

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOAEROSOLES  
GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES”

## TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS

**PRESENTA**

Q.I. Lupita Gisel Yocupicio Yocupicio

Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones  
**CO-DIRECTOR DE TESIS**

Dra. Lilia Angélica Hurtado Ayala  
**DIRECTORA DE TESIS**

**Universidad Autónoma de Baja California**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**  
**COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

FOLIO No. 236

Tijuana, B. C., a 2 de febrero de 2018

C. Lupita Gisel Yocupicio Yocupicio  
Pasante de: Maestro en Ciencias  
Presente

El tema de ~~trabajo y/o tesis para su examen~~ profesional, en la  
Opción TESIS

Es propuesto, por los C. Dres. Lilia Angélica Hurtado Ayala y Javier Emmanuel  
Castillo Quiñones

Quienes serán las responsables de la calidad de trabajo que usted presente,  
referido al tema "IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOAEROSOL  
GENERADOS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"


el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:


- I.- INTRODUCCION
- II.- ANTECEDENTES
- III.- OBJETIVO
- IV.- HIPOTESIS
- V.- METODOLOGIA
- VI.- JUSTIFICACION
- VII.- PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA
- VIII.- RESULTADOS Y DISCUSION
- IX.- CONCLUSIONES

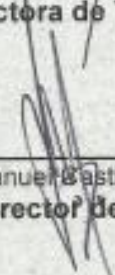
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA

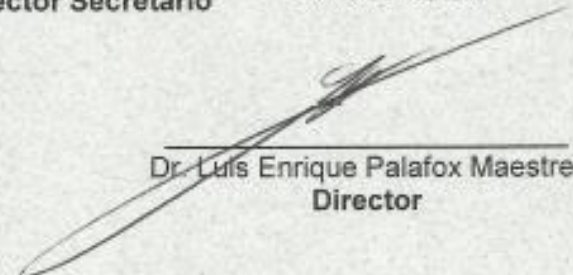


FACULTAD DE CIENCIAS  
QUÍMICAS E INGENIERÍA

  
C. Dra. Lilia Angélica Hurtado Ayala  
Directora de Tesis

  
Dr. José Luis González Vázquez  
Sub-Director Secretario

  
Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones  
Co-Director de Tesis

  
Dr. Luis Enrique Palafox Maestre  
Director

## INDICE

### Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>11</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>12</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>I. ANTECEDENTES</b> .....	<b>13</b>
<b>I.1. AIRE</b> .....	<b>13</b>
I.2. MICROBIOLOGÍA DEL AIRE.....	14
<b>I.3. FACTORES QUE AFECTAN LA SUPERVIVENCIA Y DISPERSIÓN DE LOS MICROORGANISMOS EN EL AIRE</b> .....	<b>14</b>
I.3.1. HUMEDAD RELATIVA .....	14
I.3.2. TEMPERATURA .....	15
I.3.3. LUZ ULTRAVIOLETA .....	16
I.3.4. DISPONIBILIDAD DE AGUA Y NUTRIENTES .....	16
I.3.5. TOPOGRAFÍA .....	16
I.3.6. VIENTO Y TURBULENCIA .....	16
I.3.7. CICLOS DIURNOS .....	17
I.3.8. DISPERSIÓN E INVERSIÓN TÉRMICA .....	17
<b>I.4. BIOAEROSOLES</b> .....	<b>18</b>
<b>I.4.1. GENERACIÓN DE BIOAEROSOLES</b> .....	<b>19</b>
I.4.1.1. FUENTES NATURALES .....	20
I.4.1.2. FUENTES ANTROPOGÉNICAS .....	20
<b>I.5. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)</b> .....	<b>22</b>
I.5.1.1. Tratamiento Primario.....	23
I.5.1.2. Tratamiento Secundario .....	24
I.5.1.3. Tratamiento Terciario .....	24
I.5.1.4. Tratamiento fisicoquímico.....	25
I.5.1.5. Tratamiento de lodos.....	25
I.5.1.6. Microbiología de los sistemas de tratamiento de aguas residuales .....	27
<b>I.6. MUESTREADORES DE BIOAEROSOLES</b> .....	<b>30</b>
I.6.1. Impactador de cascada.....	30
I.6.2. Impactadores en liquido (Impingers) .....	31

I.6.3. <i>Impingers con fraccionamiento de tamaño</i> .....	32
I.6.4. <i>Muestreadores de centrifuga</i> .....	33
I.6.5. <i>Muestreadores multiorificio</i> .....	34
<b>I.7. STAPHYLOCOCCUS AUREUS RESISTENTE A METICILINA.</b> .....	<b>34</b>
I.7.1. <i>Reacción en cadena de la Polimerasa (PCR)</i> .....	35
<b>II. METODOLOGÍA</b> .....	<b>36</b>
<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>45</b>
RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS .....	55
<b>RESULTADOS ANÁLISIS DE PCR</b> .....	<b>61</b>
<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b> .....	<b>62</b>
<b>IV. CONCLUSIÓN</b> .....	<b>63</b>
<b>V. REFERENCIAS</b> .....	<b>64</b>
<b>CIBERGRAFÍA</b> .....	<b>71</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>71</b>

## Índice de Tablas

---

Tabla I. Composición biológica de los bioaerosoles	15
Tabla II. Fuentes naturales y antropogénicas que contribuyen a incrementar la concentración de bacterias a la atmósfera.	17
Tabla III. Lista de virus, bacterias y protozoos que pueden causar enfermedades.	18
Tabla IV. Métodos de tratamiento químico para distintos contaminantes.	20
Tabla V. Bacterias patógenas asociadas al tratamiento de aguas residuales.	23
Tabla VI. Capacidad y caudal de las plantas de tratamiento de aguas residuales.	34
Tabla VII. Nomenclatura de las muestras.	39
Tabla VIII. Condiciones de reacción <i>mec A</i> .	40
Tabla IX. Secuencias de los oligonucleótidos y su localización en el gen <i>mecA</i> .	40
Tabla X. Estadísticas descriptivas de las PTAR durante el muestreo marzo-noviembre.	41
Tabla XI. Correlación de Sperman: UFC vs Parámetros meteorológicos.	46
Tabla I Géneros bacterianos encontrados en el aire durante el muestreo de las 4 plantas de tratamiento de aguas residuales.	54
Tabla IIIII. Bacterias presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales “Monte de los Olivos”.	55
Tabla XIV. Bacterias presentes en la Planta de tratamiento de aguas residuales “La Morita”.	56
Tabla XV. Bacterias presentes en las PTAR de la ciudad de Rosarito.	57
Tabla XVI. Análisis comparativo de estudios de bioaerosoles en PTAR de diferentes partes del mundo.	58
Tabla XVII. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales "Monte de los Olivos".	67
Tabla XVIII. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Morita”.	68
Tabla XIX. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales “Rosarito Norte”.	69

---

Tabla XX. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales “Rosarito 1”.	70
Tabla XXI. Medidas de condiciones ambientales por estación del año.	70
<hr/>	
Índice de Graficas	
Grafica I Muestras cultivables.	52
Grafica III. Morfología celular de las bacterias encontradas durante los muestreos.	53
Grafica IV Porcentaje de enterobacterias presentes en el aire.	54
<hr/>	
Índice de figuras	
Figura 1. Tiempo de supervivencia de los microorganismos en la atmósfera.	12
Figura 2. Ciclos diurnos.	14
Figura 3. Etapas de la línea de agua, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha, en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.	19
Figura 4. Proceso de tratamiento de lodos.	22
Figura 5. Diagrama de flujo de Descomposición de la materia orgánica en anaerobiosis desarrollado por Parkin y Owen, 1986.	26
Figura 6. Impactador de cascada.	27
Figura 7. Impingers con fraccionamiento de tamaño.	28
Figura 8. Impingers con fraccionamiento de tamaño.	29
Figura 9. Biotest RCS.	29
Figura 10. Muestreador M air T.	30
Figura 11. Mapa de Ciudades de Muestreo Fuente.	33
Figura 12. Ubicación de las cuatro PTAR muestreadas.	34
Figura 13. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR “Monte de los Olivos”.	35

---

Figura 14. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR “La Morita”.	36
Figura 15. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR “Rosarito Norte”.	36
Figura 16. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR “Rosarito 1”.	37
Figura 17. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m <sup>3</sup> por proceso en la PTAR Monte de los Olivos.	44
Figura 18. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m <sup>3</sup> por proceso en la PTAR La Morita.	45
Figura 19. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m <sup>3</sup> por proceso en la PTAR Rosarito Norte.	46
Figura 20. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m <sup>3</sup> por proceso en la PTAR “Rosarito 1”.	47
Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes “Monte de los olivos” comparación entre procesos.	50
Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes “La Morita” comparación entre procesos.	51
Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes “Rosarito Norte” comparación entre procesos.	52
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes “Rosarito 1” comparación entre procesos.	53
Figura 25. Electroforesis.	59
Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes “Monte de los olivos” comparación de estaciones.	72
Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes “La Morita” comparación entre estaciones del año.	73
Figura 28. Diagrama de cajas y bigotes “Rosarito Norte” comparación entre estaciones del año	74
Figura 29. Diagrama de cajas y bigotes “Rosarito 1” comparación entre estaciones del año	75
Figura 19. Caja Petri lista para el conteo de unidades formadoras de colonias.	76

---

---

Figura 20. Agar Mckonkey con crecimiento de cepa lactosa positivo	76
Figura 21. Pruebas bioquímicas	77
Figura 22. Pruebas bioquímicas II	77
Figura 23. Muestreador M air T	77

---

## RESUMEN

**Antecedentes.** Los bioaerosoles son partículas aerotransportables de origen biológico, esto incluye bacterias, hongos, virus, polen y/o fragmentos de productos metabólicos. Las principales actividades antropogénicas generadoras de bioaerosoles y consideradas potenciales fuentes de emisión, por liberar una gran cantidad de microorganismos a la atmósfera, se encuentran asociadas a sistemas de tratamiento de aguas residuales, entre otros. La inhalación de estos bioaerosoles puede causar enfermedades respiratorias, severas reacciones tóxicas y alergias, repercutiendo en la salud, tanto de los trabajadores de la planta de tratamiento de aguas residuales, que están en contacto directo con los focos donde se generan las emisiones, como a los habitantes de las zonas colindantes.

**Objetivo.** Identificar los focos de emisión de bioaerosoles en una planta tratadora de aguas residuales convencional así como la cuantificación de estos generados en cada operación realizada durante el tratamiento del agua residual.

**Metodología.** Se realizó una serie de muestreos en dos plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tijuana y en dos más de la ciudad de Rosarito, durante las estaciones de Primavera, Verano y Otoño. Las muestras se tomaron por impactación con un equipo Millipore M air T, las muestras fueron incubadas de inmediato, para posteriormente realizar el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC).

**Resultados.** El rango promedio de las UFC/m<sup>3</sup> fue de 51653 -119575. La especie dominante encontrada durante los muestreos fue *Shigella spp* seguido por *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus spp*.

**Conclusiones.** Se encontraron las más altas concentraciones de bioaerosoles en el proceso de cribado y compresión de lodos con concentraciones del orden de 10<sup>5</sup>.

