04/09/2021	110	13/10/2021	96
19/06/2021	14	28/07/2021	110	05/09/2021	73	14/10/2021	109
20/06/2021	47	29/07/2021	84	06/09/2021	76	15/10/2021	69
21/06/2021	127	30/07/2021	39	07/09/2021	96	16/10/2021	31
22/06/2021	134	31/07/2021	116	08/09/2021	88	17/10/2021	28
23/06/2021	57	01/08/2021	105	09/09/2021	57	18/10/2021	53
24/06/2021	100	02/08/2021	101	10/09/2021	57	19/10/2021	104
25/06/2021	28	03/08/2021	65	11/09/2021	69	20/10/2021	96
26/06/2021	26	04/08/2021	115	12/09/2021	36	21/10/2021	35
27/06/2021	16	05/08/2021	106	13/09/2021	21	22/10/2021	24
28/06/2021	33	06/08/2021	59	14/09/2021	26	23/10/2021	86
29/06/2021	50	07/08/2021	114	15/09/2021	109	24/10/2021	49
30/06/2021	86	08/08/2021	84	16/09/2021	111	25/10/2021	25
01/07/2021	30	09/08/2021	109	17/09/2021	122	26/10/2021	40
02/07/2021	48	10/08/2021	104	18/09/2021	43	27/10/2021	41
03/07/2021	29	11/08/2021	110	19/09/2021	36	28/10/2021	109
04/07/2021	105	12/08/2021	121	20/09/2021	106	29/10/2021	105
05/07/2021	120	13/08/2021	119	21/09/2021	100	30/10/2021	76
06/07/2021	121	14/08/2021	47	22/09/2021	34	31/10/2021	92
07/07/2021	123	15/08/2021	57	23/09/2021	44	01/11/2021	106
08/07/2021	41	16/08/2021	102	24/09/2021	94	02/11/2021	61
09/07/2021	39	17/08/2021	110	25/09/2021	100	03/11/2021	45
10/07/2021	115	18/08/2021	124	26/09/2021	120	04/11/2021	46



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
05/11/2021	53	14/12/2021	67	22/01/2022	46	02/03/2022	109
06/11/2021	49	15/12/2021	104	23/01/2022	106	03/03/2022	131
07/11/2021	100	16/12/2021	115	24/01/2022	39	04/03/2022	63
08/11/2021	104	17/12/2021	73	25/01/2022	40	05/03/2022	49
09/11/2021	96	18/12/2021	78	26/01/2022	63	06/03/2022	107
10/11/2021	120	19/12/2021	96	27/01/2022	104	07/03/2022	102
11/11/2021	69	20/12/2021	36	28/01/2022	101	08/03/2022	35
12/11/2021	69	21/12/2021	101	29/01/2022	110	09/03/2022	38
13/11/2021	44	22/12/2021	63	30/01/2022	96	10/03/2022	46
14/11/2021	76	23/12/2021	48	31/01/2022	33	11/03/2022	73
15/11/2021	46	24/12/2021	57	01/02/2022	36	12/03/2022	116
16/11/2021	63	25/12/2021	53	02/02/2022	65	13/03/2022	121
17/11/2021	120	26/12/2021	53	03/02/2022	46	14/03/2022	120
18/11/2021	101	27/12/2021	73	04/02/2022	40	15/03/2022	111
19/11/2021	23	28/12/2021	108	05/02/2022	59	16/03/2022	90
20/11/2021	65	29/12/2021	59	06/02/2022	94	17/03/2022	73
21/11/2021	84	30/12/2021	113	07/02/2022	55	18/03/2022	76
22/11/2021	39	31/12/2021	142	08/02/2022	43	19/03/2022	57
23/11/2021	41	01/01/2022	125	09/02/2022	48	20/03/2022	100
24/11/2021	43	02/01/2022	48	10/02/2022	39	21/03/2022	76
25/11/2021	86	03/01/2022	80	11/02/2022	36	22/03/2022	73
26/11/2021	90	04/01/2022	98	12/02/2022	34	23/03/2022	63
27/11/2021	112	05/01/2022	106	13/02/2022	57	24/03/2022	123
28/11/2021	114	06/01/2022	100	14/02/2022	90	25/03/2022	131
29/11/2021	71	07/01/2022	41	15/02/2022	90	26/03/2022	111
30/11/2021	86	08/01/2022	67	16/02/2022	63	27/03/2022	115
01/12/2021	39	09/01/2022	61	17/02/2022	119	28/03/2022	114
02/12/2021	40	10/01/2022	42	18/02/2022	126	29/03/2022	153
03/12/2021	46	11/01/2022	29	19/02/2022	115	30/03/2022	102
04/12/2021	43	12/01/2022	44	20/02/2022	109	31/03/2022	104
05/12/2021	109	13/01/2022	44	21/02/2022	94	01/04/2022	103
06/12/2021	96	14/01/2022	55	22/02/2022	117	02/04/2022	139
07/12/2021	71	15/01/2022	38	23/02/2022	69	03/04/2022	117
08/12/2021	117	16/01/2022	101	24/02/2022	82	04/04/2022	115
09/12/2021	127	17/01/2022	46	25/02/2022	120	05/04/2022	78
10/12/2021	127	18/01/2022	51	26/02/2022	105	06/04/2022	148
11/12/2021	113	19/01/2022	100	27/02/2022	76	07/04/2022	139
12/12/2021	78	20/01/2022	76	28/02/2022	51	08/04/2022	122
13/12/2021	76	21/01/2022	32	01/03/2022	59	09/04/2022	126



Índice de calidad del aire máximos diarios							
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
10/04/2022	102	19/05/2022	139	27/06/2022	34	05/08/2022	94
11/04/2022	105	20/05/2022	151	28/06/2022	57	06/08/2022	104
12/04/2022	94	21/05/2022	140	29/06/2022	111	07/08/2022	80
13/04/2022	119	22/05/2022	128	30/06/2022	123	08/08/2022	46
14/04/2022	147	23/05/2022	131	01/07/2022	123	09/08/2022	63
15/04/2022	115	24/05/2022	117	02/07/2022	121	10/08/2022	94
16/04/2022	101	25/05/2022	106	03/07/2022	107	11/08/2022	59
17/04/2022	110	26/05/2022	105	04/07/2022	35	12/08/2022	71
18/04/2022	107	27/05/2022	44	05/07/2022	55	13/08/2022	106
19/04/2022	107	28/05/2022	55	06/07/2022	113	14/08/2022	86
20/04/2022	121	29/05/2022	104	07/07/2022	59	15/08/2022	43
21/04/2022	119	30/05/2022	117	08/07/2022	88	16/08/2022	44
22/04/2022	80	31/05/2022	104	09/07/2022	57	17/08/2022	69
23/04/2022	96	01/06/2022	53	10/07/2022	102	18/08/2022	96
24/04/2022	122	02/06/2022	48	11/07/2022	114	19/08/2022	82
25/04/2022	96	03/06/2022	94	12/07/2022	109	20/08/2022	34
26/04/2022	34	04/06/2022	104	13/07/2022	101	21/08/2022	67
27/04/2022	69	05/06/2022	80	14/07/2022	94	22/08/2022	106
28/04/2022	113	06/06/2022	78	15/07/2022	44	23/08/2022	37
29/04/2022	136	07/06/2022	138	16/07/2022	43	24/08/2022	104
30/04/2022	114	08/06/2022	107	17/07/2022	102	25/08/2022	69
01/05/2022	115	09/06/2022	37	18/07/2022	49	26/08/2022	69
02/05/2022	165	10/06/2022	105	19/07/2022	120	27/08/2022	105
03/05/2022	144	11/06/2022	112	20/07/2022	98	28/08/2022	101
04/05/2022	146	12/06/2022	84	21/07/2022	115	29/08/2022	104
05/05/2022	164	13/06/2022	106	22/07/2022	115	30/08/2022	63
06/05/2022	125	14/06/2022	42	23/07/2022	82	31/08/2022	55
07/05/2022	126	15/06/2022	59	24/07/2022	67	01/09/2022	47
08/05/2022	112	16/06/2022	44	25/07/2022	48	02/09/2022	32
09/05/2022	120	17/06/2022	63	26/07/2022	92	03/09/2022	26
10/05/2022	100	18/06/2022	104	27/07/2022	57	04/09/2022	39
11/05/2022	44	19/06/2022	41	28/07/2022	80	05/09/2022	20
12/05/2022	86	20/06/2022	67	29/07/2022	31	06/09/2022	41
13/05/2022	121	21/06/2022	23	30/07/2022	98	07/09/2022	44
14/05/2022	128	22/06/2022	34	31/07/2022	88	08/09/2022	27
15/05/2022	104	23/06/2022	40	01/08/2022	51	09/09/2022	109
16/05/2022	94	24/06/2022	41	02/08/2022	104	10/09/2022	104
17/05/2022	103	25/06/2022	110	03/08/2022	132	11/09/2022	82
18/05/2022	100	26/06/2022	104	04/08/2022	104	12/09/2022	45



Índice de calidad del aire máximos diarios					
Fecha	CEO3	Fecha	CEO3	Fecha	CEO3
13/09/2022	88	20/10/2022	88	26/11/2022	48
14/09/2022	49	21/10/2022	41	27/11/2022	104
15/09/2022	30	22/10/2022	123	28/11/2022	67
16/09/2022	29	23/10/2022	153	29/11/2022	63
17/09/2022	53	24/10/2022	122	30/11/2022	32
18/09/2022	49	25/10/2022	100	01/12/2022	46
19/09/2022	44	26/10/2022	117	02/12/2022	73
20/09/2022	44	27/10/2022	126	03/12/2022	41
21/09/2022	84	28/10/2022	146	04/12/2022	45
22/09/2022	44	29/10/2022	120	05/12/2022	86
23/09/2022	48	30/10/2022	100	06/12/2022	107
24/09/2022	94	31/10/2022	90	07/12/2022	46
25/09/2022	100	01/11/2022	98	08/12/2022	78
26/09/2022	32	02/11/2022	88	09/12/2022	51
27/09/2022	29	03/11/2022	51	10/12/2022	49
28/09/2022	34	04/11/2022	53	11/12/2022	50
29/09/2022	78	05/11/2022	105	12/12/2022	92
30/09/2022	96	06/11/2022	119	13/12/2022	94
01/10/2022	123	07/11/2022	46	14/12/2022	73
02/10/2022	106	08/11/2022	40	15/12/2022	96
03/10/2022	132	09/11/2022	71	16/12/2022	109
04/10/2022	111	10/11/2022	49	17/12/2022	92
05/10/2022	115	11/11/2022	134	18/12/2022	100
06/10/2022	48	12/11/2022	148	19/12/2022	76
07/10/2022	94	13/11/2022	133	20/12/2022	94
08/10/2022	26	14/11/2022	102	21/12/2022	34
09/10/2022	24	15/11/2022	109	22/12/2022	100
10/10/2022	29	16/11/2022	102	23/12/2022	88
11/10/2022	31	17/11/2022	104	24/12/2022	48
12/10/2022	49	18/11/2022	59	25/12/2022	34
13/10/2022	76	19/11/2022	73	26/12/2022	43
14/10/2022	109	20/11/2022	34	27/12/2022	45
15/10/2022	131	21/11/2022	41	28/12/2022	45
16/10/2022	113	22/11/2022	51	29/12/2022	29
17/10/2022	92	23/11/2022	71	30/12/2022	34
18/10/2022	29	24/11/2022	88	31/12/2022	28
19/10/2022	18	25/11/2022	67		

Tabla A1 Inventario de emisiones de IMECA.

Aplicación de modelo para el mes de enero.

ene-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	5	3	0	0
REGULAR	4	8	4	0
MALA	0	4	2	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow A_1 = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 0 & 0 \\ 4 & 8 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ene-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	4	0	0
REGULAR	5	11	2	0
MALA	0	3	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow A_2 = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 0 & 0 \\ 5 & 11 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ene-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	12	4	0	0
REGULAR	3	9	1	0
MALA	1	0	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow A_3 = \begin{bmatrix} 12 & 4 & 0 & 0 \\ 3 & 9 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ene-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	7	3	1	0
REGULAR	5	11	1	0
MALA	0	2	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow A_4 = \begin{bmatrix} 7 & 3 & 1 & 0 \\ 5 & 11 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ene-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	6	2	0
REGULAR	5	4	2	0
MALA	3	2	2	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow A_5 = \begin{bmatrix} 4 & 6 & 2 & 0 \\ 5 & 4 & 2 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = \begin{bmatrix} 32 & 20 & 3 & 0 \\ 22 & 43 & 10 & 0 \\ 4 & 11 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A \rightarrow \begin{bmatrix} 32 & 20 & 3 & 0 \\ 22 & 43 & 10 & 0 \\ 4 & 11 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 55 \\ \rightarrow \Sigma = 75 \\ \rightarrow \Sigma = 20 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_A = \begin{matrix} & B & R & M & MM \\ \begin{matrix} B \\ R \\ M \\ MM \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5818 & 0.3636 & 0.0545 & 0 \\ 0.2933 & 0.5733 & 0.1333 & 0 \\ 0.2000 & 0.550 & 0.2500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array} \end{matrix}$$