## INTRODUCCIÓN

Los bioaerosoles son partículas aerotransportables de origen biológico con un diámetro aerodinámico comprendido entre 0.5 y 100  $\mu\text{m}$ . Esto incluye bacterias, hongos, virus, polen y/o fragmentos de productos metabólicos (endotoxinas, micotoxinas) (Walsera *et al.*, 2015). Las principales actividades antropogénicas generadoras de bioaerosoles y consideradas potenciales fuentes de emisión, por liberar una gran cantidad de microorganismos a la atmósfera, se encuentran asociadas a sistemas de tratamiento de aguas residuales, plantas de tratamiento de residuos orgánicos, compostaje o disposición en rellenos sanitarios.

La exposición a bioaerosoles puede causar enfermedades respiratorias, severas reacciones tóxicas y alergias (Park *et al.*, 2014). La inhalación de estos bioaerosoles puede afectar tanto a los trabajadores de la planta de tratamiento de aguas residuales, que están en contacto directo con los focos donde se generan las emisiones, como a los habitantes de las zonas colindantes (Sánchez-Monedero *et al.*, 2007).

El estudio de las concentraciones de contaminantes biológicos del aire en distintos microambientes, proporciona estimados de la exposición humana a éstos y sirve, además de evidenciar los riesgos para la salud, para la planificación y desarrollo de estrategias de control eficientes para reducirlos (Hurtado *et al.*, 2014).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales representan una importante fuente de aerosoles, en particular las partes con mecanismos de movimiento y donde exista aireación forzada de las aguas residuales (tanques de aireación). Las operaciones de bombeo y filtrado favorecen la formación de bioaerosoles (Sánchez-Monedero *et al.*, 2007). Las aguas residuales suelen contener grandes cantidades de diversos organismos como virus, bacterias, hongos y protozoos procedentes de reservorios humanos y animales.

Los aerosoles formados de esta manera contienen una gran variedad de microorganismos, incluyendo saprofitos predominantes, patógenos capaces de infectar al hombre a través de inhalación, contacto e ingestión (Hurtado *et al.*, 2014).

No hay muchos trabajos sobre la calidad microbiológica de las atmósferas terrestres al aire libre en las megaciudades (Dominguez *et al* 2007; Gangamma S. , 2014; Garcia Mena, *et al*

2016). En México se han realizado algunos trabajos en materia de bioaerosoles por ejemplo en Mérida, Yucatán, se realizó un estudio de cuantificación de bioaerosoles generados en plantas de tratamiento de residuos sólidos en el año 2006, donde se encontraron especies de *Aspergillus*, Coliformes, Estreptococos y Neumococos (Rodríguez, *et al.* 2006); en León Guanajuato se realizó otro estudio para cuantificar la concentración y tipo de microorganismos presentes en la atmósfera intramuros de dos hospitales en el año 2014. Donde se encontró que la concentración de UFC/m<sup>3</sup> era muy superior a lo aceptable. Se identificaron enterobacterias como *Escherichia coli*, *Enterobacter cancerogenus* y *Acinetobacter sp.*, bacterias del género *Bacillus* que fueron las Gram-positivas predominantes. Entre los hongos, *Fusarium* y *Penicillium* eran los más comunes. Así mismo se identificaron hongos de alta importancia clínica como *Microsporum audouinii*, *Cladosporium oxysporum*, *Mucor ramosissimus*, *Alternaria arborescens* y *Cryptococcus albidus*. (Maldonado-Vega et al. 2014) y en el año 2014 Hurtado realizó el primer estudio de bioaerosoles en la ciudad de Tijuana el cual tuvo como objetivo cuantificar la concentración e identificar el tipo de microorganismos patógenos presentes en la atmósfera de la ciudad, ubicando los puntos de muestreo en 12 diferentes sitios de esta. En este estudio fueron aisladas de las muestras *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterococcus faecalis* siendo estas las más comunes. En el presente estudio se cuantificó la concentración de bioaerosoles dentro de las PTAR siendo estas consideradas como uno de los principales contribuyentes antropogénicos de la emisión y propagación de genes de bacterias resistentes a antibióticos (Rizzo *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2015).

## HIPÓTESIS

La dispersión de los bioaerosoles generados en una planta de tratamiento de aguas residuales representa un riesgo para la salud de las comunidades cercanas y los empleados de estas.

## OBJETIVO GENERAL

Identificar los focos de emisión de bioaerosoles en un planta tratadora de aguas residuales convencional así como la cuantificación de estos generados en cada operación realizada durante el tratamiento del agua residual.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar muestreos en puntos críticos de las plantas tratadoras de aguas residuales (PTAR).
- Cuantificar los bioaerosoles emitidos en los distintos focos de emisión.
- Identificar microorganismos con uso de métodos de microbiología tradicional.
- Identificar microorganismos con uso de métodos de biología molecular.

## JUSTIFICACIÓN

Los microorganismos transportados por el aire y otras partículas biológicas que se encuentran en este, son de importancia considerable debido a que pueden ser causantes de algunos riesgos para la salud pública. Recientemente la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), publicó su primera lista de microorganismos patógenos prioritarios resistentes a los antibióticos donde se incluyen a las doce familias más peligrosas para la salud humana. Estos microorganismos, así como las partículas biológicas presentes en el aire pueden ser transportados en bioaerosoles, los cuales pueden ser de origen natural o antropogénico. Dentro de los bioaerosoles que se generan durante el tratamiento de aguas residuales pueden contener microorganismos patógenos, ya que estas aguas suelen contener cantidades significativas de diversos microorganismos como bacterias, hongos, virus y protozoos, que proceden de humanos y animales. La concentración de estos microorganismos depende de diferentes parámetros como el equipamiento del sistema de tratamiento, las condiciones ambientales y la capacidad de sobrevivir de los microorganismos en el aire. Las bacterias, hongos y virus sobreviven a largos viajes en la alta atmósfera, suspendidos en partículas de polvo y arena; el viento los transporta a miles de kilómetros de distancia (OMS, 2017).

La magnitud de este fenómeno, sus consecuencias ambientales y en la salud de las personas empiezan a aflorar: plagas, alergias y enfermedades aparecen en fauna y flora que no se encuentran adaptadas a las especies invasoras. Existe poca información sobre las características de la carga microbiana en el aire, una de las razones de este problema es la falta de información sobre los modelos de dispersión de estos microorganismos en el medio ambiente y su relación con los contaminantes frecuentes debido a la práctica inadecuada de descargas orgánicas y sus nutrientes para este proceso, las vías degradativas utilizadas y los principales factores que limitan la velocidad de biodegradación. La gran mayoría de los microorganismos ambientales son difícilmente cultivables con métodos convencionales, limitando la posibilidad de explorar su diversidad genética o de realizar estudios de la biodegradación de las sustancias contaminantes. Para determinar la posible contaminación respiratoria de los bioaerosoles generados en los distintos tratamientos de aguas residuales es muy importante identificar los focos emisores y las concentraciones de los aerosoles generados a lo largo de los distintos tratamientos a los que se somete el agua residual, es por eso que este proyecto en colaboración con la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) tiene como finalidad identificar los focos de emisión de aerosoles en cuatro PTAR y cuantificar las concentraciones de los bioaerosoles que se generan en cada operación realizada durante el tratamiento del agua residual.

## I. ANTECEDENTES

### I.1. Aire

La contaminación atmosférica es una de las principales causas en todo el mundo que ocasiona el aumento de la mortalidad y morbilidad en la población (Wu *et al.*, 2016). El material particulado de diámetro aerodinámico  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2.5}$ ) es comúnmente usado como indicador de la contaminación del aire y puede estar asociado a microorganismos (Balasubramanian *et al.*, 2003). La atmósfera no tiene microbiota nativa, pero es un medio rápido de dispersión para varios tipos de microorganismos (Gregory, 1973).

## I.2. Microbiología del aire

La atmósfera está constituida por un 79% de Nitrógeno, un 21% de Oxígeno, 0.034% de Dióxido de Carbono y cantidades traza de otros gases (principalmente metano y vapor de agua).

La atmósfera la seccionamos en cinco capas: Hidrósfera y Litósfera colindan con la Tropósfera que son las capas en donde la vida se desarrolla; después de la Tropósfera encontramos la Mesósfera seguida de la Termósfera y finalmente la zona más lejana a la Tierra tenemos a la Ionósfera (Atlas y Bartha, 2001).

Los microorganismos abundan en la Tropósfera y conforme aumenta la altura disminuye la posibilidad de sobrevivir en el aire y en consecuencia se tiene que es casi imposible el crecimiento de microorganismos en la parte alta de la atmósfera.

Aunque el aire no constituye un hábitat para los microorganismos que existen en él, únicamente como contaminantes accidentales, constituye un medio por el que estos son transportados a través de las corrientes de aire, el polvo aéreo y las gotas de *Flugge*. (Piatkin y Krivoshein, 1981; Herrera, 2009).

## I.3. Factores que afectan la supervivencia y dispersión de los microorganismos en el aire

Los principales factores que intervienen en la supervivencia y dispersión de los microorganismos en el aire son: Humedad relativa, temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes, luz ultravioleta, viento y turbulencia y la topografía.

### I.3.1. Humedad relativa

La humedad relativa es el parámetro medible más importante para determinar la estabilidad de los bioaerosoles. La desecación puede causar la pérdida de viabilidad en las capas más bajas de la atmósfera, especialmente durante el día. Cuando la humedad relativa disminuye, las células microbianas se deshidratan, causando su inactivación.

La humedad del aire proporciona el agua que necesitan, la intensidad lumínica y la concentración de dióxido de carbono presente en la tropósfera es suficiente para el crecimiento de organismos fotoautótrofos, y en el caso de los organismos heterótrofos los

nutrientes minerales los proporciona el material particulado que se encuentre conformando al bioaerosol (Wu *et al.*, 2003).

Algunas esporas pueden germinar en las nubes teniendo la cantidad suficiente de agua disponible para su desarrollo.

Como podemos observar en figura 1, la vida de las bacterias en una atmósfera varía respecto a su pared lipídica, las bacterias Gram negativas resisten menos una atmósfera seca en comparación con las bacterias Gram positivas.

TIEMPO DE SUPERVIVENCIA	MICROORGANISMO
10 <sup>6</sup> años	Bacilos Gram (+) no formadores de esporas, cocos
10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> años	Cocos, Actinomicetos, bacilos Gram (-), bacterias formadoras de esporas.
200 años	<i>Bacillus sp.</i> , <i>Clostridium sp.</i>
120-200 días	<i>Streptococcus pyogenes</i> , <i>Mycoplasma mycoides</i> , <i>Corynebacterium diphtheriae</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> .
60 días	<i>Mycobacterium avium</i>
12-48 horas	<i>Streptococcus salivarius</i> , <i>Neisseria gonorrhoeae</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pasteurella multocida</i> .
2-4 horas	<i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Neisseria meningitis</i> .
12-40 días	<i>Campylobacter fetus</i> , <i>Yersinia pseudotuberculosis</i> , <i>Proteus morganii</i> .