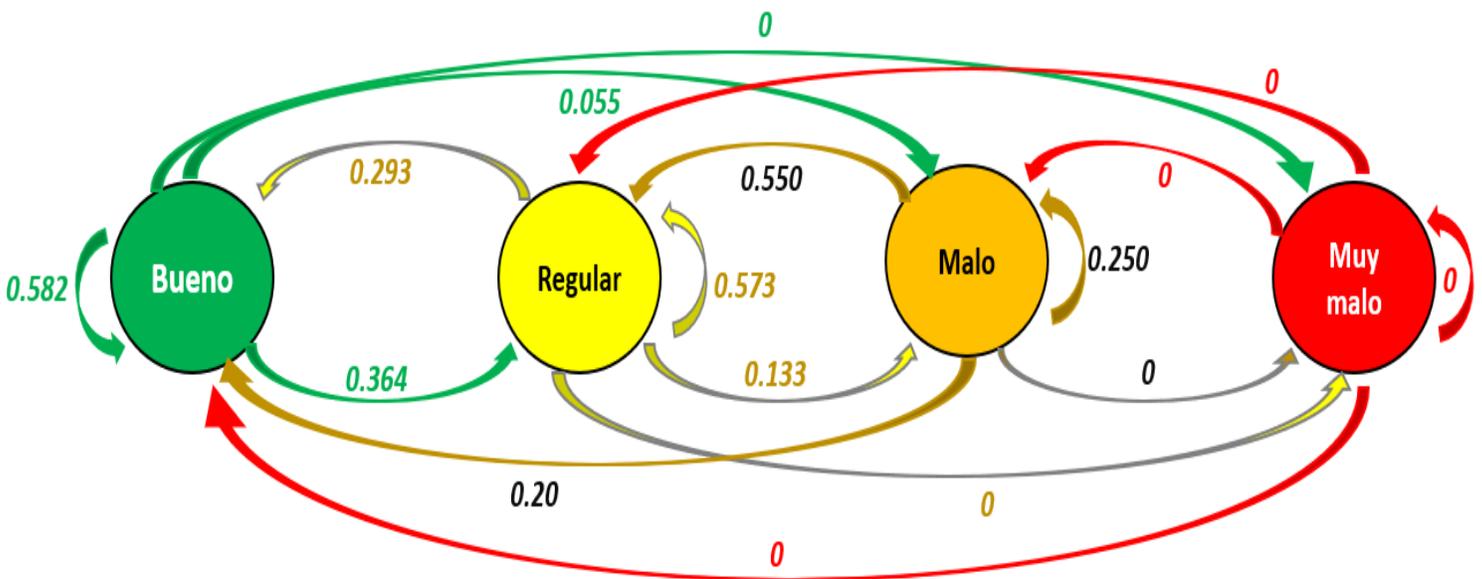


Figura A-2.1. Diagrama de transición para el mes de enero.



1	B	R	M	MM	9	B	R	M	MM
B	0.5818	0.3636	0.0545	0	B	0.397134	0.487351	0.115515	0
R	0.2933	0.5733	0.1333	0	R	0.397100	0.487372	0.115528	0
M	0.2000	0.5500	0.2500	0	M	0.397085	0.487381	0.115534	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
2	B	R	M	MM	10	B	R	M	MM
B	0.456088	0.450055	0.093857	0	B	0.397119	0.487360	0.115521	0
R	0.365511	0.508711	0.125778	0	R	0.397108	0.487367	0.115525	0
M	0.327697	0.525561	0.146742	0	M	0.397103	0.487370	0.115527	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
3	B	R	M	MM	11	B	R	M	MM
B	0.416148	0.475503	0.108349	0	B	0.397114	0.487363	0.115523	0
R	0.387038	0.493752	0.119210	0	R	0.397111	0.487365	0.115524	0
M	0.374173	0.501192	0.124635	0	M	0.397109	0.487366	0.115525	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
4	B	R	M	MM	12	B	R	M	MM
B	0.403273	0.483540	0.113187	0	B	0.397113	0.487364	0.115523	0
R	0.393862	0.489391	0.116747	0	R	0.397112	0.487365	0.115524	0
M	0.389644	0.491962	0.118394	0	M	0.397111	0.487365	0.115524	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.399107	0.486127	0.114765	0	B	0.397112	0.487364	0.115523	0
R	0.396060	0.488018	0.115922	0	R	0.397112	0.487365	0.115524	0
M	0.394690	0.488864	0.116447	0	M	0.397112	0.487365	0.115524	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.397758	0.486964	0.115278	0	B	0.397112	0.487365	0.115523	0
R	0.396771	0.487576	0.115653	0	R	0.397112	0.487365	0.115523	0
M	0.396327	0.487851	0.115822	0	M	0.397112	0.487365	0.115524	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.397321	0.487235	0.115444	0	B	0.397112	0.487365	0.115523	0
R	0.397002	0.487433	0.115565	0	R	0.397112	0.487365	0.115523	0
M	0.396858	0.487522	0.115620	0	M	0.397112	0.487365	0.115523	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.397180	0.487323	0.115498	0	B	0.397112	0.487365	0.115523	0
R	0.397076	0.487387	0.115537	0	R	0.397112	0.487365	0.115523	0
M	0.397030	0.487416	0.115555	0	M	0.397112	0.487365	0.115523	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.1 Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de enero.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Enero	39.7%	48.7%	11.6%	0%

Aplicación de modelo para el mes de febrero.

feb-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	2	0	0
REGULAR	1	5	6	0
MALA	0	5	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow B_1 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

feb-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	4	0	0
REGULAR	2	5	3	0
MALA	2	1	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow B_2 = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 3 & 0 \\ 2 & 1 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

feb-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	6	1	2	0
REGULAR	1	4	4	0
MALA	1	4	5	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow B_3 = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 0 \\ 1 & 4 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

feb-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	8	1	2	0
REGULAR	1	2	2	0
MALA	1	2	8	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow B_4 = \begin{bmatrix} 8 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

feb-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	5	3	0	0
REGULAR	2	7	3	0
MALA	0	3	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow B_5 = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 7 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 = \begin{bmatrix} 25 & 11 & 4 & 0 \\ 7 & 23 & 18 & 0 \\ 4 & 15 & 29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B \rightarrow \begin{bmatrix} 25 & 11 & 4 & 0 \\ 7 & 23 & 18 & 0 \\ 4 & 15 & 29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 40 \\ \rightarrow \Sigma = 48 \\ \rightarrow \Sigma = 48 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_B = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.625 & 0.275 & 0.1 & 0 \\ 0.145 & 0.479 & 0.375 & 0 \\ 0.083 & 0.3125 & 0.604 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

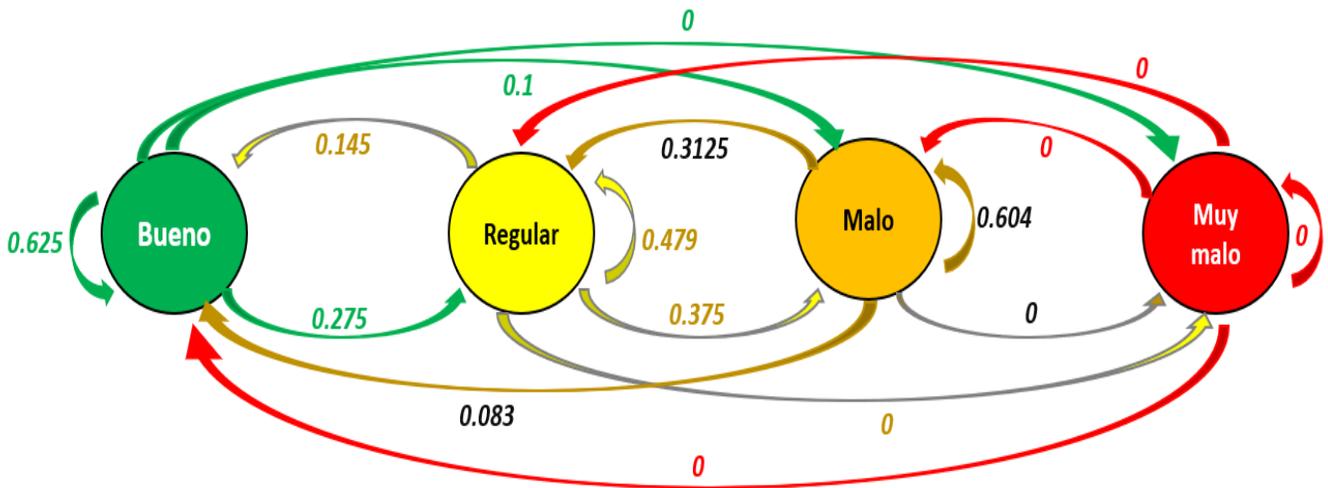


Figura A-2.2. Diagrama de transición para el mes de febrero.

1	B	R	M	MM
B	0.625000	0.275000	0.100000	0
R	0.145833	0.479167	0.375000	0
M	0.083333	0.312500	0.604167	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.234129	0.364317	0.401554	0
R	0.231079	0.364627	0.404294	0
M	0.230456	0.364691	0.404853	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.439063	0.334896	0.226042	0
R	0.192274	0.386892	0.420833	0
M	0.148003	0.361458	0.490538	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.232923	0.364440	0.402637	0
R	0.231290	0.364606	0.404104	0
M	0.230957	0.364640	0.404403	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.3420898	0.3518511	0.3060590	0
R	0.2116627	0.3697718	0.4185655	0
M	0.1860930	0.3671929	0.4467140	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.232277	0.364505	0.403217	0
R	0.231403	0.364594	0.404002	0
M	0.231225	0.364612	0.404163	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.290623	0.358313	0.351064	0
R	0.221095	0.366191	0.412714	0
M	0.207083	0.366720	0.426196	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.231932	0.364540	0.403528	0
R	0.231464	0.364588	0.403948	0
M	0.231369	0.364598	0.404034	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.263149	0.361321	0.375531	0	B	0.231747	0.364559	0.403694	0
R	0.225980	0.365241	0.408779	0	R	0.231496	0.364585	0.403919	0
M	0.218423	0.365854	0.415722	0	M	0.231445	0.364590	0.403965	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.248455	0.362852	0.388693	0	B	0.231648	0.364569	0.403783	0
R	0.228567	0.364899	0.406534	0	R	0.231514	0.364583	0.403903	0
M	0.224512	0.365285	0.410203	0	M	0.231486	0.364586	0.403928	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.240591	0.363658	0.395751	0	B	0.231595	0.364575	0.403830	0
R	0.229946	0.364745	0.405308	0	R	0.231523	0.364582	0.403895	0
M	0.227774	0.364962	0.407264	0	M	0.231508	0.364584	0.403908	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.236382	0.364088	0.399530	0	B	0.231566	0.364578	0.403856	0
R	0.230684	0.364668	0.404648	0	R	0.231528	0.364582	0.403890	0
M	0.229521	0.364785	0.405693	0	M	0.231520	0.364582	0.403897	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.2 Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de febrero.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Febrero	23.2%	36.5%	40.4%	0%

Aplicación de modelo para el mes de marzo.

mar-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	2	0	0
REGULAR	1	3	4	0
MALA	1	4	15	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 4 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

mar-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	1	0	0
REGULAR	0	3	7	0
MALA	1	6	10	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow C_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 0 \\ 1 & 6 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

mar-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	1	0	0
REGULAR	1	2	8	0
MALA	0	9	9	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow C_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 8 & 0 \\ 0 & 9 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

mar-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	1	0	0
REGULAR	1	5	5	0
MALA	0	6	11	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

mar-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	0	1	0
REGULAR	2	7	3	0
MALA	1	2	10	1
MUY MALA	0	0	1	0

$$\rightarrow C_5 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 7 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 1 & 0 \\ 5 & 20 & 27 & 0 \\ 3 & 27 & 55 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C \rightarrow \begin{bmatrix} 5 & 5 & 1 & 0 \\ 5 & 20 & 27 & 0 \\ 3 & 27 & 55 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 11 \\ \rightarrow \Sigma = 52 \\ \rightarrow \Sigma = 86 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

$$P_C = \begin{array}{c} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.454 & 0.454 & 0.090 & 0 \\ 0.096 & 0.384 & 0.519 & 0 \\ 0.034 & 0.314 & 0.639 & 0.0116 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

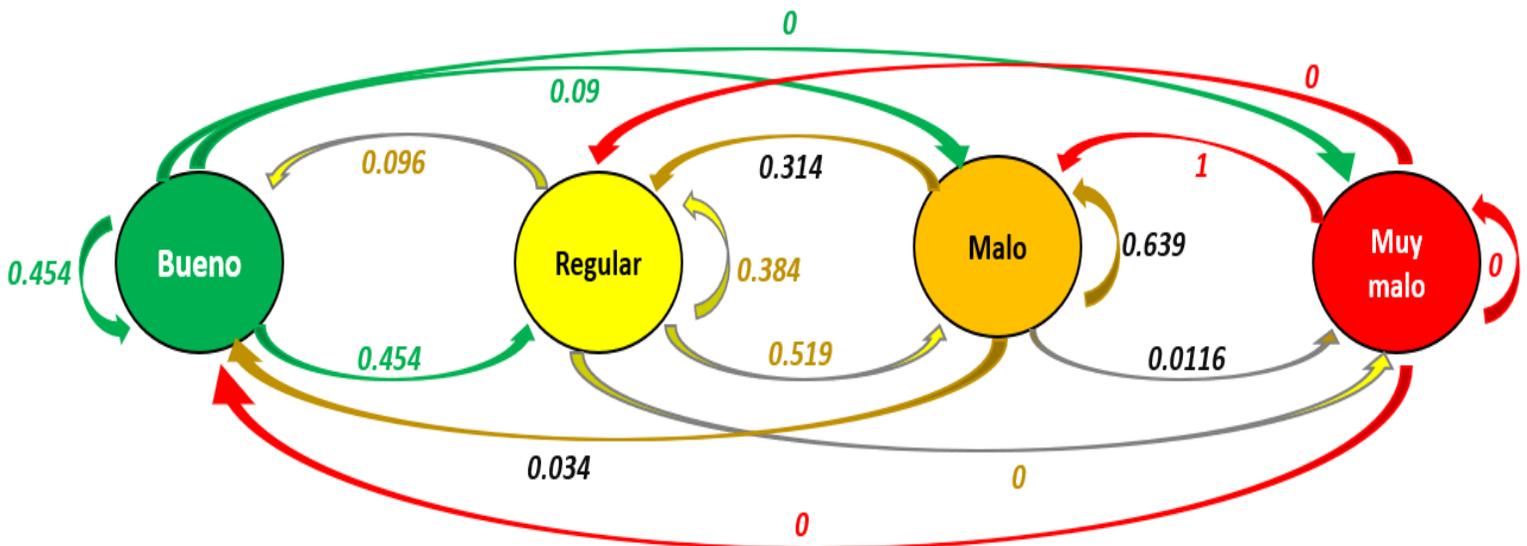


Figura A-2.3. Diagrama de transición para el mes de marzo.

1	B	R	M	MM
B	0.454545	0.454545	0.090909	0
R	0.096154	0.384615	0.519231	0
M	0.034884	0.313953	0.639535	0.011628
MM	0	0	1	0

9	B	R	M	MM
B	0.097257	0.350529	0.545877	0.006337
R	0.096721	0.350312	0.546611	0.006356
M	0.096612	0.350268	0.546761	0.006360
MM	0.096487	0.350218	0.546931	0.006364

2	B	R	M	MM
B	0.253489	0.409978	0.335476	0.001057
R	0.098801	0.354650	0.540512	0.006038
M	0.068353	0.337392	0.586818	0.007436
MM	0.034884	0.313953	0.639535	0.011628

10	B	R	M	MM
B	0.096955	0.350407	0.546291	0.006347
R	0.096716	0.350310	0.546618	0.006356
M	0.096667	0.350290	0.546685	0.006358
MM	0.096612	0.350268	0.546761	0.006360

3	B	R	M	MM
B	0.166346	0.378230	0.451523	0.003901
R	0.097866	0.351009	0.544840	0.006285
M	0.083982	0.345069	0.564125	0.006823
MM	0.068353	0.337392	0.586818	0.007436

11	B	R	M	MM
B	0.096820	0.350352	0.546476	0.006352
R	0.096713	0.350309	0.546621	0.006356
M	0.096692	0.350300	0.546651	0.006357
MM	0.096667	0.350290	0.546685	0.006358

4	B	R	M	MM
B	0.127731	0.362842	0.504177	0.005250
R	0.097241	0.350542	0.545881	0.006335
M	0.091032	0.348002	0.554407	0.006560
MM	0.083982	0.345069	0.564125	0.006823

12	B	R	M	MM
B	0.096760	0.350328	0.546558	0.006354
R	0.096712	0.350309	0.546623	0.006356
M	0.096703	0.350305	0.546636	0.006356
MM	0.096692	0.350300	0.546651	0.006357

5	B	R	M	MM
B	0.110536	0.355902	0.527700	0.005863
R	0.096949	0.350406	0.546298	0.006347
M	0.094180	0.349283	0.550091	0.006447
MM	0.091032	0.348002	0.554407	0.006560

13	B	R	M	MM
B	0.096733	0.350317	0.546595	0.006355
R	0.096712	0.350308	0.546624	0.006356
M	0.096708	0.350307	0.546629	0.006356
MM	0.096703	0.350305	0.546636	0.006356

6	B	R	M	MM
B	0.102873	0.352802	0.538189	0.006136
R	0.096817	0.350351	0.546479	0.006352
M	0.095583	0.349851	0.548169	0.006396
MM	0.094180	0.349283	0.550091	0.006447

14	B	R	M	MM
B	0.096721	0.350312	0.546611	0.006356
R	0.096712	0.350308	0.546624	0.006356
M	0.096710	0.350308	0.546626	0.006356
MM	0.096708	0.350307	0.546629	0.006356

7	B	R	M	MM
B	0.099458	0.351420	0.542864	0.006258
R	0.096759	0.350327	0.546559	0.006354
M	0.096209	0.350105	0.547313	0.006374
MM	0.095583	0.349851	0.548169	0.006396

15	B	R	M	MM
B	0.096716	0.350310	0.546618	0.006356
R	0.096712	0.350308	0.546624	0.006356
M	0.096711	0.350308	0.546625	0.006356
MM	0.096710	0.350308	0.546626	0.006356

8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.097936	0.350804	0.544948	0.006312	B	0.096713	0.350308	0.546621	0.006356
R	0.096733	0.350317	0.546595	0.006355	R	0.096713	0.350308	0.546624	0.006356
M	0.096487	0.350218	0.546931	0.006364	M	0.096713	0.350308	0.546625	0.006356
MM	0.096209	0.350105	0.547313	0.006374	MM	0.096713	0.350308	0.546625	0.006356

Tabla A-2.3. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de marzo.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Marzo	9.7%	35%	54.7%	0.6%

Aplicación de modelo para el mes de abril.

abr-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	1	0
REGULAR	0	2	4	0
MALA	0	3	20	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 3 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

abr-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	0	0
REGULAR	0	3	5	1
MALA	0	5	15	0
MUY MALA	0	1	0	0

$$\rightarrow D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 5 & 1 \\ 0 & 5 & 15 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

abr-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	1	0
REGULAR	1	1	2	0
MALA	0	3	22	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow D_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

abr-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	1	0	0
REGULAR	0	5	2	0
MALA	0	1	19	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow D_4 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

abr-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	0	0
REGULAR	1	1	4	0
MALA	0	6	18	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow D_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 6 & 18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 12 & 17 & 1 \\ 0 & 18 & 94 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D \rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 12 & 17 & 1 \\ 0 & 18 & 94 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 5 \\ \rightarrow \Sigma = 32 \\ \rightarrow \Sigma = 112 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

$$P_D = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.0625 & 0.375 & 0.531 & 0.0312 \\ 0 & 0.160 & 0.839 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

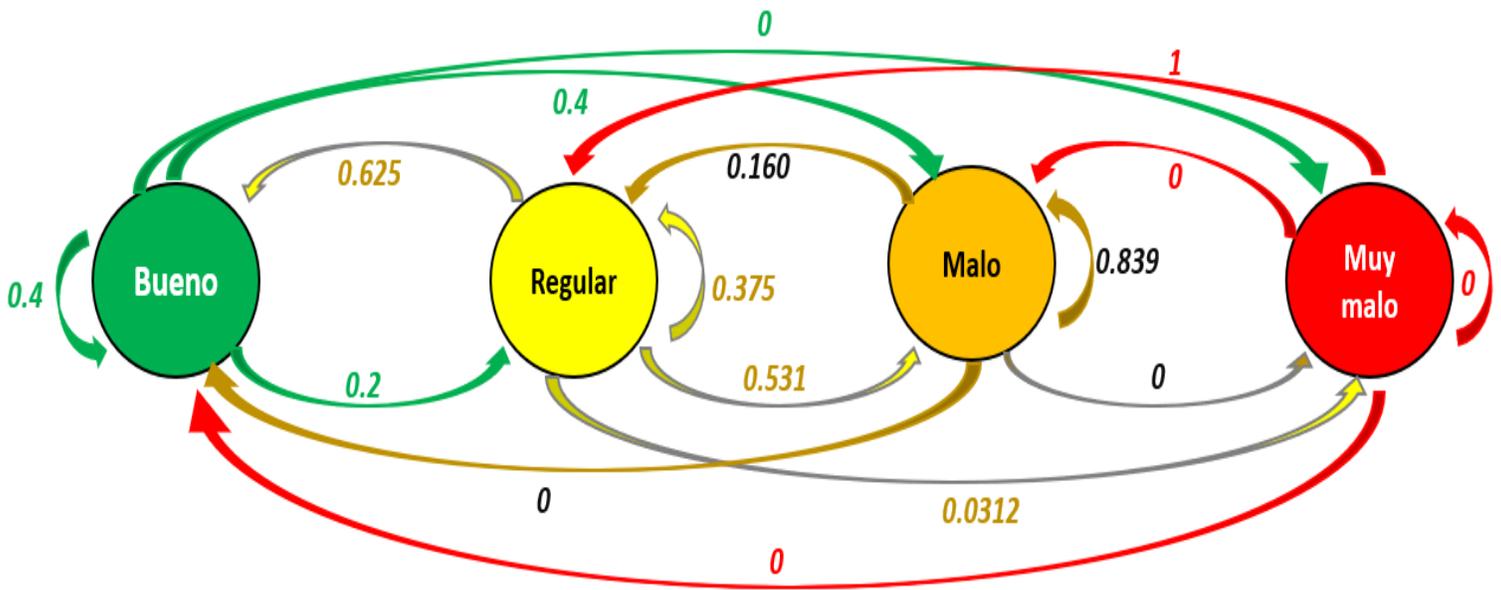


Figura A-2.4. Diagrama de transición para el mes de abril.

1	B	R	M	MM
B	0.4000	0.2000	0.4000	0
R	0.0625	0.3750	0.5313	0.0313
M	0.0000	0.1607	0.8393	0
MM	0	1	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.022460	0.212834	0.758052	0.006654
R	0.022267	0.212792	0.758289	0.006652
M	0.022122	0.212742	0.758489	0.006648
MM	0.022410	0.212851	0.758083	0.006657

2	B	R	M	MM
B	0.172500	0.219286	0.601964	0.006250
R	0.048438	0.269754	0.670089	0.011719
M	0.010045	0.195153	0.789780	0.005022
MM	0.062500	0.375000	0.531250	0.031250

10	B	R	M	MM
B	0.022286	0.212789	0.758274	0.006651
R	0.022206	0.212770	0.758374	0.006650
M	0.022145	0.212750	0.758457	0.006648
MM	0.022267	0.212792	0.758289	0.006652

3	B	R	M	MM
B	0.082705	0.219726	0.690716	0.006853
R	0.036235	0.230257	0.725078	0.008430
M	0.016215	0.207143	0.770544	0.006099
MM	0.048438	0.269754	0.670089	0.011719

11	B	R	M	MM
B	0.022214	0.212770	0.758367	0.006650
R	0.022181	0.212761	0.758409	0.006649
M	0.022155	0.212753	0.758443	0.006648
MM	0.022206	0.212770	0.758374	0.006650

4	B	R	M	MM
B	0.046815	0.216799	0.729519	0.006866
R	0.028885	0.218554	0.745366	0.007196
M	0.019432	0.210857	0.763237	0.006473
MM	0.036235	0.230257	0.725078	0.008430

12	B	R	M	MM
B	0.022184	0.212761	0.758406	0.006649
R	0.022170	0.212758	0.758424	0.006649
M	0.022159	0.212755	0.758438	0.006649
MM	0.022181	0.212761	0.758409	0.006649

5	B	R	M	MM
B	0.032276	0.214773	0.746176	0.006775
R	0.025214	0.214721	0.753236	0.006830
M	0.020952	0.212094	0.760365	0.006589
MM	0.028885	0.218554	0.745366	0.007196

13	B	R	M	MM
B	0.022171	0.212758	0.758422	0.006649
R	0.022165	0.212756	0.758430	0.006649
M	0.022161	0.212755	0.758436	0.006649
MM	0.022170	0.212758	0.758424	0.006649

6	B	R	M	MM
B	0.026334	0.213691	0.753263	0.006712
R	0.023505	0.213449	0.756336	0.006710
M	0.021637	0.212516	0.759219	0.006628
MM	0.025214	0.214721	0.753236	0.006830

14	B	R	M	MM
B	0.022166	0.212757	0.758429	0.006649
R	0.022163	0.212756	0.758432	0.006649
M	0.022162	0.212755	0.758435	0.006649
MM	0.022165	0.212756	0.758430	0.006649

7	B	R	M	MM
B	0.023889	0.213173	0.756260	0.006678
R	0.022743	0.213008	0.757579	0.006670
M	0.021937	0.212666	0.758756	0.006641
MM	0.023505	0.213449	0.756336	0.006710

15	B	R	M	MM
B	0.022164	0.212756	0.758432	0.006649
R	0.022163	0.212756	0.758433	0.006649
M	0.022162	0.212755	0.758434	0.006649
MM	0.022163	0.212756	0.758432	0.006649

8	B	R	M	MM
B	0.022879	0.212937	0.757522	0.006662
R	0.022410	0.212851	0.758083	0.006657
M	0.022066	0.212721	0.758567	0.006646
MM	0.022743	0.213008	0.757579	0.006670

16	B	R	M	MM
B	0.022163	0.212756	0.758434	0.006649
R	0.022163	0.212756	0.758434	0.006649
M	0.022163	0.212756	0.758434	0.006649
MM	0.022163	0.212756	0.758434	0.006649

Tabla A-2.4 Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de abril.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Abril	2.2%	21.3%	75.8%	0.7%

Aplicación de modelo para el mes de mayo.

may-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	1	1	0
REGULAR	2	8	2	0
MALA	0	2	12	1
MUY MALA	0	1	0	0



$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 8 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 12 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	1	0
REGULAR	1	5	3	0
MALA	0	5	15	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 5 & 3 & 0 \\ 0 & 5 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	0	0	0
REGULAR	0	3	4	0
MALA	0	4	19	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 4 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	1	0	0
REGULAR	0	2	4	0
MALA	1	3	18	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow E_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 \\ 1 & 3 & 18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

may-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	2	0	0
REGULAR	1	0	3	0
MALA	1	2	15	3
MUY MALA	0	0	3	0

$$\longrightarrow E_5 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 15 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 0 \\ 4 & 18 & 16 & 0 \\ 2 & 16 & 79 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 0 \\ 4 & 18 & 16 & 0 \\ 2 & 16 & 79 & 4 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 7 \\ \rightarrow \Sigma = 38 \\ \rightarrow \Sigma = 101 \\ \rightarrow \Sigma = 4 \end{array}$$

$$P_E = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.143 & 0.571 & 0.286 & 0 \\ 0.105 & 0.474 & 0.421 & 0 \\ 0.020 & 0.158 & 0.782 & 0.039 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