Figura 1. Tiempo de supervivencia de los microorganismos en la atmósfera, Fuente: M. Atlas, Ronald, BARTHA, Richard. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. Pearson Educación S.A.4 Ed. Madrid 2002. p. 329

### 1.3.2. Temperatura

La temperatura en la tropósfera varía de 40 °C cerca de la superficie, a -80 °C en las capas altas, alcanzándose temperaturas de congelación entre 3-5 Km. La congelación no destruye los microorganismos pero reduce su capacidad para reproducirse. En varios estudios se muestra que el incremento de la temperatura disminuye la viabilidad de los microorganismos, recordemos que la humedad relativa está relacionada con la temperatura y con esta el agua disponible en la atmósfera (Mohr, 2002).

### *1.3.3. Luz ultravioleta*

Esta energía actúa inactivando los fosfolípidos, proteínas y ácidos nucleicos de las células bacterianas.

La exposición a radiaciones longitud de onda de corta, como la luz ultravioleta es la principal causa de pérdida de viabilidad de los microorganismos que entran en la atmósfera. La radiación de longitud de onda corta (la de mayor energía) generalmente es más dañina para los microorganismos. Estudios han demostrado que la mayor concentración de microorganismos se presenta durante la noche que en el día (Balasubramanian, *et al.*, 2003; Blais *et al.*, 2012; De León *et al.*, 2013).

En la estratósfera hay una capa con una gran concentración de ozono que mata a los microorganismos, pero al mismo tiempo, actúa absorbiendo la radiación ultravioleta. Por estas razones, la estratósfera constituye una barrera para los microorganismos vivos procedentes de la tropósfera.

### *1.3.4. Disponibilidad de agua y nutrientes*

La atmósfera contiene muy poca concentración de materia orgánica, y en la mayoría de los casos, es insuficiente para permitir el crecimiento heterotrófico. El agua disponible es escasa por lo que, incluso el crecimiento de microorganismos autótrofos está limitado.

### *1.3.5. Topografía*

Las características físicas de la superficie del terreno se describen como topografía, esta se agrupa en varias categorías: llanos, montañas, valles, campos, cuerpos de agua y urbano.

La topografía causa turbulencia térmica debido al calentamiento diferencial y turbulencia mecánica como resultado del flujo de viento en medio de diferentes estructuras y tamaños de edificios.

### *1.3.6. Viento y turbulencia*

La velocidad y dirección del viento transportan los contaminantes que dependen de la estructura térmica de la atmósfera para su desplazamiento, que se presenta por compresión (aumento de la temperatura) y descompresión adiabática (disminución de la temperatura),

permitiendo por convección (vertical ascendente), advección (horizontal) y subsidencia (vertical descendente).

### *1.3.7. Ciclos diurnos*

La concentración de los bioaerosoles en la atmósfera está en función de los ciclos diurnos, como se muestra en la figura 2 incrementa al amanecer, tiene su máximo al medio día, disminuye en la tarde y en la noche se presentan las más bajas concentraciones de nueve de la noche a cinco de la mañana. Las perturbaciones de estas condiciones surgen debido a la advección del aire durante el día, resultando en reducción de la concentración y durante la noche un incremento en la concentración por el ingreso de bioaerosoles de fuentes distantes.

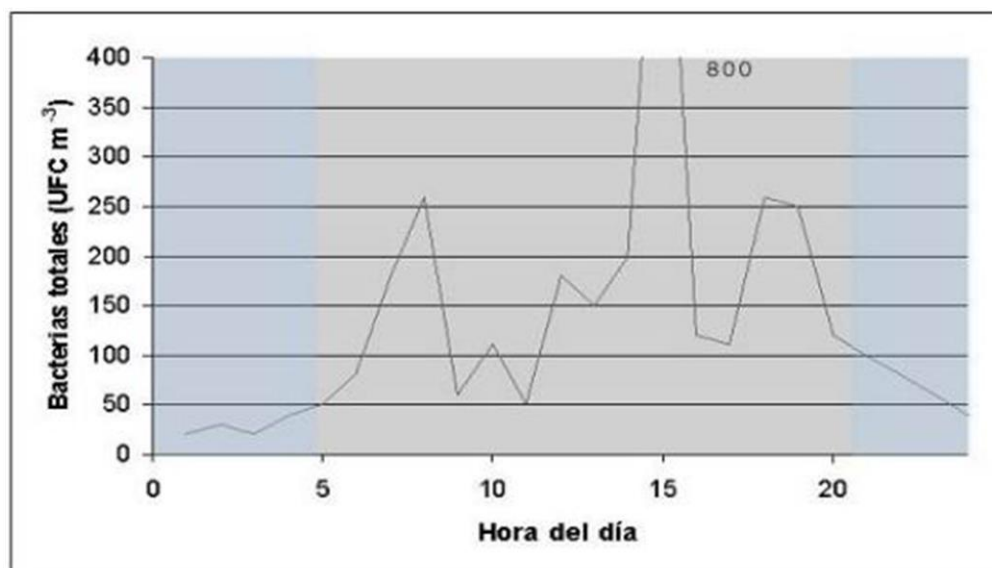


Figura 2. Ciclos diurnos Lighthart, (1997).

### *1.3.8. Dispersión e inversión térmica*

Para que los contaminantes sean dispersos en el aire se requieren condiciones de inestabilidad atmosférica, que se da por diferencia en las características térmicas de una parcela de aire contaminada, permitiendo que el contaminante no vuelva a su altura inicial, al mantener su temperatura mayor que la temperatura del aire en la misma altitud.

El fenómeno que dificulta este tipo de desplazamiento es la inversión térmica que se presenta cuando la temperatura del ambiente aumenta con la altitud, por lo tanto, la parcela de aire a medida que incrementa su altura tendrá una temperatura menor a la del aire ambiente sin dejarla pasar de esta posición, lo cual aumenta su concentración en el lugar donde fueron emitidos. Los contaminantes que no se pueden dispersar verticalmente lo pueden hacer horizontalmente a través de los vientos superficiales, incrementando el factor de riesgo para la salud de la población.

#### I.4. Bioaerosoles

Una clase de contaminantes en el aire, los bioaerosoles, son partículas generalmente asociadas con los compuestos de origen biológico. Esta definición incluye todos los patógenos y no patógenos, hongos y bacterias viables y no viables, endotoxinas bacterianas, micotoxina, peptidoglucanos,  $\beta(1,3)$ -glucano, virus, alérgenos de alto peso molecular, polen, etc. (Douwes *et al.*, 2003; Sykes *et al.*, 2007; Le Goff *et al.*, 2012).

La exposición a bioaerosoles puede causar enfermedades respiratorias, severas reacciones tóxicas y alergias (Park *et al.*, 2014). La inhalación de estos bioaerosoles puede afectar tanto a los trabajadores de la planta, que están en contacto directo con los focos donde se generan las emisiones, como a los habitantes de las zonas colindantes (Sánchez-Monedero *et al.*, 2007).

El estudio de las concentraciones de contaminantes biológicos del aire en distintos micro-ambientes (Tabla I), proporciona estimados de la exposición humana a éstos y sirve, además de evidenciar los riesgos para la salud, para la planificación y desarrollo de estrategias de control eficientes para reducirlos (Hurtado *et al.*, 2014).

Tabla I. Composición biológica de los bioaerosoles

<b>Organismo</b>	<b>Unidad transportada</b>	<b>Ejemplo organismos</b>	<b>de</b>	<b>Efectos humanos primarios</b>	<b>Tipos de vida</b>	<b>de Fuentes</b>
<b>Bacteria</b>	Organismos	Legionella		Neumonía	Parasitos facultativos	Torres de refrigeración
	s	Termoactinomyces		Fiebre,		Fuente de agua caliente
	Esporas	Endotoxinas		escalofríos	Saprofitos	Reservorio de agua estancada.
	Productos	Proteasas		Asma		Procesos industriales.
<b>Hongos</b>	Organismos	Sporobolomyces		Neumonía	Saprofitos	Superficies ambientales húmedas
	Esporas	Alternaria		Asma (Rinitis)	Saprofitos facultativo	Aire exterior
	Antígenos	Histoplasmas		Infección		Excremento de aves
	Toxinas	Glicoproteínas		sistémica		Aire exterior
	Volátiles	Aflatoxinas		Cáncer		Superficies mojadas
		Aldehídos		Irritación mucosas		Superficies mojada
<b>Protozoos</b>	Organismos	Naoglersis		Infección	Parasito	Reservorio de agua contaminada
	Antígenos	Acarnihamaebs		Neumonía		
<b>Virus</b>	Organismos	Gripe		Infección respiratoria	Parasito	Hospedero humano
<b>Algas</b>	Organismos	Chlorococcus		Asma, rinitis	Autótrofo	Aire exterior
<b>Plantas verdes</b>	Polen	Ambrosia spp		Asma, rinitis	Autótrofo	Aire exterior
<b>Artropodos</b>	Heces	Dermatophagoides		Asma, rinitis	Fagótrofo	Polvo casero
<b>Mamíferos</b>	Escamas de piel,	Caballos		Asma, rinitis	Autótrofo	Caballos y gatos
	saliva	Gatos				

Adaptado de: NTP 288. Síndrome del edificio enfermo: enfermedades relacionadas y papel de los bioaerosoles. Ministerio de trabajo y asuntos sociales. España (2003).

#### I.4.1. Generación de Bioaerosoles

La generación de bioaerosoles puede ser de manera natural o por actividad antropogénica, su origen puede ser cualquier superficie como agua, suelo, actividades tales como el caminar de las personas.

#### I.4.1.1. Fuentes naturales

La materia en descomposición y el excremento de los animales son fuentes de bacterias que pueden transportarse por el aire en condiciones favorables. Los animales y el hombre pierden escamas de piel y cabello que pueden ser fuentes de bacterias, virus y hongos. Las personas descargan bacterias y a veces virus en el aire, al hablar, toser y estornudar, aunque la contribución de estas fuentes para el contenido bioaerosoles general se considera que es pequeña (Tilley, 1997).

#### I.4.1.2. Fuentes antropogénicas

Las principales actividades antropogénicas generadoras de bioaerosoles consideradas potenciales fuentes de emisión, por liberar una gran cantidad de microorganismos a la atmósfera, se encuentran asociadas a sistemas de tratamiento de aguas residuales, plantas de tratamiento de residuos orgánicos, compostaje o disposición en rellenos sanitarios (Tabla II).

Tabla II. Fuentes naturales y antropogénicas que contribuyen a incrementar la concentración de bacterias a la atmósfera.

Fuente	$\frac{UFC}{m^3}$	
<b>Naturales</b>	Costa	ND – 560
	Bosques	385 – $1.2 \times 10^3$
	Pastizales	127 – 587
	Matorral desértico	2 – 283
<b>Antropogénicas</b>	Zona urbana	539 – $7.2 \times 10^3$
	Calles transitadas	100 – $13 \times 10^3$
	Parques	100- $2.5 \times 10^3$
	Estación de transferencia de basura	$350 – 14 \times 10^3$
	Planta recicladora de basura	$1.1 \times 10^3 – 2.8 \times 10^7$
	Planta de composteo	$1 \times 10^3 – 11 \times 10^6$
	Planta de tratamiento de aguas residuales	$1 \times 10^2 – 2 \times 10^5$
	Zona rural	202 – $3.4 \times 10^3$
Campo agrícola	46 – $6.5 \times 10^3$	
Empacadora de algodón	$3.3 \times 10^6 - 19 \times 10^6$	

Adaptado de: Rosas, 2004, UFC: unidades formadoras de colonia; ND: no detectable

La atmósfera en general no se considera un hábitat de los microorganismos, ya que solo algunos de ellos son capaces de reproducirse allí. Sin embargo su presencia en ella tiene gran relevancia por el grado de dispersión que pueden adquirir.