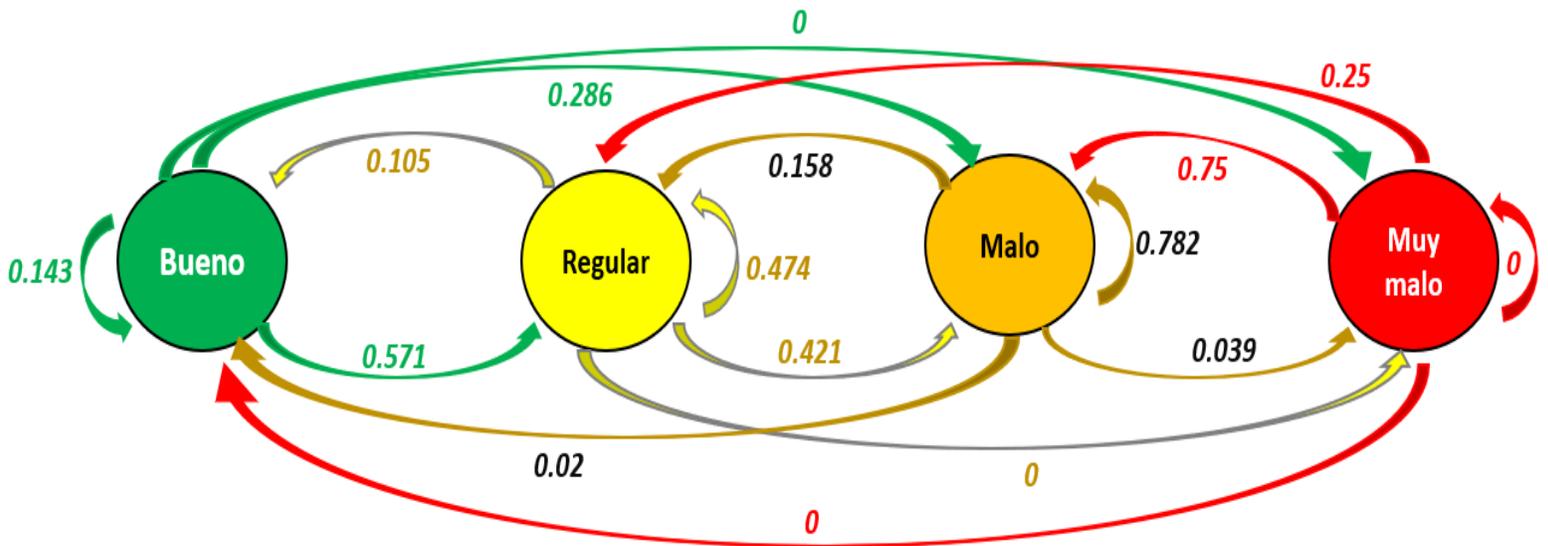


Figura A-2.5. Diagrama de transición para el mes de mayo.

1	B	R	M	MM
B	0.1429	0.5714	0.2857	0
R	0.1053	0.4737	0.4211	0
M	0.0198	0.1584	0.7822	0.0396
MM	0	0.2500	0.7500	0

9	B	R	M	MM
B	0.047776	0.263957	0.662067	0.026199
R	0.047743	0.263843	0.662203	0.026212
M	0.047647	0.263513	0.662591	0.026248
MM	0.047661	0.263559	0.662537	0.026243

2	B	R	M	MM	10	B	R	M	MM
B	0.086216	0.397571	0.504897	0.011315	B	0.047720	0.263765	0.662294	0.026220
R	0.073237	0.351229	0.558859	0.016675	R	0.047706	0.263716	0.662352	0.026226
M	0.034993	0.220165	0.713865	0.030977	M	0.047666	0.263576	0.662517	0.026241
MM	0.041167	0.237233	0.691897	0.029703	MM	0.047671	0.263596	0.662494	0.026239
3	B	R	M	MM	11	B	R	M	MM
B	0.064164	0.320402	0.595438	0.019996	B	0.047697	0.263683	0.662391	0.026229
R	0.058500	0.300922	0.618445	0.022133	R	0.047691	0.263662	0.662415	0.026232
M	0.042310	0.245116	0.684302	0.028272	M	0.047673	0.263603	0.662485	0.026238
MM	0.044554	0.252931	0.675113	0.027402	MM	0.047676	0.263611	0.662476	0.026237
4	B	R	M	MM	12	B	R	M	MM
B	0.054684	0.287760	0.633974	0.023582	B	0.047687	0.263648	0.662432	0.026233
R	0.052280	0.279475	0.643752	0.024493	R	0.047684	0.263639	0.662442	0.026234
M	0.045397	0.255757	0.671745	0.027101	M	0.047677	0.263614	0.662472	0.026237
MM	0.046358	0.259068	0.667837	0.026737	MM	0.047678	0.263618	0.662468	0.026237
5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.050656	0.273882	0.650353	0.025108	B	0.047682	0.263634	0.662449	0.026235
R	0.049635	0.270361	0.654509	0.025495	R	0.047681	0.263630	0.662454	0.026235
M	0.046709	0.260279	0.666408	0.026604	M	0.047678	0.263619	0.662466	0.026237
MM	0.047117	0.261687	0.664747	0.026449	MM	0.047679	0.263621	0.662465	0.026236
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.048945	0.267984	0.657315	0.025757	B	0.047680	0.263627	0.662457	0.026236
R	0.048510	0.266487	0.659082	0.025921	R	0.047680	0.263626	0.662459	0.026236
M	0.047267	0.262202	0.664139	0.026392	M	0.047679	0.263621	0.662464	0.026236
MM	0.047440	0.262800	0.663433	0.026327	MM	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.048217	0.265476	0.660274	0.026032	B	0.047680	0.263625	0.662460	0.026236
R	0.048032	0.264840	0.661025	0.026102	R	0.047679	0.263624	0.662461	0.026236
M	0.047504	0.263019	0.663175	0.026303	M	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236
MM	0.047578	0.263273	0.662875	0.026275	MM	0.047679	0.263622	0.662463	0.026236
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.047908	0.264410	0.661532	0.026149	B	0.047679	0.263623	0.662461	0.026236
R	0.047829	0.264140	0.661851	0.026179	R	0.047679	0.263623	0.662462	0.026236
M	0.047605	0.263366	0.662765	0.026264	M	0.047679	0.263622	0.662462	0.026236
MM	0.047636	0.263474	0.662638	0.026252	MM	0.047679	0.263622	0.662462	0.026236

Tabla A-2.5. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de mayo.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Mayo	4.8%	26.4%	66.2%	2.6%

Aplicación de modelo para el mes de junio.

jun-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	5	2	2	0
REGULAR	3	3	4	0
MALA	1	5	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow F_1 = \begin{bmatrix} 5 & 2 & 2 & 0 \\ 3 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jun-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	6	2	3	0
REGULAR	1	2	1	0
MALA	3	1	10	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow F_2 = \begin{bmatrix} 6 & 2 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jun-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	3	3	0	0
REGULAR	3	5	5	0
MALA	0	4	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow F_3 = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & 5 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jun-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	10	3	1	0
REGULAR	4	1	3	0
MALA	1	4	2	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow F_4 = \begin{bmatrix} 10 & 3 & 1 & 0 \\ 4 & 1 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jun-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	3	5	2	0
REGULAR	3	1	5	0
MALA	4	2	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow F_5 = \begin{bmatrix} 3 & 5 & 2 & 0 \\ 3 & 1 & 5 & 0 \\ 4 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = \begin{bmatrix} 27 & 15 & 8 & 0 \\ 14 & 12 & 18 & 0 \\ 9 & 16 & 26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F \rightarrow \begin{bmatrix} 27 & 15 & 8 & 0 \\ 14 & 12 & 18 & 0 \\ 9 & 16 & 26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 50 \\ \rightarrow \Sigma = 44 \\ \rightarrow \Sigma = 51 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_F = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.54 & 0.3 & 0.160 & 0 \\ 0.318 & 0.273 & 0.409 & 0 \\ 0.176 & 0.314 & 0.51 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

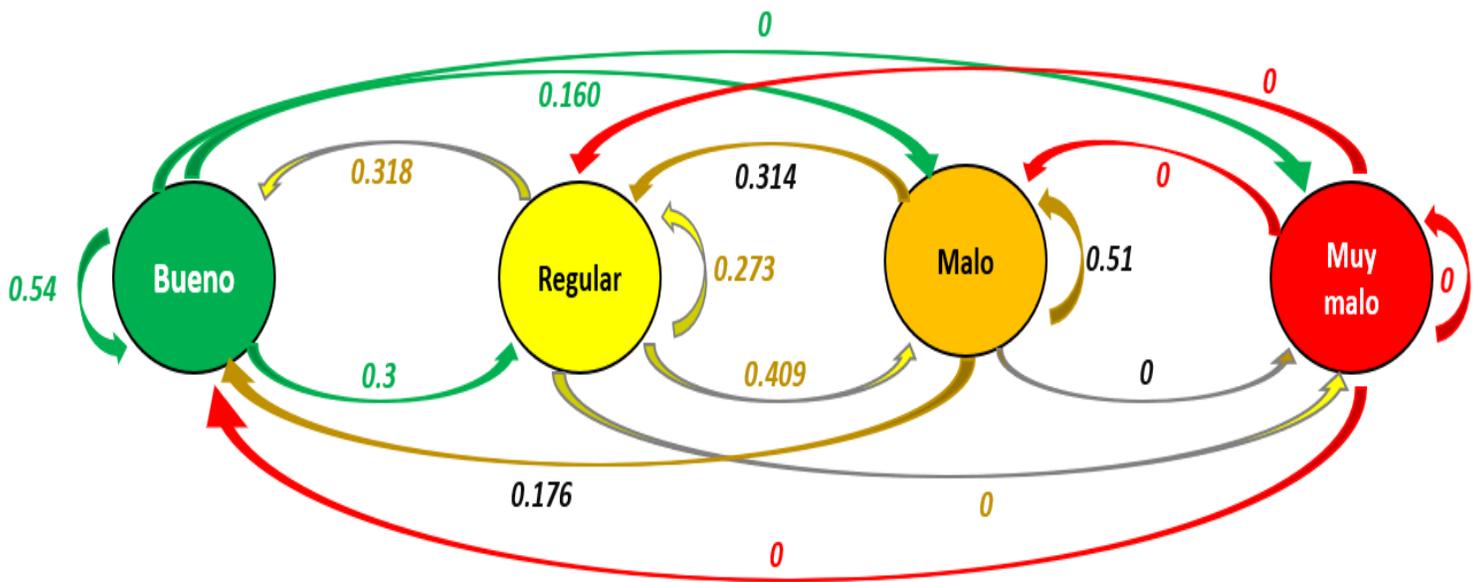


Figura A-2.6. Diagrama de transición para el mes de junio.

1	B	R	M	MM
B	0.5400	0.3000	0.1600	0
R	0.3182	0.2727	0.4091	0
M	0.1765	0.3137	0.5098	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.343412	0.296841	0.359747	0
R	0.343348	0.296843	0.359809	0
M	0.343312	0.296844	0.359843	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.415290	0.294014	0.290696	0
R	0.330788	0.298177	0.371035	0
M	0.285081	0.298441	0.416478	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.343377	0.296842	0.359781	0
R	0.343353	0.296843	0.359804	0
M	0.343341	0.296843	0.359816	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.369106	0.295971	0.334923	0
R	0.338977	0.296961	0.364063	0
M	0.322398	0.297577	0.380024	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.343364	0.296842	0.359794	0
R	0.343356	0.296843	0.359802	0
M	0.343351	0.296843	0.359806	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.352594	0.296525	0.350881	0
R	0.341781	0.296898	0.361321	0
M	0.335842	0.297100	0.367058	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.343359	0.296843	0.359798	0
R	0.343356	0.296843	0.359801	0
M	0.343355	0.296843	0.359802	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM
B	0.346670	0.296729	0.356601	0
R	0.342792	0.296862	0.360346	0
M	0.340661	0.296935	0.362403	0
MM	0	0	0	0

13	B	R	M	MM
B	0.343358	0.296843	0.359800	0
R	0.343357	0.296843	0.359801	0
M	0.343356	0.296843	0.359801	0
MM	0	0	0	0

6	B	R	M	MM
B	0.344545	0.296802	0.358653	0
R	0.343154	0.296850	0.359996	0
M	0.342390	0.296876	0.360734	0
MM	0	0	0	0

14	B	R	M	MM
B	0.343357	0.296843	0.359800	0
R	0.343357	0.296843	0.359800	0
M	0.343357	0.296843	0.359801	0
MM	0	0	0	0

7	B	R	M	MM
B	0.343783	0.296828	0.359389	0
R	0.343284	0.296845	0.359871	0
M	0.343010	0.296855	0.360135	0
MM	0	0	0	0

15	B	R	M	MM
B	0.343357	0.296843	0.359800	0
R	0.343357	0.296843	0.359800	0
M	0.343357	0.296843	0.359801	0
MM	0	0	0	0

8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.343510	0.296837	0.359653	0	B	0.343357	0.296843	0.359800	0
R	0.343331	0.296844	0.359826	0	R	0.343357	0.296843	0.359800	0
M	0.343232	0.296847	0.359921	0	M	0.343357	0.296843	0.359800	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.6. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de junio.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Junio	34.3%	29.7%	36%	0%

Aplicación de modelo para el mes de julio.

jul-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	1	1	0
REGULAR	1	9	5	0
MALA	1	5	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 9 & 5 & 0 \\ 1 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jul-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	2	2	0
REGULAR	2	9	5	0
MALA	1	5	2	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow G_2 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 9 & 5 & 0 \\ 1 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jul-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	1	1	0
REGULAR	0	4	6	0
MALA	3	4	7	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow G_3 = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 6 & 0 \\ 3 & 4 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jul-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	1	4	0
REGULAR	1	3	3	0
MALA	3	3	8	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow G_4 = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 4 & 0 \\ 1 & 3 & 3 & 0 \\ 3 & 3 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

jul-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	3	2	0
REGULAR	3	6	3	0
MALA	2	4	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow G_5 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 \\ 3 & 6 & 3 & 0 \\ 2 & 4 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 = \begin{bmatrix} 12 & 8 & 10 & 0 \\ 7 & 31 & 22 & 0 \\ 10 & 21 & 29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G \rightarrow \begin{bmatrix} 12 & 8 & 10 & 0 \\ 7 & 31 & 22 & 0 \\ 10 & 21 & 29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 30 \\ \rightarrow \Sigma = 60 \\ \rightarrow \Sigma = 60 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_G = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.4 & 0.267 & 0.33 & 0 \\ 0.117 & 0.517 & 0.367 & 0 \\ 0.167 & 0.35 & 0.483 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

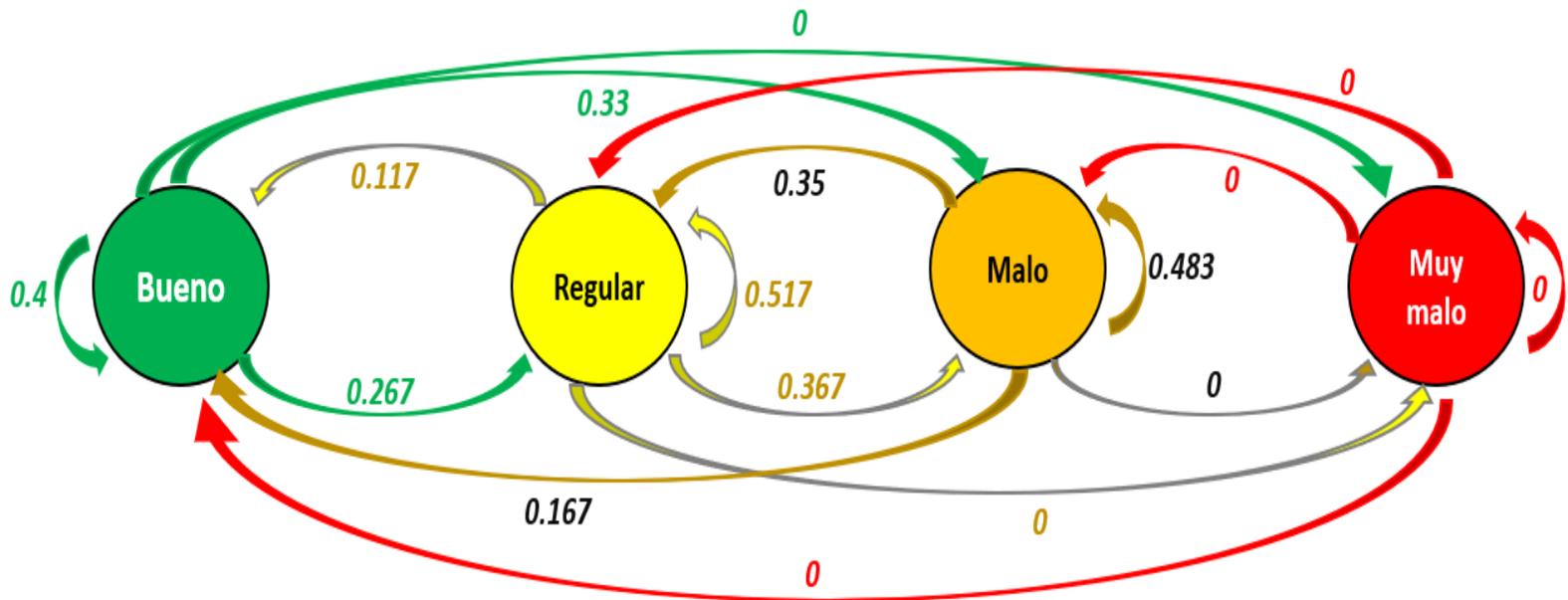


Figura A-2.7. Diagrama de transición para el mes de julio.

1	B	R	M	MM
B	0.40000	0.26667	0.33333	0
R	0.11667	0.51667	0.36667	0
M	0.16667	0.35000	0.48333	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.191253	0.400871	0.407876	0
R	0.191244	0.400878	0.407878	0
M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.246667	0.361111	0.392222	0
R	0.168056	0.426389	0.405556	0
M	0.188056	0.394444	0.417500	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.191249	0.400874	0.407877	0
R	0.191246	0.400876	0.407878	0
M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.206167	0.389630	0.404204	0
R	0.184560	0.407060	0.408380	0
M	0.190824	0.400069	0.409106	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.191248	0.400875	0.407877	0
R	0.191247	0.400875	0.407878	0
M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.195291	0.397758	0.406952	0
R	0.189378	0.402463	0.408159	0
M	0.191189	0.400776	0.408035	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.191247	0.400875	0.407877	0
R	0.191247	0.400875	0.407877	0
M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.192347	0.400019	0.407635	0	B	0.191247	0.400875	0.407877	0
R	0.190732	0.401296	0.407973	0	R	0.191247	0.400875	0.407877	0
M	0.191239	0.400864	0.407898	0	M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.191547	0.400641	0.407812	0	B	0.191247	0.400875	0.407877	0
R	0.191106	0.400988	0.407906	0	R	0.191247	0.400875	0.407877	0
M	0.191246	0.400874	0.407880	0	M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.191329	0.400811	0.407860	0	B	0.191247	0.400875	0.407877	0
R	0.191209	0.400906	0.407885	0	R	0.191247	0.400875	0.407877	0
M	0.191247	0.400875	0.407878	0	M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.191269	0.400858	0.407873	0	B	0.191247	0.400875	0.407877	0
R	0.191237	0.400884	0.407880	0	R	0.191247	0.400875	0.407877	0
M	0.191247	0.400875	0.407878	0	M	0.191247	0.400875	0.407877	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.7. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de julio.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Julio	19.1%	40.1%	40.8%	0%

Aplicación de modelo para el mes de agosto.

ago-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	3	1	0
REGULAR	2	9	4	0
MALA	1	3	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 9 & 4 & 0 \\ 1 & 3 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ago-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	1	1	0
REGULAR	0	8	6	0
MALA	2	5	7	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 8 & 6 & 0 \\ 2 & 5 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ago-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	3	0	0
REGULAR	3	12	3	0
MALA	0	5	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow H_3 = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & 12 & 3 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ago-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	8	3	0	0
REGULAR	2	0	4	0
MALA	1	4	8	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow H_4 = \begin{bmatrix} 8 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 4 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ago-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	1	3	1	0
REGULAR	3	7	5	0
MALA	1	5	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow H_5 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 0 \\ 3 & 7 & 5 & 0 \\ 1 & 5 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 = \begin{bmatrix} 14 & 13 & 3 & 0 \\ 10 & 36 & 22 & 0 \\ 5 & 22 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 14 & 13 & 3 & 0 \\ 10 & 36 & 22 & 0 \\ 5 & 22 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \Sigma = 30 \\ \rightarrow \Sigma = 68 \\ \rightarrow \Sigma = 52 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{matrix}$$

$$P_H = \begin{matrix} & \begin{matrix} B & R & M & MM \end{matrix} \\ \begin{matrix} B \\ R \\ M \\ MM \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.467 & 0.433 & 0.1 & 0 \\ 0.147 & 0.529 & 0.324 & 0 \\ 0.096 & 0.423 & 0.481 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{matrix}$$

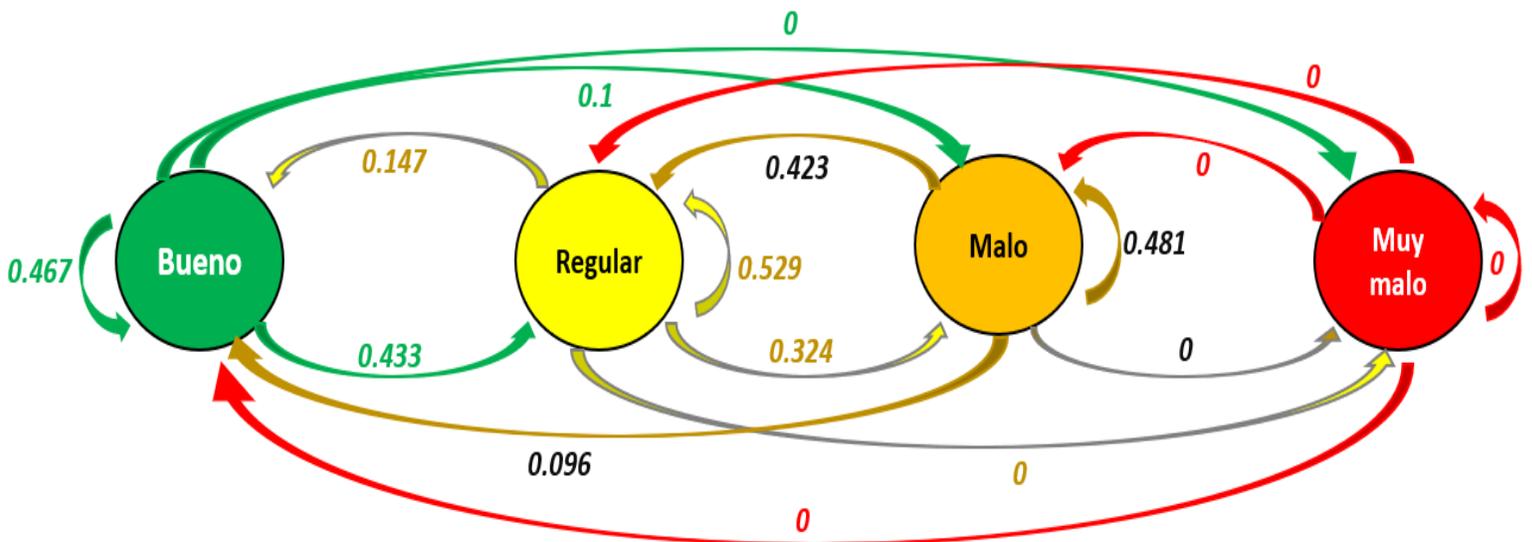


Figura A-2.8. Diagrama de transición para el mes de agosto.



1	B	R	M	MM
B	0.4667	0.4333	0.1000	0
R	0.1471	0.5294	0.3235	0
M	0.0962	0.4231	0.4808	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.191309	0.475616	0.333075	0
R	0.191199	0.475612	0.333190	0
M	0.191172	0.475611	0.333217	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.291119	0.473942	0.234940	0
R	0.177591	0.480880	0.341529	0
M	0.153317	0.469051	0.377632	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.191248	0.475614	0.333139	0
R	0.191206	0.475612	0.333182	0
M	0.191197	0.475612	0.333192	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.228143	0.476459	0.295398	0
R	0.186433	0.476033	0.337535	0
M	0.176837	0.474526	0.348637	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.191225	0.475613	0.333163	0
R	0.191209	0.475612	0.333179	0
M	0.191206	0.475612	0.333182	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.204938	0.476081	0.318981	0
R	0.189462	0.475608	0.334930	0
M	0.185830	0.475349	0.338821	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.191216	0.475612	0.333172	0
R	0.191210	0.475612	0.333177	0
M	0.191209	0.475612	0.333179	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM
B	0.196321	0.475803	0.327876	0
R	0.190563	0.475594	0.333843	0
M	0.189204	0.475529	0.335267	0
MM	0	0	0	0

13	B	R	M	MM
B	0.191213	0.475612	0.333175	0
R	0.191211	0.475612	0.333177	0
M	0.191210	0.475612	0.333178	0
MM	0	0	0	0

6	B	R	M	MM
B	0.193114	0.475685	0.331201	0
R	0.190970	0.475604	0.333427	0
M	0.190463	0.475583	0.333954	0
MM	0	0	0	0

14	B	R	M	MM
B	0.191212	0.475612	0.333176	0
R	0.191211	0.475612	0.333177	0
M	0.191211	0.475612	0.333177	0
MM	0	0	0	0

7	B	R	M	MM
B	0.191920	0.475639	0.332441	0
R	0.191121	0.475609	0.333270	0
M	0.190932	0.475601	0.333466	0
MM	0	0	0	0

15	B	R	M	MM
B	0.191211	0.475612	0.333177	0
R	0.191211	0.475612	0.333177	0
M	0.191211	0.475612	0.333177	0
MM	0	0	0	0

8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.191475	0.475622	0.332903	0	B	0.191211	0.475612	0.333177	0
R	0.191178	0.475611	0.333212	0	R	0.191211	0.475612	0.333177	0
M	0.191107	0.475608	0.333285	0	M	0.191211	0.475612	0.333177	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.8. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de agosto.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Agosto	19.1%	47.6%	33.3%	0%

Aplicación de modelo para el mes de septiembre.

sep-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	0	1	2	0
REGULAR	3	10	3	0
MALA	0	6	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 0 \\ 3 & 10 & 3 & 0 \\ 0 & 6 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

sep-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	1	1	0
REGULAR	2	7	4	0
MALA	1	5	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow I_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 7 & 4 & 0 \\ 1 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

sep-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	10	3	3	0
REGULAR	5	2	1	0
MALA	1	3	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow I_3 = \begin{bmatrix} 10 & 3 & 3 & 0 \\ 5 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

sep-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	6	1	3	0
REGULAR	2	7	2	0
MALA	1	4	3	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow I_4 = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 3 & 0 \\ 2 & 7 & 2 & 0 \\ 1 & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

sep-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	14	5	1	0
REGULAR	5	2	0	0
MALA	0	1	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow I_5 = \begin{bmatrix} 14 & 5 & 1 & 0 \\ 5 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = \begin{bmatrix} 32 & 11 & 10 & 0 \\ 17 & 28 & 10 & 0 \\ 3 & 19 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 32 & 11 & 10 & 0 \\ 17 & 28 & 10 & 0 \\ 3 & 19 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 53 \\ \rightarrow \Sigma = 55 \\ \rightarrow \Sigma = 37 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_I = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.604 & 0.208 & 0.189 & 0 \\ 0.309 & 0.509 & 0.182 & 0 \\ 0.081 & 0.514 & 0.405 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