La supervivencia y distribución de las bacterias en la atmósfera están moduladas por factores biológicos, meteorológicos (viento, radiación solar, temperatura, humedad relativa) y por la química atmosférica.

Su presencia en la atmósfera ha sido demostrada por su crecimiento en medios de cultivo (denominándose cultivables); sin embargo, se considera que esto representa solo una pequeña fracción de la población que llega a esta, de tal forma que la mayoría podría encontrarse en forma no cultivable.

A la tropósfera o atmósfera baja (que comprende los primeros diez kilómetros), por su cercanía a los ecosistemas terrestres y acuáticos, llegan las diversas partículas biológicas en sus formas esporuladas o vegetativas, por mecanismos activos o pasivos; se distribuirán vertical y horizontalmente lo que les proporcionará flotación y movimiento.

Los microorganismos cumplen con funciones de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica. Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos. En la tabla III se enlistan las virus, bacterias y protozoos en la atmósfera que pueden ocasionar enfermedades en humanos.

Tabla III. Lista de virus, bacterias y protozoos que pueden causar enfermedades.

Grupo Biológico	Organismo	Enfermedad
<b>Virus</b>	<i>Poliovirus</i>	Hepatitis A
	<i>Echovirus</i> <i>Rotavirus</i>	Hepatitis Fiebres, diarrea gastroenteritis
<b>Bacterias</b>	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
	<i>Salmonella typhi</i>	Tifus
	<i>Salmonella paratyphi</i>	Paratíficas
	Otras <i>Salmonellas</i>	Gastroenteritis
	<i>Shigella spp</i>	Disentería bacilar
<b>Protozoos</b>	<i>Leptospira spp</i>	Fiebre
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Abscesos hepáticos
	<i>Gardia lambia</i>	Disentería amebiana
	<i>Baltidium coli</i>	Diarreas
		Diarreas

Adaptado de “Wastewater Pathogens”, Gerardi y Zimmerman, 2005.

### I.5. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

Los bioaerosoles de los procesos de una PTAR son un subgrupo significativo de los aerosoles en la atmósfera. Los sistemas de aireación son considerados las principales fuentes de bioaerosoles en plantas de tratamiento de aguas residuales (Xuesong *et al.*, 2014).

Las aguas residuales pueden definirse como aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos comerciales e industriales, a los que pueden agregarse eventualmente aguas superficiales, subterráneas y pluviales (Metcalf y Eddy, 1996).

Las aguas residuales son tratadas con una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para remover y eliminar los elementos responsables de la contaminación en el agua.

#### I.5.1. Sistemas de tratamientos de aguas residuales

Un sistema de tratamiento de aguas residuales es una combinación de operaciones unitarias y procesos unitarios diseñados para reducir los contaminantes a un nivel aceptable. El término unidad de operación se refiere a procesos que usan métodos de tratamiento biológicos y/o químicos. Las operaciones y los procesos de la unidad se pueden agrupar para proporcionar los siguientes niveles de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2003).

Los procesos se combinan y complementan para dar lugar a cuatro niveles de tratamiento de las aguas residuales, su clasificación y objetivos se muestran en la figura 3.

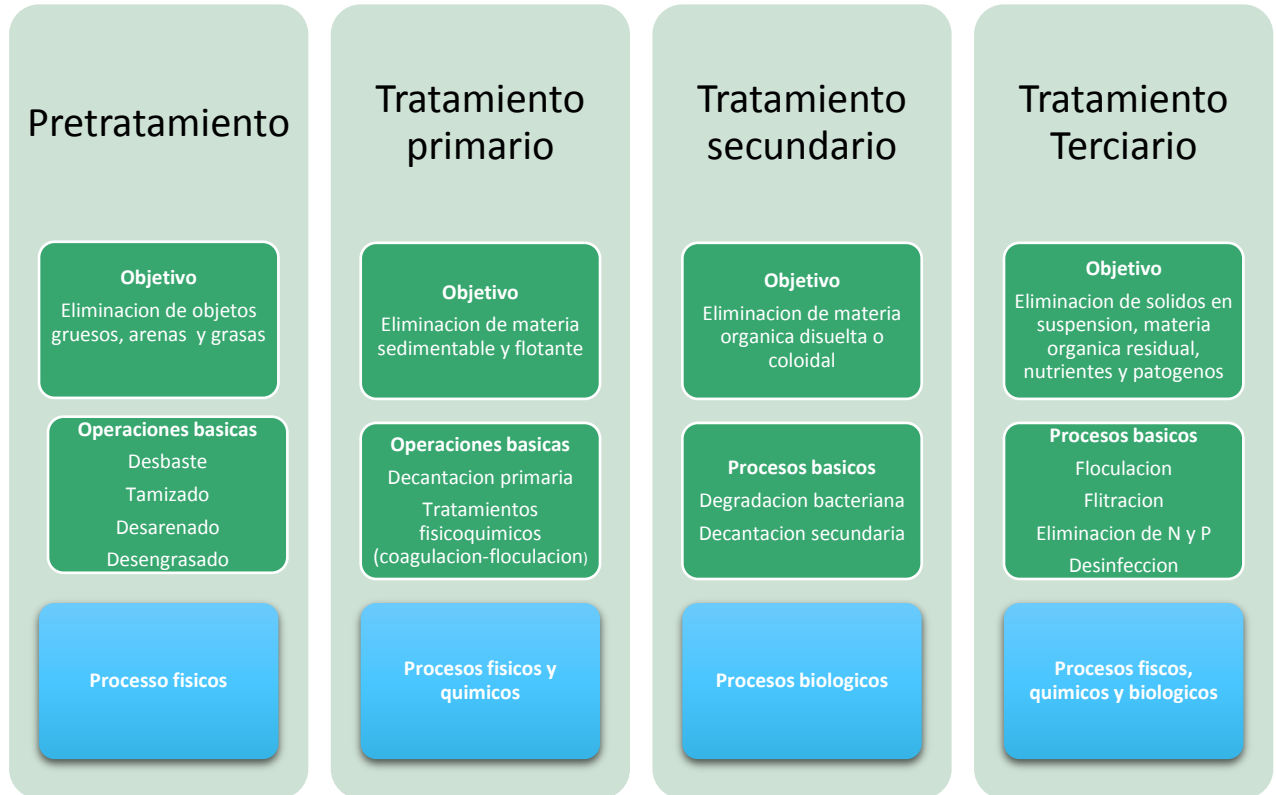


Figura 3. Etapas de la línea de agua, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha, en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

#### 1.5.1.1. Tratamiento Primario

Su propósito principal es remover del agua residual, aquellos contaminantes que flotan o sedimentarán.

Los sistemas primarios son los más sencillos en la limpieza del agua y “tienen la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones puedan obstruir o dificultar los procesos consecuentes”. Estos tratamientos son, el cribado o mallas de barreras, la flotación o eliminación de grasas y la sedimentación (Rodie y Hardenberg, 1987).

### 1.5.1.2. Tratamiento Secundario

Su propósito es remover la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) soluble que escapa del proceso primario y provee una remoción adicional de los sólidos suspendidos. Las condiciones mínimas para tener un eficiente tratamiento secundario son las siguientes:

- Abundante disponibilidad de organismos vivos.
- Disponibilidad de abundante oxígeno.
- Condiciones de pH y temperatura óptimas.
- Una superficie o un espacio para el contacto entre los líquidos residuales y los microorganismos.

### 1.5.1.3. Tratamiento Terciario

Tiene como objetivo eliminar nutrientes, metales pesados, orgánicos recalcitrantes y sólidos disueltos. Los principales se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Métodos de tratamiento químico para distintos contaminantes

Remoción de:				
Fosforo	Nitrógeno	Metales pesados	Orgánicos recalcitrantes	Sólidos disueltos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cal (elevar pH y precipitar)</li> <li>• Alúmina activada</li> </ul>	<p><i>Métodos físicoquímicos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción con aire, intercambio selectivo de iones</li> </ul> <p><i>Métodos biológicos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitrificación, desnitrificación, biosíntesis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitación con cal</li> <li>• Resinas de intercambio catiónico</li> <li>• Electrodeposición o electrodiálisis</li> <li>• Cementación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción de carbón activado</li> <li>• Resinas organofílicas</li> <li>• Polímeros sintéticos o naturales</li> <li>• Oxidación fuerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbón activado</li> <li>• Oxidación fuerte</li> </ul>

#### *1.5.1.4. Tratamiento fisicoquímico*

Es una combinación del tratamiento primario y terciario. No incluye tratamiento biológico, este es rápido ya que no se tiene el tiempo de espera para que inicie la actividad metabólica de los microorganismos.

#### *1.5.1.5. Tratamiento de lodos*

Líquido viscoso o emulsión que contiene los compuestos que le dan el carácter ofensivo a las aguas y líquidos residuales.

Los lodos no se pueden eliminar como cualquier residuo, ya que tiene todos los contaminantes que tiene el agua residual. El proceso de lodos activados es uno de los procesos biológicos más comúnmente utilizado tanto en aguas residuales municipales como industriales (WEF, 2008). En la figura 4 se muestra el proceso típico para lodos activados.

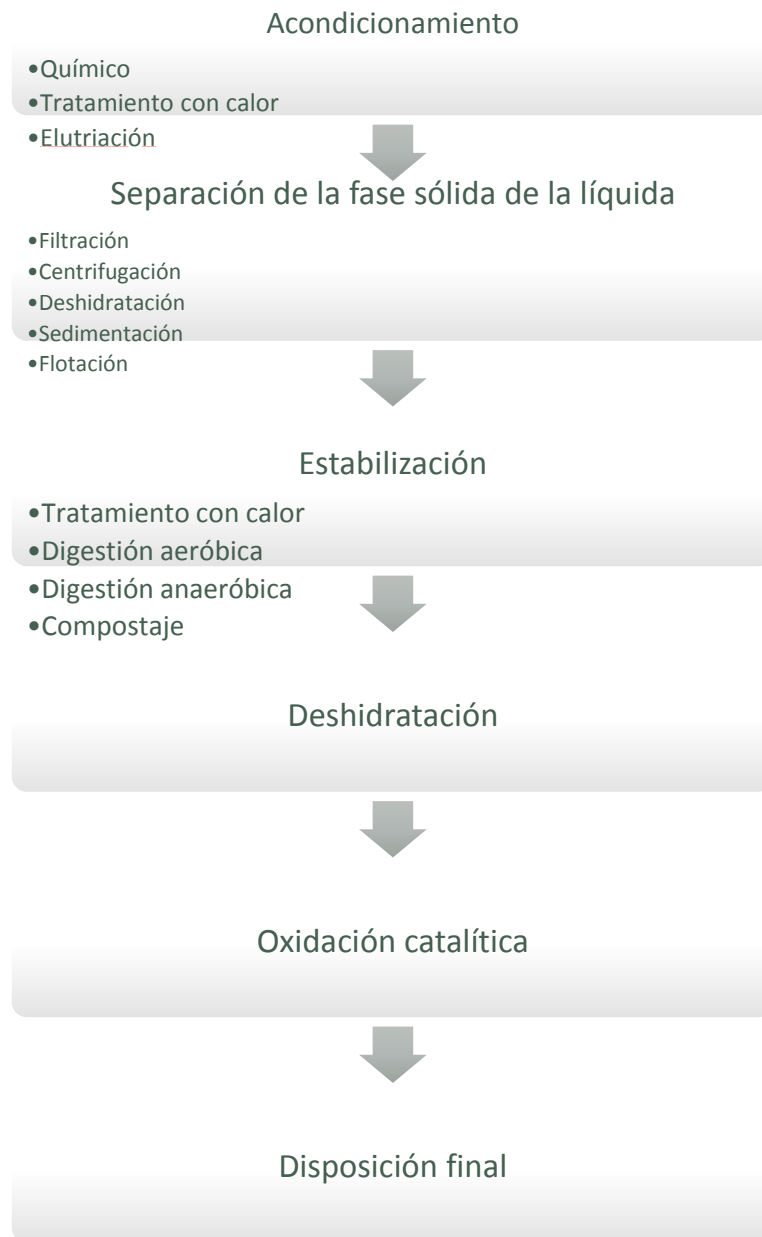


Figura 4. Proceso de tratamiento de lodos adaptado de WEF, 2008.