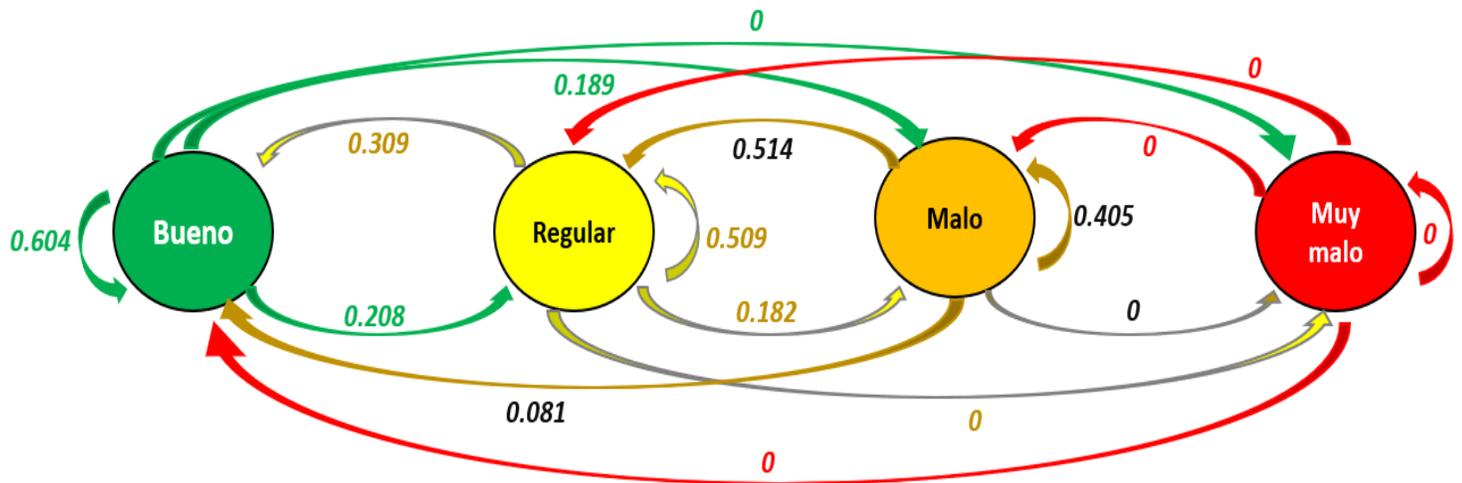


Figura A-2.9. Diagrama de transición para el mes de septiembre.

1	B	R	M	MM
B	0.6038	0.2075	0.1887	0
R	0.3091	0.5091	0.1818	0
M	0.0811	0.5135	0.4054	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.361510	0.401117	0.237373	0
R	0.361499	0.401129	0.237372	0
M	0.361459	0.401171	0.237370	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.443992	0.327861	0.228147	0
R	0.358718	0.416691	0.224591	0
M	0.240548	0.486434	0.273018	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.361498	0.401130	0.237372	0
R	0.361495	0.401133	0.237372	0
M	0.361484	0.401145	0.237371	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.387908	0.376217	0.235875	0
R	0.363590	0.401915	0.234495	0
M	0.317725	0.437763	0.244512	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.361495	0.401133	0.237372	0
R	0.361494	0.401134	0.237372	0
M	0.361491	0.401137	0.237371	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.369619	0.393163	0.237218	0
R	0.362767	0.400490	0.236743	0
M	0.346968	0.414364	0.238668	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.361494	0.401134	0.237372	0
R	0.361494	0.401134	0.237372	0
M	0.361493	0.401135	0.237372	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.363923	0.398684	0.237393	0	B	0.361494	0.401134	0.237372	0
R	0.362012	0.400748	0.237240	0	R	0.361494	0.401134	0.237372	0
M	0.356918	0.405520	0.237562	0	M	0.361494	0.401135	0.237372	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.362205	0.400402	0.237393	0	B	0.361494	0.401134	0.237372	0
R	0.361677	0.400978	0.237346	0	R	0.361494	0.401135	0.237372	0
M	0.360102	0.402515	0.237383	0	M	0.361494	0.401135	0.237372	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.361698	0.400920	0.237381	0	B	0.361494	0.401135	0.237372	0
R	0.361554	0.401079	0.237367	0	R	0.361494	0.401135	0.237372	0
M	0.361081	0.401554	0.237365	0	M	0.361494	0.401135	0.237372	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.361552	0.401073	0.237375	0	B	0.361494	0.401135	0.237372	0
R	0.361512	0.401116	0.237371	0	R	0.361494	0.401135	0.237372	0
M	0.361374	0.401259	0.237367	0	M	0.361494	0.401135	0.237372	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.9. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de septiembre.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Septiembre	36.1%	40.1%	23.7%	0%

Aplicación de modelo para el mes de octubre.

oct-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	11	2	2	0
REGULAR	2	5	1	0
MALA	1	2	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow J_1 = \begin{bmatrix} 11 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 5 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

oct-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	9	5	0	0
REGULAR	4	3	4	0
MALA	2	2	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow J_2 = \begin{bmatrix} 9 & 5 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 4 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

oct-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	3	1	0
REGULAR	2	7	4	0
MALA	1	4	4	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow J_3 = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 7 & 4 & 0 \\ 1 & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

oct-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	7	2	4	0
REGULAR	3	1	3	0
MALA	2	5	3	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow J_4 = \begin{bmatrix} 7 & 2 & 4 & 0 \\ 3 & 1 & 3 & 0 \\ 2 & 5 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

oct-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	5	3	1	0
REGULAR	3	1	2	0
MALA	1	3	9	1
MUY MALA	0	0	1	0

$$\longrightarrow J_5 = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 3 & 9 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 = \begin{bmatrix} 36 & 15 & 8 & 0 \\ 14 & 17 & 14 & 0 \\ 7 & 16 & 21 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 36 & 15 & 8 & 0 \\ 14 & 17 & 14 & 0 \\ 7 & 16 & 21 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 59 \\ \rightarrow \Sigma = 45 \\ \rightarrow \Sigma = 45 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

$$P_J = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.611 & 0.254 & 0.135 & 0 \\ 0.311 & 0.377 & 0.311 & 0 \\ 0.155 & 0.355 & 0.466 & 0.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

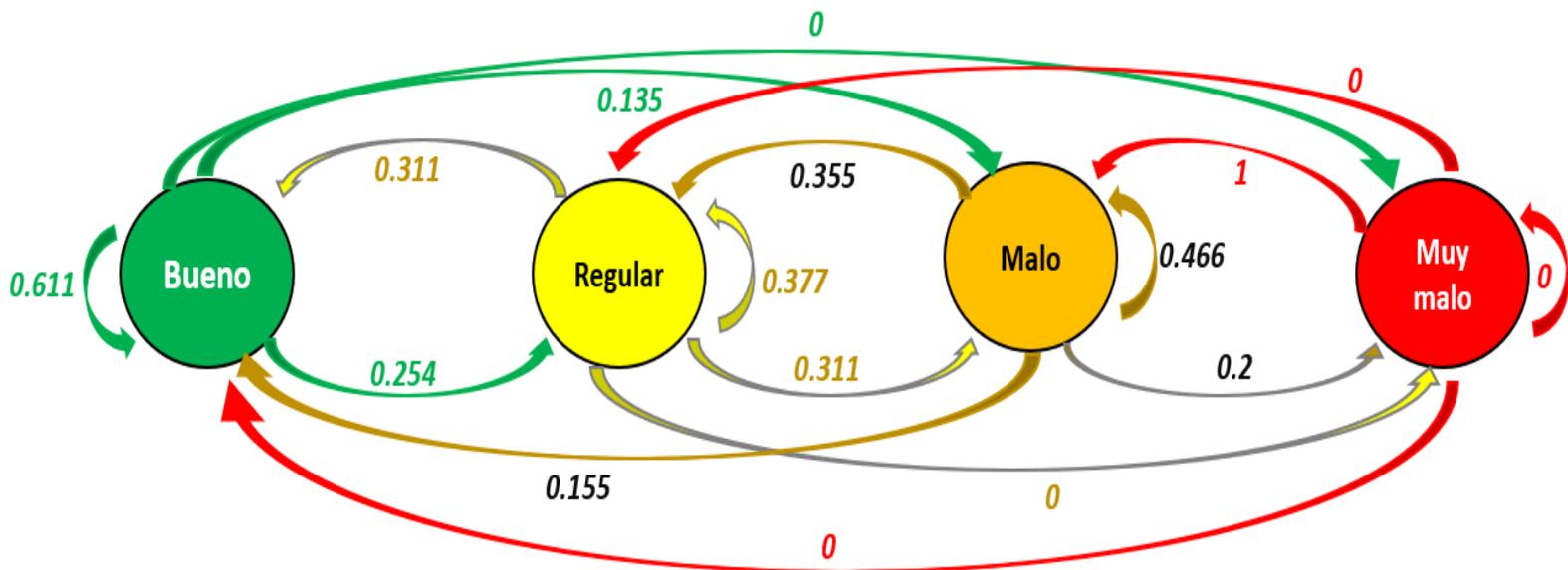


Figura A-2.10. Diagrama de transición para el mes de octubre.

1	B	R	M	MM
B	0.6102	0.2542	0.1356	0.0
R	0.3111	0.3778	0.3111	0.0
M	0.1556	0.3556	0.4667	0.0222
MM	0	0	1	0

9	B	R	M	MM
B	0.375539	0.322305	0.295594	0.006563
R	0.375247	0.322368	0.295811	0.006575
M	0.375034	0.322414	0.295970	0.006583
MM	0.374691	0.322488	0.296225	0.006596

2	B	R	M	MM
B	0.472495	0.299384	0.225108	0.003013
R	0.355756	0.332429	0.304901	0.006914
M	0.278125	0.339795	0.371710	0.010370
MM	0.155556	0.355556	0.466667	0.022222

10	B	R	M	MM
B	0.375396	0.322335	0.295700	0.006569
R	0.375271	0.322362	0.295793	0.006574
M	0.375180	0.322382	0.295860	0.006577
MM	0.375034	0.322414	0.295970	0.006583

3	B	R	M	MM
B	0.416461	0.313265	0.265272	0.005002
R	0.367923	0.324440	0.300861	0.006776
M	0.333239	0.331240	0.327261	0.008260
MM	0.278125	0.339795	0.371710	0.010370

11	B	R	M	MM
B	0.375335	0.322349	0.295745	0.006571
R	0.375282	0.322360	0.295785	0.006573
M	0.375243	0.322368	0.295814	0.006575
MM	0.375180	0.322382	0.295860	0.006577

4	B	R	M	MM
B	0.392836	0.318543	0.282726	0.005895
R	0.372233	0.323079	0.298002	0.006686
M	0.357292	0.326216	0.309219	0.007272
MM	0.333239	0.331240	0.327261	0.008260

12	B	R	M	MM
B	0.375309	0.322354	0.295765	0.006572
R	0.375286	0.322359	0.295782	0.006573
M	0.375270	0.322363	0.295794	0.006574
MM	0.375243	0.322368	0.295814	0.006575

5	B	R	M	MM
B	0.382779	0.320737	0.290202	0.006283
R	0.373995	0.322644	0.296739	0.006622
M	0.367599	0.324019	0.301511	0.006872
MM	0.357292	0.326216	0.309219	0.007272

13	B	R	M	MM
B	0.375298	0.322357	0.295773	0.006573
R	0.375288	0.322359	0.295780	0.006573
M	0.375281	0.322360	0.295785	0.006573
MM	0.375270	0.322363	0.295794	0.006574

6	B	R	M	MM
B	0.378487	0.321667	0.293397	0.006449
R	0.374738	0.322478	0.296190	0.006594
M	0.372005	0.323068	0.298226	0.006700
MM	0.367599	0.324019	0.301511	0.006872

14	B	R	M	MM
B	0.375293	0.322358	0.295776	0.006573
R	0.375289	0.322358	0.295780	0.006573
M	0.375286	0.322359	0.295782	0.006573
MM	0.375281	0.322360	0.295785	0.006573

7	B	R	M	MM
B	0.376655	0.322063	0.294762	0.006520
R	0.375054	0.322409	0.295955	0.006582
M	0.373887	0.322662	0.296824	0.006627
MM	0.372005	0.323068	0.298226	0.006700

15	B	R	M	MM
B	0.375291	0.322358	0.295778	0.006573
R	0.375289	0.322358	0.295779	0.006573
M	0.375288	0.322359	0.295780	0.006573
MM	0.375286	0.322359	0.295782	0.006573

8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.375873	0.322232	0.295345	0.006550	B	0.375290	0.322358	0.295779	0.006573
R	0.375189	0.322380	0.295854	0.006577	R	0.375290	0.322358	0.295779	0.006573
M	0.374691	0.322488	0.296225	0.006596	M	0.375289	0.322359	0.295780	0.006573
MM	0.373887	0.322662	0.296824	0.006627	MM	0.375288	0.322359	0.295780	0.006573

Tabla A-2.10. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de octubre.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Octubre	37.5%	32.2%	29.6%	0.7%

Aplicación de modelo para el mes de noviembre.

nov-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	11	1	1	0
REGULAR	0	2	4	0
MALA	2	3	5	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow K_1 = \begin{bmatrix} 12 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 \\ 2 & 3 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

nov-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	7	6	0	0
REGULAR	6	6	2	0
MALA	0	2	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow K_2 = \begin{bmatrix} 7 & 6 & 6 & 0 \\ 6 & 6 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

nov-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	8	4	0	0
REGULAR	3	2	3	0
MALA	1	2	6	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\rightarrow K_3 = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

nov-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	3	6	0	0
REGULAR	5	4	4	0
MALA	1	4	2	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow K_4 = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 0 & 0 \\ 5 & 4 & 4 & 0 \\ 1 & 4 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

nov-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	2	2	2	0
REGULAR	4	8	1	0
MALA	1	2	7	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow K_5 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 0 \\ 4 & 8 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = \begin{bmatrix} 31 & 19 & 3 & 0 \\ 18 & 22 & 14 & 0 \\ 5 & 13 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K \rightarrow \begin{bmatrix} 31 & 19 & 3 & 0 \\ 18 & 22 & 14 & 0 \\ 5 & 13 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 53 \\ \rightarrow \Sigma = 54 \\ \rightarrow \Sigma = 38 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_K = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.583 & 0.358 & 0.057 & 0 \\ 0.333 & 0.407 & 0.259 & 0 \\ 0.132 & 0.342 & 0.526 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

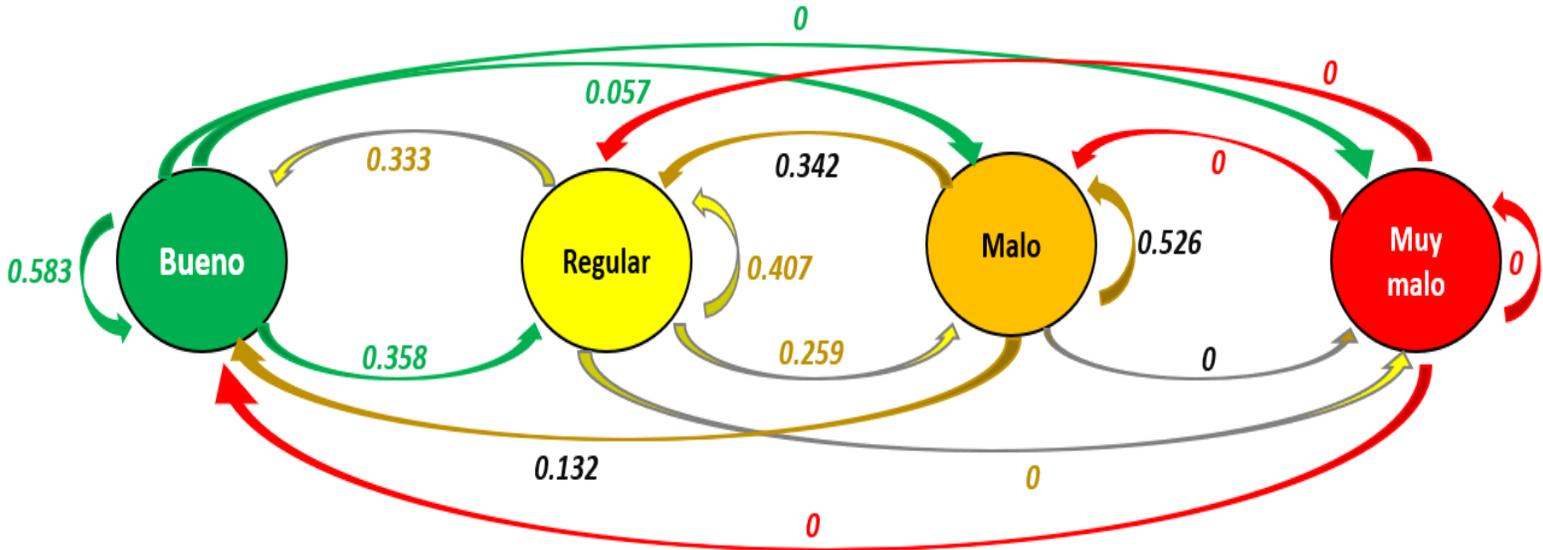


Figura A-2.11. Diagrama de transición para el mes de octubre.

1	B	R	M	MM
B	0.5849	0.3585	0.0566	0
R	0.3333	0.4074	0.2593	0
M	0.1316	0.3421	0.5263	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.378618	0.372653	0.248729	0
R	0.378160	0.372634	0.249206	0
M	0.377685	0.372614	0.249701	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.469059	0.375099	0.155841	0
R	0.364884	0.374172	0.260944	0
M	0.260248	0.366601	0.373150	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.378401	0.372644	0.248955	0
R	0.378190	0.372635	0.249175	0
M	0.377970	0.372626	0.249403	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.419894	0.374286	0.205820	0
R	0.372481	0.372518	0.255000	0
M	0.323520	0.370309	0.306171	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.378301	0.372640	0.249059	0
R	0.378203	0.372636	0.249161	0
M	0.378102	0.372632	0.249266	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.397442	0.373427	0.229131	0
R	0.375592	0.372535	0.251873	0
M	0.352951	0.371588	0.275461	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.378255	0.372638	0.249107	0
R	0.378209	0.372636	0.249154	0
M	0.378163	0.372634	0.249203	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM	13	B	R	M	MM
B	0.387091	0.373003	0.239906	0	B	0.378233	0.372637	0.249130	0
R	0.377005	0.372587	0.250408	0	R	0.378212	0.372636	0.249151	0
M	0.366550	0.372154	0.261296	0	M	0.378191	0.372635	0.249174	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
6	B	R	M	MM	14	B	R	M	MM
B	0.382312	0.372806	0.244882	0	B	0.378223	0.372637	0.249140	0
R	0.377657	0.372613	0.249730	0	R	0.378214	0.372636	0.249150	0
M	0.372830	0.372414	0.254756	0	M	0.378204	0.372636	0.249160	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
7	B	R	M	MM	15	B	R	M	MM
B	0.380107	0.372715	0.247179	0	B	0.378219	0.372637	0.249145	0
R	0.377957	0.372626	0.249417	0	R	0.378214	0.372636	0.249149	0
M	0.375729	0.372534	0.251738	0	M	0.378210	0.372636	0.249154	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0
8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.379088	0.372672	0.248239	0	B	0.378217	0.372636	0.249147	0
R	0.378096	0.372631	0.249273	0	R	0.378215	0.372636	0.249149	0
M	0.377067	0.372589	0.250344	0	M	0.378213	0.372636	0.249151	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.11. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de noviembre.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Noviembre	37.8%	37.3%	24.9%	0%

Aplicación de modelo para el mes de diciembre.

dic-18

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	4	7	0	0
REGULAR	5	3	4	0
MALA	2	2	3	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow L_1 = \begin{bmatrix} 4 & 7 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 4 & 0 \\ 2 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dic-19

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	5	7	0	0
REGULAR	4	4	4	0
MALA	3	2	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow L_2 = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 4 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dic-20

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	10	3	0	0
REGULAR	3	9	2	0
MALA	0	2	1	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow L_3 = \begin{bmatrix} 10 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & 9 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dic-21

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	3	1	2	0
REGULAR	2	8	4	0
MALA	0	5	5	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow L_4 = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 8 & 4 & 0 \\ 0 & 5 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dic-22

Calidad del aire	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
BUENA	9	5	0	0
REGULAR	4	8	2	0
MALA	1	1	0	0
MUY MALA	0	0	0	0

$$\longrightarrow L_5 = \begin{bmatrix} 9 & 5 & 0 & 0 \\ 4 & 8 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = \begin{bmatrix} 31 & 23 & 2 & 0 \\ 18 & 32 & 16 & 0 \\ 6 & 12 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 31 & 23 & 2 & 0 \\ 18 & 32 & 16 & 0 \\ 6 & 12 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 56 \\ \rightarrow \Sigma = 66 \\ \rightarrow \Sigma = 28 \\ \rightarrow \Sigma = 0 \end{array}$$

$$P_L = \begin{array}{l} B \\ R \\ M \\ MM \end{array} \begin{bmatrix} B & R & M & MM \\ 0.554 & 0.411 & 0.036 & 0 \\ 0.27 & 0.485 & 0.242 & 0 \\ 0.214 & 0.429 & 0.357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \\ \rightarrow \Sigma = 1 \end{array}$$

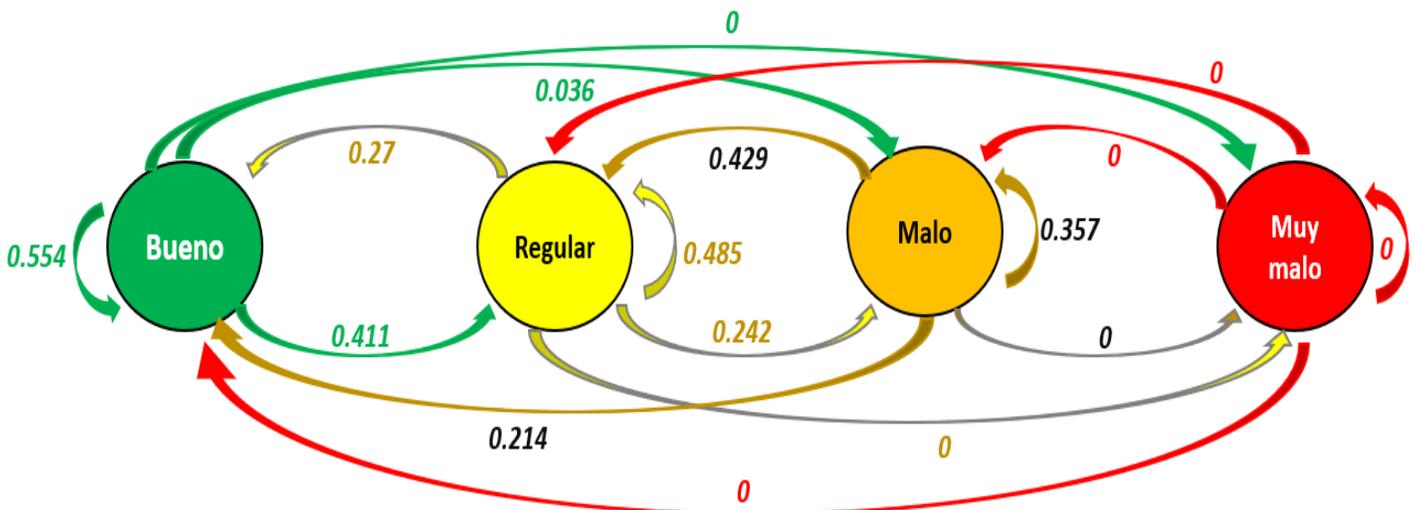


Figura A-2.12. Diagrama de transición para el mes de diciembre.

1	B	R	M	MM
B	0.5536	0.4107	0.0357	0
R	0.2727	0.4848	0.2424	0
M	0.2143	0.4286	0.3571	0
MM	0	0	0	0

9	B	R	M	MM
B	0.363914	0.447241	0.188845	0
R	0.363870	0.447244	0.188886	0
M	0.363859	0.447245	0.188896	0
MM	0	0	0	0

2	B	R	M	MM
B	0.426107	0.441800	0.132093	0
R	0.335153	0.450987	0.213859	0
M	0.312036	0.448864	0.239100	0
MM	0	0	0	0

10	B	R	M	MM
B	0.363894	0.447242	0.188864	0
R	0.363879	0.447243	0.188877	0
M	0.363876	0.447244	0.188881	0
MM	0	0	0	0

3	B	R	M	MM
B	0.384677	0.445826	0.169497	0
R	0.354355	0.447967	0.197678	0
M	0.346387	0.448260	0.205352	0
MM	0	0	0	0

11	B	R	M	MM
B	0.363887	0.447243	0.188870	0
R	0.363882	0.447243	0.188875	0
M	0.363881	0.447243	0.188876	0
MM	0	0	0	0

4	B	R	M	MM
B	0.370856	0.446792	0.182352	0
R	0.360693	0.447454	0.191853	0
M	0.358007	0.447613	0.194380	0
MM	0	0	0	0

12	B	R	M	MM
B	0.363885	0.447243	0.188872	0
R	0.363883	0.447243	0.188874	0
M	0.363883	0.447243	0.188874	0
MM	0	0	0	0

5	B	R	M	MM
B	0.366223	0.447093	0.186684	0
R	0.362814	0.447312	0.189874	0
M	0.361912	0.447369	0.190720	0
MM	0	0	0	0

13	B	R	M	MM
B	0.363884	0.447243	0.188873	0
R	0.363884	0.447243	0.188873	0
M	0.363884	0.447243	0.188873	0
MM	0	0	0	0

6	B	R	M	MM
B	0.364669	0.447193	0.188138	0
R	0.363525	0.447266	0.189209	0
M	0.363222	0.447285	0.189493	0
MM	0	0	0	0

14	B	R	M	MM
B	0.363884	0.447243	0.188873	0
R	0.363884	0.447243	0.188873	0
M	0.363884	0.447243	0.188873	0
MM	0	0	0	0

7	B	R	M	MM
B	0.364147	0.447226	0.188627	0
R	0.363763	0.447251	0.188986	0
M	0.363662	0.447257	0.189081	0
MM	0	0	0	0

15	B	R	M	MM
B	0.363884	0.447243	0.188873	0
R	0.363884	0.447243	0.188873	0
M	0.363884	0.447243	0.188873	0
MM	0	0	0	0



8	B	R	M	MM	16	B	R	M	MM
B	0.363972	0.447237	0.188790	0	B	0.363884	0.447243	0.188873	0
R	0.363843	0.447246	0.188911	0	R	0.363884	0.447243	0.188873	0
M	0.363809	0.447248	0.188943	0	M	0.363884	0.447243	0.188873	0
MM	0	0	0	0	MM	0	0	0	0

Tabla A-2.12. Iteraciones para llegar a estado estable en el mes de diciembre.