Durante la digestión aerobia de la materia orgánica es donde principalmente ocurre la aerosolización de microorganismos por el proceso de aireación. El número de microorganismos en el aire aumenta rápidamente con el tamaño de burbuja (Warneck, 1988), por lo que el tipo de sistema de aireación influye mucho en la producción de aerosoles (Brandi *et al.*, 2000; Bauer *et al.*, 2002; Sánchez -Monedero *et al.*, 2008).

En la tabla V se muestra una lista con las principales bacterias patógenas asociadas al tratamiento de aguas residuales.

Tabla V. Bacterias patógenas asociadas al tratamiento de aguas residuales

<i>Bacteria</i>	<i>Enfermedad</i>
<i>Actinomyces israelii</i>	Actinomycosis
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Clostridium perfringens</i>	Gangrena
<i>Clostridium tetani</i>	Tetanos
<i>Escherichia coli-enteroinvasive</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli-enteropathogenic</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli-enterotoxigenic</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli-enterohemorrhagic</i> <i>O157:H7</i>	Gastroenteritis y síndrome hemolítico urémico
<i>Leptospira interrogans</i>	Leptospirosis
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculosis
<i>Nocardia spp</i>	Nocardosis
<i>Salmonella paratyphi</i>	Fiebre paratifoidea
<i>Samonella spp</i>	Salmonelosis
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Shigella spp</i>	Shigellosis
<i>Vibrio chlerae</i>	Cólera
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Gastroenteritis
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis (diarrea con sangre)

Adaptado de El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. De la Rosa *et al.* 2002

#### *1.5.1.6. Microbiología de los sistemas de tratamiento de aguas residuales*

La función que tienen los microorganismos en las PTAR es completar el ciclo de degradación para su crecimiento y reproducción del material orgánico desechado por los organismos superiores. En este proceso en que los diferentes microorganismos consumen el sustrato en su propio beneficio, remueven el material orgánico presente en las aguas residuales generando nuevas células y gases inocuos que se emiten a la atmósfera, limpiando el agua de la materia orgánica disuelta.

Los principales objetivos del tratamiento biológico en aguas residuales, es coagular y remover los sólidos coloidales no sedimentables, y estabilizar la materia orgánica. Para las aguas de origen doméstico y agrícola es estabilizar la materia orgánica y los nutrientes como nitrógeno y fósforo; para las aguas industriales es remover o reducir la cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos que éstas puedan contener. Estas últimas, frecuentemente

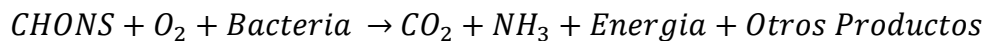
contienen sustancias que son tóxicas para los microorganismos que llevan a cabo el proceso biológico de estabilización de la materia orgánica, por lo que, de ser así, los emisores responsables que generan estos desechos deben efectuar un pretratamiento previo de sus aguas, tratando de remover dichas sustancias.

Los procesos para la degradación de la materia orgánica donde participan las bacterias son la digestión aerobia y la digestión anaerobia a continuación concisamente descritos.

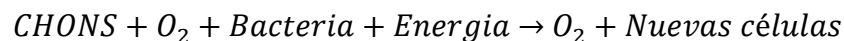
- **Digestión aerobia:** Es el proceso de descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno durante la metabolización realizada por microorganismos aerobios que descomponen la materia orgánica para la obtención de energía en su provecho. Las rutas o pasos que son parte de este tipo de metabolismo, implican la oxidación de las proteínas, las grasas y los carbohidratos en una secuencia sumamente compleja, que producen como sustancias terminales agua, bióxido de carbono, sulfatos y amoníaco. Si persisten las condiciones oxidantes, el amoníaco producido por los compuestos nitrogenados y que no escapa a la atmósfera en forma de gas, se oxida a nitritos y posteriormente a nitratos (Bitton, G.,1994).

En un proceso aeróbico los procesos pueden representarse estequiométricamente de la siguiente manera:

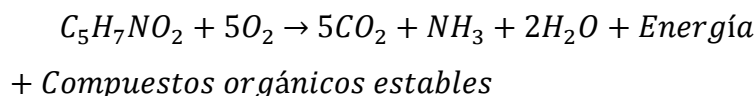
**OXIDACIÓN:**



**SÍNTESIS:**



**RESPIRACIÓN ENDÓGENA:**



En estas reacciones CHONS representa la materia orgánica en el agua residual y  $C_5H_7NO_2$  es la fórmula generalizada o fórmula más simple con que es representado el tejido celular. (Bitton, G.,1994).

- Digestión anaerobia: La oxidación anaerobia es el proceso en el cual la materia orgánica es degradada mediante el metabolismo de un grupo selecto de microorganismos que subsisten en ausencia de oxígeno, su metabolismo es muy diferente al de los microorganismos aerobios.

La digestión anaerobia ha sido y es uno de los procesos más comúnmente utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales para la estabilización de los biosólidos (Mason, 1992; Metcalf, 1991; WEF, 1992; Benefield y Randall, 1982).

La descomposición de la materia orgánica en forma anaerobia se compone de tres pasos esenciales, hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. En este proceso, un consorcio de microorganismos (Figura 5) descompone los desechos complejos en ácidos grasos volátiles, acetato, hidrógeno y metano (WEF, 2008).

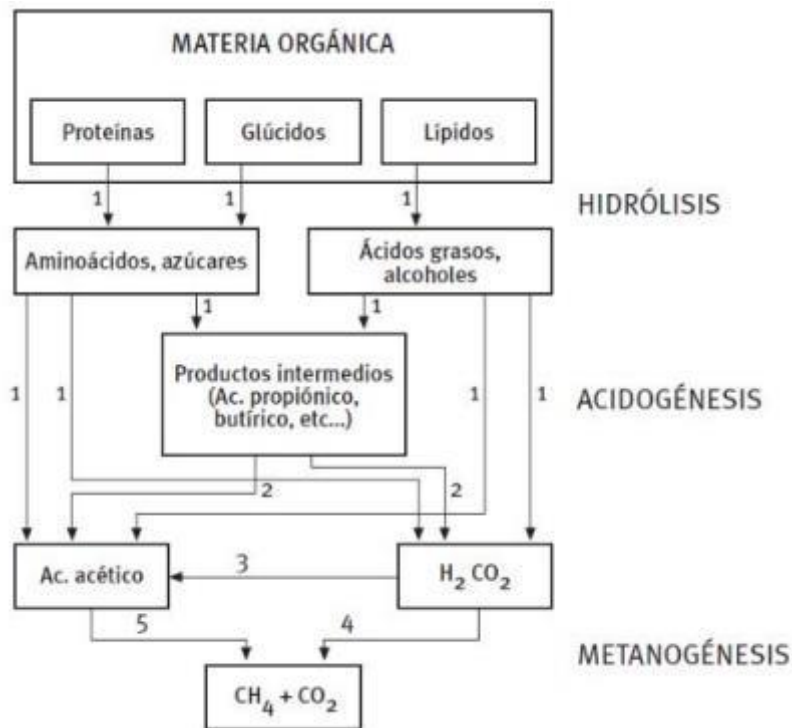


Figura 5. Diagrama de flujo de Descomposición de la materia orgánica en anaerobiosis desarrollado por Parkin y Owen, 1986.

## I.6. Muestreadores de bioaerosoles

Existen distintos tipos de muestreadores para aislar bacterias en el aire. A continuación, se describirán los más ampliamente usados para este objetivo.

### I.6.1. Impactador de cascada

El más usado en los estudios aerobiológicos es el impactador para partículas viables Andersen (figura 6). Este equipo está constituido por una serie de seis placas de aluminio, cada una con 400 orificios con un diámetro que disminuye sucesivamente para incrementar la velocidad del aire en cada siguiente etapa. Por medio de una bomba de vacío succiona un flujo de aire de 28.3 L/min. Las partículas que son acarreadas en la corriente de aire, con un diámetro aerodinámico entre >15 a 1 µm, son separadas por su tamaño en seis fracciones al pasar por las placas perforadas con distintos diámetros de mayor a menor impactadas sobre una caja Petri colocada debajo de cada placa en donde se desarrollaran las partículas viables.



Figura 6. Impactador de cascada, Catalogo Tisch Enviromental.

### *1.6.2. Impactadores en liquido (Impingers)*

En este equipo de muestreo el aire succionado con una bomba de vacío se colecta directamente sobre un medio líquido. En su mayoría los impingers están hechos de vidrio Pyrex, con una cámara de colecta y un conducto para la succión de aire, el cual cuenta con un orificio critico que determina la velocidad del flujo de aire.

Uno de los modelos es el AGI-30 figura 7, en el cual el flujo de aire llega a 30 mm de la base del muestreador. Esto incrementa la eficiencia del muestreo de partículas viables, ya que se reduce la velocidad a la que son impactadas y disminuye el daño causado por el contacto con la base del muestreador. Este funciona con un flujo de aire de 12.5 L/min y generalmente se usan 20 mL de medio de colecta. La ventaja de este muestreador es que puede realizar una serie de diluciones del líquido de colecta cuando la concentración de microorganismos es muy alta.

El uso de este equipo no se ha limitado únicamente a la colecta de bacterias y partículas fúngicas suspendidas en el aire, se ha empleado exitosamente en la colecta de algas, amibas de vida libre, virus y recientemente el líquido de colecta se ha utilizado en la detección de microorganismos por medio de reacción en cadena de polimerasa (PCR).

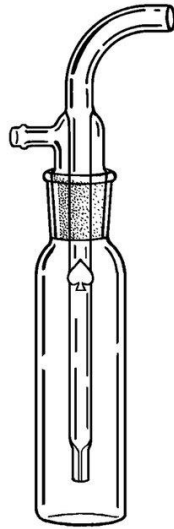


Figura 7 IMPINGER AGI-30 Catalogo Thermo Fisher Scientific

### *1.6.3. Impingers con fraccionamiento de tamaño*

El muestreador (figura 8) Multistage all glass liquid impinger (MSLI) se presenta en tres tamaños que colectan 55, 20 y 10 L/min por medio de una bomba de vacío. Las partículas suspendidas en la corriente de aire se separan en tres fracciones, que corresponden por su tamaño, al depósito en la región extra-torácica, bronquial y alveolar del tracto respiratorio.

Una alternativa al uso del MSLI, es el impactador en líquido Burkard, el cual al igual que el muestreador anterior separa las partículas en tres fracciones con base a su diámetro aerodinámico. La ventaja de este equipo en su diseño más exacto por ser fabricado en aluminio y existe un riesgo menor durante los muestreos ya que es menos frágil.



Figura 8. Impingers con fraccionamiento de tamaño, Catalogo Thermo Fisher Scientific.

#### *1.6.4. Muestreadores de centrifuga*

La colecta de microorganismos por centrifugación permite la creación de un torbellino que produce que las partículas suspendidas en el aire se impacten sobre la superficie de colecta. El muestreador más común de este tipo es el Biotest RCS (Figura 9). El aire es succionado por el rotor del muestreador, que al girar crea una fuerza centrífuga y ocasiona la impactación de partículas. Sobre las paredes de la cámara se coloca una tira plástica con el agar en la que se desarrollan las colonias de microorganismos, después de ser retirada del equipo e incubada a la temperatura adecuada. El motor funciona por medio de baterías y succiona un flujo de aire de 40 L/min. Este equipo es pequeño y de fácil manejo, sin embargo, no es recomendado para el muestreo de ambientes ocupacionales ya que la superficie de las tiras de agar se satura fácilmente.



Figura 9. Biotest RCS Hurtado, 2015

### *1.6.5. Muestreadores multiorificio*

El muestreador SAS (Surface air system) es un equipo portátil con un único nivel de captación basada en la inercia de las partículas (Figura 10). Las partículas son captadas en una placa RODAC con medio de cultivo. Existen dos modelos calibrados a dos caudales de aire (90 L/min y 180 L/min). El equipo dispone de un cabezal con 219 orificios, un ventilador y un programador del tiempo de muestreo (intervalos de 20 segundos), permitiendo un mínimo de 20 segundos y un máximo de 5 minutos.



Figura 10. Muestreador M air T, Catalogo Merk Millipore

### *1.7. Staphylococcus aureus resistente a meticilina.*

*Staphylococcus aureus* es un microorganismo que posee características particulares de virulencia y resistencia a los antibióticos. En humanos causa una amplia variedad de enfermedades infecciosas. Es causante de infecciones respiratorias como neumonía, infecciones del tracto urinario y es la principal causa de infecciones nosocomiales. Provoca intoxicación alimentaria al liberar sus toxinas en los alimentos (Bustos *et al.*, 2006).

El principal impacto de este microorganismo se debe a las cepas de *S. aureus* resistentes a la meticilina (SARM). A principios de la década de los 60's los estafilococos habían adquirido resistencia a la gran mayoría de antibióticos disponibles.

A finales de la década de los 50's se introdujeron cefalosporinas estables a penicilinas y penicilinas semisintéticas. Entre estas estuvo la meticilina, como antibiótico de elección en tratamiento de *S. aureus*. Esta droga fue introducida en Europa en 1959 y un año después se detectó la primera cepa de *S. aureus* meticilina resistente. Más tarde en 1963, se reportó el

primer brote nosocomial causado por cepas SARM. Desde entonces se han notificado cepas de *S. aureus* multiresistentes en todo el mundo (Velázquez-Meza, 2005).

La detección del gen *mec A* basada en PCR o hibridación de ADN identifica siempre correctamente la mayoría de las cepas heterogéneas y debería ser considerado como *gold standard* para detectar la resistencia a meticilina (Gil, 2000).

### *1.7.1. Reacción en cadena de la Polimerasa (PCR)*

Polymerase Chain Reaction (PCR, por sus siglas en inglés) o Reacción en cadena de la Polimerasa, es un método *in vitro* de síntesis de secuencias de ácidos nucleicos seleccionados por el cual segmentos concretos de ADN son específicamente replicados. El ADN se mezcla con bases de nucleótidos y la enzima polimerasa se incuba en condiciones de temperatura controlada. En el proceso las cadenas se separan, se copian, se vuelven a separar y se vuelven a copiar; de esta manera en muy poco tiempo se obtienen millones de copias de moléculas de ADN listas para el ensayo, al que se añaden sondas seleccionadas de ADN con un marcador fluorescente o radioactivo capaces de hibridarse con regiones específicas del ADN buscado. La sonda puede hibridarse en cantidades detectables si el organismo de interés está presente en la muestra inicial y si el segmento de ADN es amplificado. La sensibilidad de este método lo ha convertido en una excelente herramienta de diagnóstico o la investigación en el área alimentaria y medio ambiental. Entre las ventajas que presenta el método se pueden destacar: la sensibilidad y especificidad, la rapidez y su capacidad para detectar microorganismos que son muy lentos o difíciles de cultivar e, incluso, aquellos que no son cultivables. Entre los inconvenientes, el principal es que es un método muy focalizado y sólo detecta agentes biológicos predeterminados si éstos están presentes. Es un método cualitativo, sólo indica si el microorganismo está o no está presente.

PCR es un método sensible y altamente específico para detectar la presencia de patógenos en bioaerosoles (Álvarez *et al.*, 1995; Jenhui *et al.*, 1997; Pascual *et al.*, 2001; Orsini *et al.*, 2002; Vadrot *et al.*, 2004).

## II. METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó de acuerdo a la siguiente metodología, cumpliendo con las condiciones de estudio que permitirán cumplir los objetivos de investigación planteados en este proyecto.

### II.1. Materiales y Método

#### II.1.1. Sitios de muestreo

Las PTAR, motivo de este estudio, están ubicadas en los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito ambos en el estado de Baja California (Figura 11).

El municipio de Tijuana, ubicado en el extremo noroeste de México y del Estado de Baja California, del cual forma parte, posee una superficie total de 1,293.42 km<sup>2</sup>, y colinda al norte con el estado de California, en los Estados Unidos de América, al este con el municipio de Tecate, al oeste con el Océano Pacífico, y al sur con el municipio de Playas de Rosarito. La orografía está constituida por sierras y valles pequeños en los cuales se presenta una gran variedad de pendientes y corrientes hidrológicas intermitentes, así como fallas geológicas. El 49.4% del total de la población estatal en 2013 se concentra en Tijuana, con 1 millón 670 mil 365 personas, siendo con esto el municipio con mayor número de habitantes de Baja California.

El municipio de Playas de Rosarito colinda al norte y al este con el municipio de Tijuana; al sur con el municipio de Ensenada y al oeste con el Océano Pacífico.

La zona está compuesta básicamente por un área de planicies, lomeríos suaves y faldas de las unidades montañosas, presentándose gran variedad de pendientes (Gobierno de Baja California). Para 2013 el municipio más joven del estado, tiene una población equivalente al 3% del total de Baja California, con 100 mil 817 habitantes.

Con sus 501 Km<sup>2</sup>, las Playas de Rosarito lo convierten en el municipio más pequeño del estado, la densidad de población en 2013 será de 201.23 personas por cada km<sup>2</sup> (INEGI, 2013).



ENSENADA

MEXICALI

ROSARITO

TECATE

TIJUANA

Figura 11. Mapa de Ciudades de Muestreo Fuente INEGI

El muestreo microbiológico del aire se llevó a cabo en 4 PTAR del estado de Baja California, dos en la ciudad de Tijuana y dos más en la ciudad de Rosarito, durante el periodo de Marzo a Noviembre de 2016 (Figura 12), las cuales fueron:

- PTAR Monte de los Olivos- Arturo Herrera, Tijuana.
- PTAR La Morita, Tijuana.
- PTAR Rosarito Norte, Rosarito.
- PTAR Rosarito 1, Rosarito.



Figura 12. Ubicación de las cuatro PTAR muestreadas, Google maps

### II.1.2. Características de las PTAR

En la tabla VI se muestran los datos de capacidad, caudal en litros por segundos (lps) y tipo de proceso para cada una de las plantas donde se realizaron los muestreos según reporte de CONAGUA (CONAGUA, 2017).

Tabla VI. Capacidad y caudal de las plantas de tratamiento de aguas residuales

Planta de tratamiento de aguas residuales	Proceso	Capacidad (lps)	Caudal (lps)
Monte de los olivos	Lodos activados	460	227
La Morita	Zanjas de oxidación	254	180.6
Rosarito Norte	Zanjas de oxidación	210	71.7
Rosarito 1	Lagunas aireadas	120	77.8
Planta Binacional	Lodos activados	1100	10076

Fuente: Catalogo Conagua

### II.1.3. Puntos de muestreo

El muestreo se realizó en el periodo de primavera, verano y otoño del año 2016, para que el estudio fuera temporal (Tabla VII Anexo XVII -XX), los muestreos fueron mensuales de las 12:00 a las 15:00 horas para cada sitio muestreado, en las PTAR de Monte de los Olivos, La Morita y Rosarito Norte (Figura 13,14,15,16), los puntos de muestreo fueron:

- Cribado
- Tanques de aireación 1 y 2
- Tratamiento de lodos
- Agua tratada



Figura 13. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR "Monte de los Olivos", Google maps.



Figura 14. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR "La Morita", Google maps.



Figura 15. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR "Rosarito Norte", Google maps.

Mientras que Rosarito 1, donde se tiene un sistema de tratamiento diferente de las anteriores se muestreo:

- Tanque de aireación 1,2 y 3
- Clarificador



Figura 16. Localización de los puntos de muestreo en la PTAR "Rosarito 1", Google maps.

#### II.1.4. Equipos y metodología de muestreo

Los bioaerosoles fueron recolectados con el uso de un muestreador de aire portátil (M AirT, Millipore, Billerica, MA, EE UU). El tamiz microperforado del muestreador posee una placa con 400 orificios de diámetro uniforme a través de la cual el aire pasa a razón de 100 L/ min para impactar en placas Rodac que contenían agar tripticasa de soya (TSA). La tasa de impacto equivalente a 11 m/seg con un corte de tamaño de 8.8 micras, lo que permite reducir la pérdida de viabilidad debido a un estrés por impacto (Meier y Zingre, 2000).

La duración de la toma de muestra fue de 1 minuto. El muestreo se realizó de acuerdo con Soto *et al.* (2009) y Dungan *et al.* (2009). Antes del muestreo, el tamiz microperforado del muestreador de aire se esterilizó por autoclave, y la superficie del muestreador fue descontaminado con sal de amonio cuaternario. Las mediciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa) se tomaron de forma simultánea en cada sitio de muestreo con el equipo Thermo-Hygro (VWR Radnor, PA, EE UU). La velocidad y dirección del viento fueron tomados de la aplicación móvil Windfinder Version 3.02.