	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
Diciembre	36.4%	44.7%	18.9%	0%



GLOSARIO Y ACRONIMOS

- (AQMEII) → Air Quality Model Evaluation International Initiative.
- (CEPIS) → Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- (CO) → Carbono.
- (CONAGUA) → Comisión Nacional del Agua.
- (COV) → Compuestos Orgánicos Volátiles.
- (CPEUM) → Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- (GEI) → Gases de efecto invernadero.
- (INECC) → Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
- (INEGI) → Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática.
- (IMECA) → Índice Metropolitano de Contingencia Ambiental.
- (MDL) → Mecanismo para Desarrollo Limpio
- (NMX) → Normas Mexicanas.
- (NOM) → Norma Oficial Mexicana.
- (NO₂) → Dióxido de nitrógeno.
- (NO_x) → Óxidos de nitrógeno.
- (OI) → Objetivos Intermedios.
- (OMS) → Organización Mundial de la Salud.
- (PACADAMM) → Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey.
- (PCAA) → Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas.
- (PNUMA) → Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.



- (*ppb*) → Partes por billón.
- (*PROAIRE*) → Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire.
- (*O₃*) → Ozono.
- (*SAO*) → Sustancias que Agotan la capa de Ozono.
- (*SEDEMA*) → Secretaría del Medio Ambiente.
- (*SEMARNAT*) → Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- (*SO₂*) → Dióxido de azufre.
- (*ZMVM*) → Zona Metropolitana del Valle de México.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

- A. Carpinone, M. Giorgio, R. Langella, A. Testa. (2015). Markov chain modeling for very-short-term wind power forecasting, *Electric Power Systems Research*, Volume 122, Pages 152-158, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.025> Último acceso: enero de 2023
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA. (2020). AP 42. Recopilación de factores de emisiones atmosféricas. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors> Último acceso: abril de 2023
- Alyousifi, Y., Masseran, N. & Ibrahim, K. (2018). Modeling the stochastic dependence of air pollution index data. *Stoch Environ Res Risk Assess* 32, 1603–1611 <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1443-7> Último acceso: enero de 2023
- Asaf Nebenzal, Barak Fishbain, (2018) Long-term forecasting of nitrogen dioxide ambient levels in metropolitan areas using the discrete-time Markov model, *Environmental Modelling & Software*, Volume 107, Pages 175-185, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.001>.
Último acceso: octubre de 2022
- Barthwal, A. (2023). A Markov chain based IoT system for monitoring and analysis of urban air quality. *Environ Monit Assess* 195, 235. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10857-4>
Último acceso: diciembre de 2022
- Ballester, F., Díaz, J., & Moreno, J. M. (2006). Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. *Gaceta sanitaria*, 20 Suppl 1, 160–174. <https://doi.org/10.1157/13086040> Último acceso: noviembre de 2022
- Bermejo, Victoria & Alonso, Rocío & Elvira, Susana & Rábago, Isaura & García Vivanco, Marta. (2009). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. Recuperado en febrero de 2023 de: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Ozono_tcm30-188049.pdf Último acceso: febrero de 2023
- Bini, D., G. Latouche y B. Meini. (2005). *Numerical Methods for Structured Markov Chains*, Oxford University Press, Nueva York.
- Carvache-Franco, M., Regalado-Pezúa, O., Sirkis, G., Carvache-Franco, O., & Carvache-Franco, W. (2023). Market segmentation in urban tourism: A study in Latin America. *PloSone*, 18(5), <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0285138> Último acceso: abril de 2023



- CENMA, (2013). Elaboración de Reglamentos y Protocolos de Procedimientos para el Aseguramiento de la Calidad del Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos. Santiago de Chile, 98 pp.
- Chen, J.C., Wu, Y.J. (2020). Discrete-time Markov chain for prediction of air quality index. *J Ambient Intell Human Comput* <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02036-5>
Ultimo acceso: marzo de 2023.
- Circula, H. (2016). Hoy no circula. Recuperado de <http://www.hoy-no-circula.com.mx/>
Ultimo acceso: febrero 2023
- Comisión Ambiental Metropolitana (CAM). (2013). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011- 2020*. Ciudad de México: Comisión Ambiental Metropolitana. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2011-2020/proaire2011-2020.pdf> Ultimo acceso: enero de 2023
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf Ultimo acceso: mayo de 2023
- Corrales Gil, M. A. (2009). La subsecretaría del mejoramiento del ambiente. En: Crónica del Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp.: 216.
- Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, (2019) SIMAT. Recuperado en marzo de 2023 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512733/monitoreo_ambiental_25112019.pdf
- Félix-Félix-Arellano E.E., Schilmann A., Hurtado-Díaz M., Texcalac-Sangrado J.L., & Riojas-Rodríguez H. (2020). Revisión rápida: contaminación del aire y morbimortalidad por Covid-19 [Quick review: air pollution and morbi-mortality by Covid-19.]. *Salud pública de México*, 62(5), 582–589. <https://doi.org/10.21149/11481> Ultimo acceso: marzo 2023
- Gent, J. F., Triche, E. W., Holford, T. R., Belanger, K., Bracken, M. B., Beckett, W. S., & Leaderer, B. P. (2003). Association of low-level ozone and fine particles with respiratory symptoms in children with asthma. *JAMA*, 290(14), 1859–1867. <https://doi.org/10.1001/jama.290.14.1859>
Ultimo acceso: marzo de 2023
- Glanemann, N., Willner, S. N., & Levermann, A. (2020). Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nature communications*, 11(1), 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1>
Ultimo acceso: marzo de 2023



- Gobierno del Distrito Federal (GDF). (2017). Sistema de monitoreo atmosférico. Ciudad de México. Disponible en: <http://www.aire.df.gob.mx/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023) Información sobre el monitoreo atmosférico en la Ciudad de México. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27YqBhnmI=%27>
Ultimo acceso: abril de 2023
- Greenpeace. (2020) Reporte Anual. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2021/05/5f6396a6-reporte-anual-2021.pdf> Recuperado en marzo de 2023
- Health Effects Institute. (2019). State of Global Air 2019. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf
Ultimo acceso: diciembre de 2022
- Hillier, Frederick S., Lieberman, Gerald J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones 9a. edición México McGraw-Hill.
- Holmes, J., & Hassini, S. (2021). Discrete-Time Markov Chain Modelling of the Ontario Air Quality Health Index. Water, air, and soil pollution, 232(4), 158. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05096-1> Ultimo acceso: octubre de 2022
- INECC, & UNAM. (2015a). Climatología de referencia (SMN 1961-2000, 30"x 30"). <https://www.repositorionacionalcti.mx/recurso/f756a4c8-fb5f-4f6d-ab46-62fb097e988a>
Ultimo acceso: 22 de mayo de 2023
- INEGI. (2020). Marco Geoestadístico. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Mapa>
Ultimo acceso: abril de 2023
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2022. López-Díaz F., Nava Assad Y.S., Rojas Barajas M, González Terrazas D.I. Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. pp 65.
- Jansen, M. A. K., Barnes, P. W., Bornman, J. F., Rose, K. C., Madronich, S., White, C. C., Zepp, R. G., & Andradý, A. L. (2023). The Montreal Protocol and the fate of environmental plastic debris. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00372-x> Ultimo acceso: abril de 2023
- Jáuregui Ostos, Ernesto (2000). El clima de la Ciudad de México. México, D.F.: Instituto de Geografía de la UNAM. p. 25. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=smASCDDI1_UC&lpg=PA25&dq=siglo+xix+nevada+Ciudad+Mexico&hl=es&pg=PA25&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
Ultimo acceso: enero 2023



- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
Ultimo acceso: enero 2023
- Larka Abellán, González Ortiz; Bermejo Bermejo, V; Alonso del Amo, R; Elvira Cozar, S; Rábago Juan-Aracil, I; García Vivanco, M. (2010). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (MARM) y el Centro de Investigaciones , Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Ozono_tcm30-188049.pdf Ultimo acceso: noviembre de 2022
- Lei, W., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., and Molina, L. T. (2008). Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7571–7581, <https://doi.org/10.5194/acp-8-7571-2008> Ultimo acceso: marzo de 2023
- Nuvolone, D., Petri, D., & Voller, F. (2018). The effects of ozone on human health. *Environmental science and pollution research international*, 25(9), 8074–8088. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3> Ultimo acceso: enero de 2023
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. 1era Edición México D.F.: Reverte.
- Martínez D. (2014). Esquema del principio de operación para un analizador de ozono [Figura] Recuperado de: <https://es.slideshare.net/Dalexandromv/aparatos-con-los-que-se-mide-la-contaminacin> Ultimo acceso: enero de 2023
- Mickwitz, P. (2003). A framework for evaluating environmental policy instruments: Context and key concepts. *Evaluation*, 9(4), 415-436. <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1356389003094004>
Ultimo acceso: diciembre de 2022
- OMS-CEPIS. (2009). *Guías para la Calidad del Aire*. Ginebra, Suiza, 236 pp. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/68907>
- Peralta, O., Ortínez-Alvarez, A., Torres-Jardón, R., Suárez-Lastra, M., Castro, T., & Ruíz-Suárez, L. G. (2021). Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *The Science of the total environment*, 761, 143183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.1431831>
Ultimo acceso: diciembre de 2022
- PUEC-UNAM, 2016 con datos de INEGI - DENUE, 2016. Decreto Zona de Monumentos Históricos, GODF, 11-04-1980. Disponible en: http://maya.puec.unam.mx/planmanejoch/Funcionalidad_seguridad.php
Ultimo acceso: febrero 2023



- Pulikesi, M., Baskaralingam, P., Rayudu, V. N., Elango, D., Ramamurthi, V., & Sivanesan, S. (2006). Surface ozone measurements at urban coastal site Chennai, in India. *Journal of hazardous materials*, 137(3), 1554–1559. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.040>
Ultimo acceso: enero 2023
- Rafael Borge, Julio Lumbreras, Javier Pérez, David de la Paz, Michel Vedrenne, Juan Manuel de Andrés, M.^a Encarnación Rodríguez. (2014). Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain), *Science of The Total Environment*, Volumes 466–467, Pages 809-819, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.093>.
Ultimo acceso: abril de 2023
- Relieve Montañoso de la ZMVM. (2017). Recuperado en abril de 2023 de: Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Disponible en: http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html
Ultimo acceso: abril de 2023
- Riojas H., Alamo U., Texcalac J. y Romieu I. (2009). Estado del conocimiento sobre los efectos en la salud asociados a la contaminación del aire en la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, INSP. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/spm/v55n6/v55n6a13.pdf>
Ultimo acceso: marzo 2023
- Romanello, M., McGushin, A., Di Napoli, C., Drummond, P., Hughes, N., Jamart, L., Kennard, H., Lampard, P., Solano Rodriguez, B., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Chu, L., Ciampi, L., Dalin, C., Dasandi, N., ... Hamilton, I. (2021). The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. *Lancet* (London, England), 398(10311), 1619–1662. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6) Ultimo acceso: octubre de 2022
- Ross, S. M. (2014). Introduction to probability models. 9th Edition. Academic press. <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/procesos/libros/book8pe.pdf>
- SEDEMA. (2005). Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2006. Ciudad de México. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001>
[2006/descargas/informe_climatologico_ambiental_valle_mexico_2005.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001)
Ultimo acceso: noviembre 2022
- SEDEMA. PROAIRE (2018), Monitoreo Atmosférico recuperado en enero de: <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/monitoreo/> Ultimo acceso: marzo 2023



- SEMARNAT. (2014). El Medio Ambiente en México 2013 2014., Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/00_mensajes.html
Ultimo acceso: marzo de 2023
- SEMARNAT, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, & Secretaría de Salud. (2001). Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf Ultimo acceso: abril de 2023
- SEMARNAT. (2023) SEMARNAT. Recuperado en de mayo de 2023 de Antecedentes. Disponibles en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5681811&fecha=07/03/2023#gsc.tab=0
Ultimo acceso: abril de 2023
- Stedman, D. (1987). Ozone. In: Climatology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4_131 Ultimo acceso: diciembre de 2023
- Stedman, John. (2004). The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. Atmospheric Environment. 38. 1087-1090. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.011> Ultimo acceso: mayo de 2023
- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., Astrom, C., Guo, Y., Honda, Y., Hondula, D. M., Abrutzky, R., Tong, S., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Kan, H., Osorio, S., Kyselý, J., ... Gasparrini, A. (2021). The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature climate change*, 11(6), 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x> Ultimo acceso: febrero de 2023
- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., Astrom, C., Guo, Y., Honda, Y., Hondula, D. M., Abrutzky, R., Tong, S., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Kan, H., Osorio, S., Kyselý, J., ... Gasparrini, A. (2021). The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature climate change*, 11(6), 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x> Ultimo acceso: enero de 2023
- Wayne L., Winston. (2008). Investigación de operaciones. Aplicaciones y algoritmos 4a. edición México Thomson.



- WHO (2018). Calidad del aire y salud. Recuperado en abril de [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) Ultimo acceso: mayo de 2023

- Wolfram, M. (2016). Conceptualizing urban transformative capacity: A framework for research and policy. *Cities*, 51, 121-130.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275115300032>
Ultimo acceso: mayo de 2023

- Woodruff, T. J., Darrow, L. A., & Parker, J. D. (2008). Air pollution and post neonatal infant mortality in the United States, 1999-2002. *Environmental health perspectives*, 116(1), 110–115.
<https://doi.org/10.1289/ehp.10370> Ultimo acceso: mayo de 2023