Todas las muestras se trasladaron a temperatura ambiente en hielera al laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, registrándose en la cadena de custodia las condiciones de aceptación y rechazo. Una vez en el laboratorio se incubaron

a una temperatura de 37 °C, durante 48 horas para el crecimiento de bacterias y su posterior recuento.

El valor obtenido se encuentra en unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml), este valor se corrigió de acuerdo a la fórmula de Feller (Anexo 1) para eliminar el sesgo que se genera por los múltiples orificios que posee el equipo de captación de aire:

$$Pr = N[1/N + 1/N - 1 + 1/N - 2 + 1/N - r + 1]$$

Pr: total estadístico probable

N: constante.

r: número de unidades formadoras de colonias contadas en cajas Petri de 90 mm.

Luego se convirtió las UFC/ml corregidas en unidades formadoras de colonia por metro cubico (UFC/m<sup>3</sup>) por estequiometria:

$$\frac{UFC}{ml} * \frac{1000 ml}{100 L} * \frac{1000 l}{1m^3} = \frac{UFC}{m^3}$$

(Herrera, 2009)

El sistema de nomenclatura para las muestras se llevó a cabo tomando en cuenta el nombre de la planta donde se realizó el muestreo, el proceso del sistema de tratamiento y finalmente el número de muestreo (Tabla VII).

Tabla VII. Nomenclatura de las muestras

<b>Primer termino</b>		<b>Segundo termino</b>		<b>Tercer termino</b>	<b>Cuarto termino</b>
MO	Monte de los Olivos	C	Cribado		Numero de muestreo
M	Morita	TA	Tanque de aireación	# de tanque	
R	Rosarito Norte	L	Lodos		
R1	Rosarito 1	AT	Agua tratada		

### II.1.5. Análisis bacteriano

Después del muestreo, las placas RODAC con TSA fueron inmediatamente transportadas al laboratorio y se incubaron por duplicado a 35-37 °C durante 48 horas. Una vez concluido el período de incubación, se examinaron las placas para los recuentos de UFC. Las concentraciones de las bacterias y hongos en aire, fueron reportadas como unidades formadoras de colonias por metro cúbico de aire (UFC/m<sup>3</sup>). A los cultivos con crecimiento se les realizó la tinción de Gram para su clasificación en morfología microscópica (cocos y bacilos), así mismo por su reacción a la tinción de Gram (positivos y negativos) y en función de esto se cultivaron en medios selectivos, como agar MacConkey (Difco, Sparks, MD. EEUU) para el aislamiento de las enterobacterias, se les realizó la prueba de Oxidasa Catalasa y la actividad hemolítica en Agar sangre Columbia (Difco, Sparks, MD. EE UU).

### II.1.6. Análisis PCR gen mec A

Una vez identificadas cepas de *Staphylococcus aureus* se seleccionó una muestra para realizar PCR del gen mec A, mediante las condiciones de reacción descritas en la tabla VIII.

Tabla VIII. Condiciones de reacción *mecA*

<b><i>mecA</i></b>	
Componente	Cantidad
ADN	2 $\mu\text{L}$
dNTP	0.50 $\mu\text{L}$
Buffer 10X	2.5 $\mu\text{L}$
Taq polymerase	0.3 $\mu\text{L}$
Primer <i>mecA</i>	1 $\mu\text{L}$
H <sub>2</sub> O (libre de nucleasas)	18 $\mu\text{L}$
DMSO	0.253 $\mu\text{L}$
30 ciclos de desnaturalización a 94 °C por un minuto 55 °C temperatura de alineamiento por un minuto 72 °C temperatura de extensión por dos minutos Conservación a 4 °C	

Tabla IX. Secuencias de los oligonucleótidos y su localización en el gen *mecA*

Gen	Primer	Secuencia	Longitud del producto (pb)	Localización (número de nucleótidos)
<i>mecA</i>	<i>mecA1</i>	(+) AAAATCGATGGTAAAGGTTGGC	533	1282-1303
	<i>mecA2</i>	(-) GTTCTGCAGTACCGGATTTGC		

(Islam *et al.*, 2011)

### II.1.7. Análisis estadístico

Para el análisis de datos se utilizaron estadísticas descriptivas, uso de tablas y gráficas elaboradas en el programa Excel 2016, para la observación de la distribución de microorganismos aislados e identificados, así como las condiciones ambientales de cada muestreo.

Se realizó un análisis estadístico de correlación de Spearman con ayuda del programa Minitab 18 entre las UFC y los parámetros meteorológicos. Solo se tomaron los datos en donde se tenían valores de las UFC y fueron descartados los que tenían valores de cero.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se muestra en la tabla X, la planta que tuvo mayor concentración media de bioaerosoles (119575 UFC/m<sup>3</sup>) fue la en la PTAR “Monte de los Olivos”, teniendo un máximo de 625768 UFC/m<sup>3</sup>, mientras que la PTAR con menor concentración media fue Rosarito Norte (51653 UFC/m<sup>3</sup>), presentando una concentración máxima de 387738 UFC/m<sup>3</sup>. El resto de los parámetros estadísticos de las plantas descritas anteriormente, además de las PTAR “La Morita” y “Rosarito 1” se muestran en la tabla X.

Tabla X. Estadísticas descriptivas de las PTAR durante el muestreo marzo- noviembre.

<b>Sitio</b>	<b>Parámetro</b>	<b>UFC/m3</b>
<b>Monte de los Olivos</b>	Media	119575
	Mediana	60379
	Moda	10000
	Desv. Std	149875
	Rango	0-625768
	N	26
<b>La Morita</b>	Media	86750
	Mediana	80709
	Moda	101143
	Desv. Std	76962
	Rango	0-311441
	N	21
<b>Rosarito Norte</b>	Media	51653
	Mediana	20038
	Moda	0
	Desv. Std	87754
	Rango	0-387737
	N	20
<b>Rosarito I</b>	Media	111811
	Mediana	106271
	Moda	0

Desv. Std	95143
Rango	0-343961
N	16

---

Dentro de las PTAR, los principales puntos del proceso con mayor generación de bioaerosoles en la PTAR “Monte de los Olivos” y “Rosarito Norte” fue en el cribado con 625768 UFC/m<sup>3</sup> y 387738 UFC/m<sup>3</sup> respectivamente (Figura 18 y 20). Este resultado concuerda con lo reportado por Sánchez -Monedero en el 2008, donde el encontró la mayor concentración de colonias igualmente en el cribado; mientras tanto en la PTAR “Rosarito 1” el punto del proceso con mayor concentración de bioaerosoles fue en el Tanque de aireación 2 con 343962 UFC/m<sup>3</sup>(Figura 21). Este resultado es debido a que viento arriba del tanque de aireación 2 se encuentra el proceso oxigenación con cepillos generando aerosolización del material biológico, impactando significativamente en la concentración de este punto del proceso debido a la dirección predominante del viento (NO-SE). En esta parte del proceso de tratamiento del agua residual es común encontrar altas concentraciones debido al sistema de aireación que puede suspender en el aire las especies bacterianas (Gotkowska-Plachta *et al.*,2013), pero de acuerdo con Li *et al.*, 2015, un sistema de aireación fino minimiza este efecto.

En el caso de la PTAR “La Morita” la parte del proceso de tratamiento con mayor concentración de bioaerosoles fue en la compresión de lodos con una concentración de 311441 UFC/m<sup>3</sup> (Figura 19), coincidiendo con lo reportado por Sánchez-Monedero *et al.*, 2008.

El comportamiento temporal de generación de bioaerosoles en los puntos que conforman el tratamiento de las aguas residuales de las PTAR en este estudio fue variado.

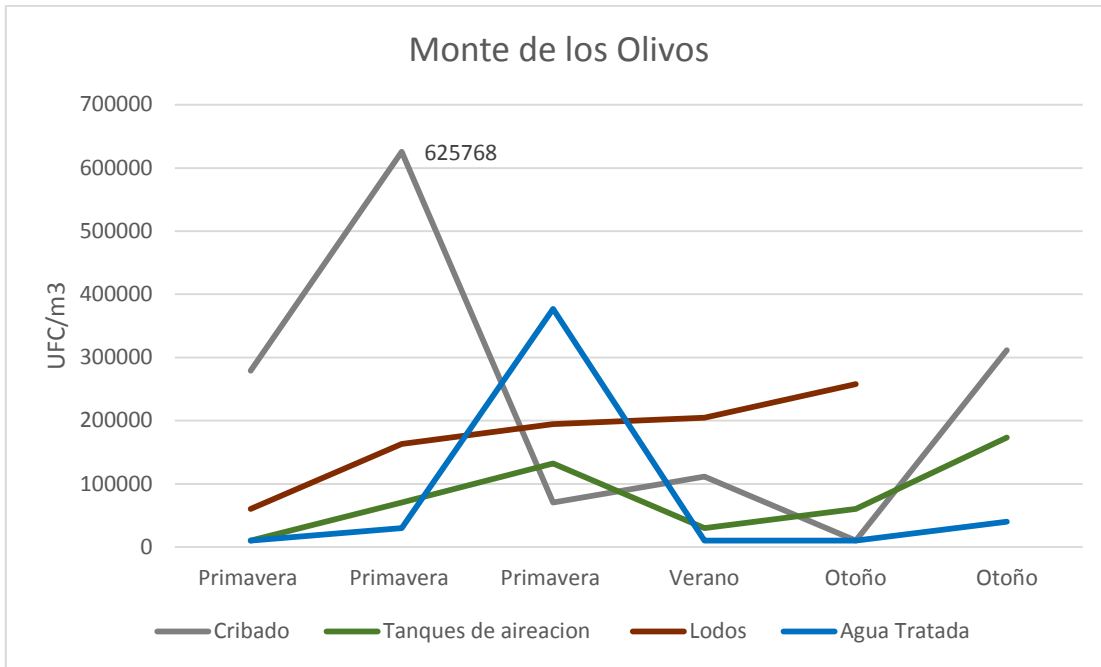


Figura 17. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m<sup>3</sup> por proceso en la PTAR Monte de los Olivos

En Monte de los Olivos el cribado presentó mayores concentraciones durante la época de primavera (625768 UFC/m<sup>3</sup>) comparado con otoño (311441 UFC/m<sup>3</sup>) y verano (111400 UFC/m<sup>3</sup>) (Figura 18). Este comportamiento podría deberse a la influencia de los factores ambientales tales como la temperatura, radiación solar y humedad que en primavera son los ideales para la proliferación de microorganismos en comparación con verano y otoño. En verano la temperatura y la radiación solar son más elevados, afectando la viabilidad de los microorganismos, mientras que en otoño el porcentaje de humedad favorece la deposición húmeda de los microorganismos reduciendo así la concentración de estos en el aire en comparación con la primavera.

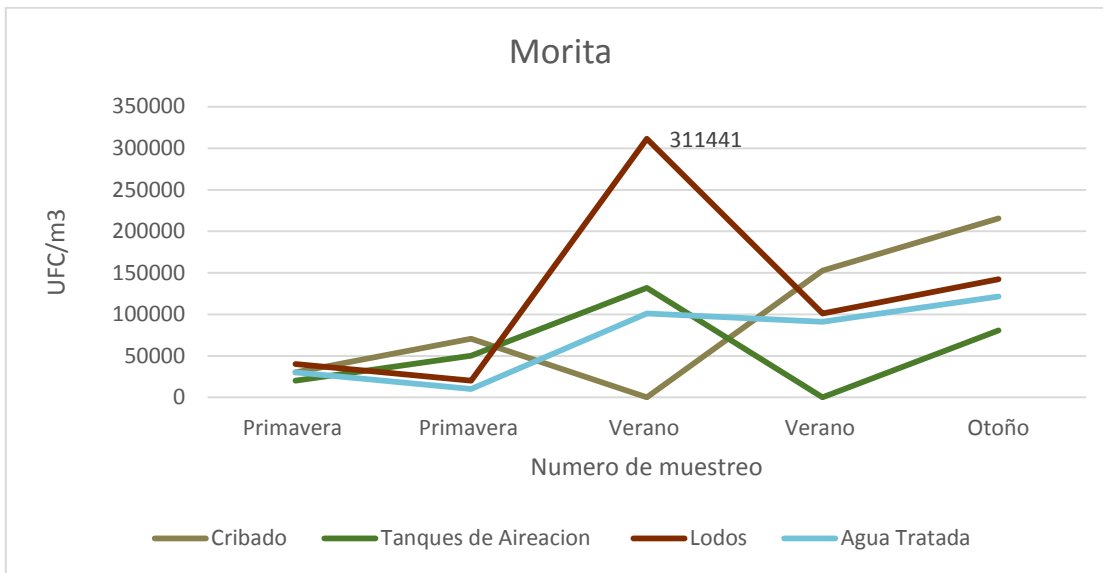


Figura 18. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m<sup>3</sup> por proceso en la PTAR La Morita.

En la PTAR “La Morita” se registró la concentración más alta durante la primavera (311441 UFC/m<sup>3</sup>)

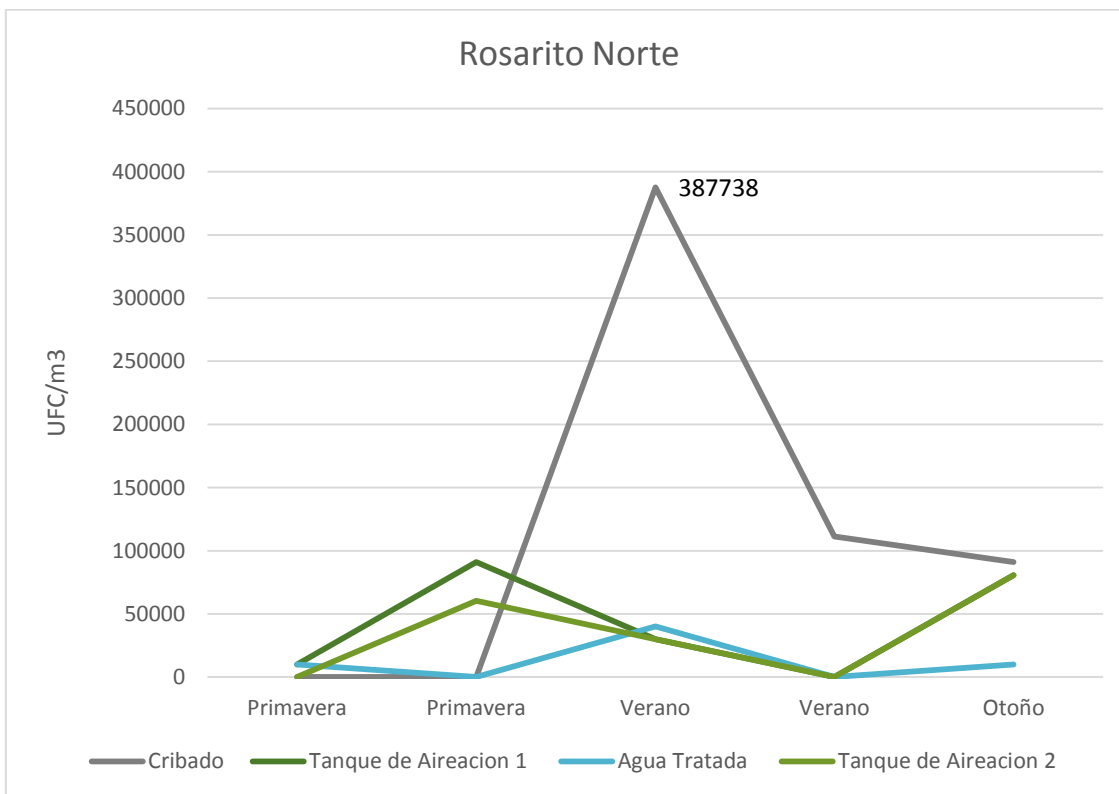


Figura 19. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m<sup>3</sup> por proceso en la PTAR Rosarito Norte.

En la PTAR “Rosarito Norte” se obtuvo una concentración de 387738 UFC/m<sup>3</sup> durante el verano en el cribado siendo esta la concentración más alta, debido a la influencia de los factores ambientales antes mencionados, la combinación de humedad (44%) y temperatura (31°C) (Tabla XXI) favorecen la proliferación de microorganismos en comparación con primavera y otoño debido a la cercanía con la costa.

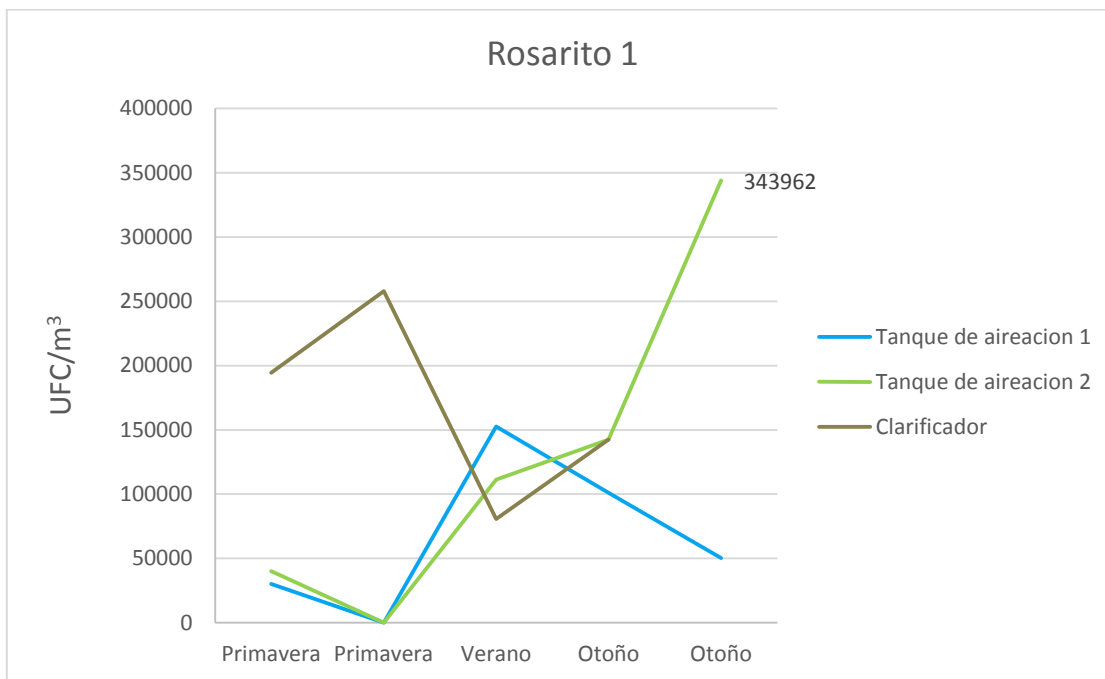


Figura 20. Comportamiento estacional de la concentración de UFC/m<sup>3</sup> por proceso en la PTAR Rosarito 1.

En la PTAR “Rosarito 1” se encontró la concentración más alta durante otoño en el tanque de aireación 2 (343962 UFC/m<sup>3</sup>), debido a que viento arriba de este tanque se encuentra el proceso oxigenación con cepillos generando aerosolización del material biológico, impactando significativamente en la concentración de este punto del proceso debido a la dirección predominante del viento (NO-SE) y la velocidad del viento durante esta estación de año fue de 17 Km/h.

Otros autores coinciden en que las variaciones estacionales de la carga bacteriana podrían estar relacionadas con las condiciones meteorológicas (velocidad y dirección del viento,

humedad, temperatura, radiación ultravioleta, contaminación) y con la sensibilidad intrínseca de diferentes géneros de bacterias a estos factores (Fracchia, 2006), no obstante nuestro estudio no muestra una correlación significativa con dichas variables (Tabla XI).

Tabla XI. Correlación de Spearman: UFC vs Parámetros meteorológicos

Planta	Total de observaciones	Variables correlacionadas	Correlación de Spearman	Valor de P	Observaciones
<b>Monte de los Olivos</b>	24	UFC vs Temperatura	0.106	0.622	Las variables no se correlacionan
		UFC vs Velocidad del viento	-0.121	0.573	Las variables no se correlacionan
		UFC vs % HR	-0.128	0.551	Las variables no se correlacionan
<b>La Morita</b>	19	UFC vs Temperatura	-0.242	0.319	Las variables no se correlacionan
		UFC vs % HR	0.059	0.81	Las variables no se correlacionan
		<b>UFC vs Velocidad del viento</b>	<b>0.723</b>	<b>0</b>	<b>Las variables presentan buena correlación</b>
<b>Rosarito Norte</b>	13	UFC vs Temperatura	0.293	0.331	Las variables no se correlacionan
		UFC vs Velocidad del viento	0.021	0.946	Las variables no se correlacionan
		UFC vs % HR	-0.158	0.607	Las variables no se correlacionan
<b>Rosarito 1</b>	14	UFC vs Temperatura	0.366	0.198	Las variables no se correlacionan
		UFC vs % HR	0.022	0.94	Las variables no se correlacionan
		UFC vs Velocidad del viento	0.318	0.268	Las variables no se correlacionan

Los factores ambientales juegan un papel importante en la distribución de los bioaerosoles, se han llevado a cabo varios estudios relacionados con la distribución espacio-temporal de los bioaerosoles en diferentes partes del mundo. En Beijing, China, la concentración bacteriana aérea más alta se observó en verano y otoño (Fang *et al.*, 2007). Se observaron resultados similares en Washington DC, Montreal de Canadá y Moscú, donde las concentraciones bacterianas alcanzaron su punto más alto en el verano y las más bajas en la temporada invernal debido a las condiciones climáticas regionales (Jones y Cookson, 1983; Kelly y Pady, 1954; Vlodavets y Mats, 1958, Bipasha *et al.*, 2015), presentando concordancia con los resultados obtenidos en esta investigación.

El muestreo fue diseñado en base a lo reportado por otros autores, durante las horas del día en donde se encontró mayor carga microbiana, así como época del año, por lo tanto el estudio muestra las concentraciones de UFC/m<sup>3</sup> en condiciones favorables para la proliferación de bacterias. Con este argumento se puede comprender las altas concentraciones encontradas durante el presente estudio (Tabla XVI).

Se detectaron altas concentraciones en la entrada al tratamiento de aguas residuales en el cribado; así como también en los tanques de aireación; esto es consistente con otros estudios (Pascual *et al.*, 2003, Fracchia *et al.* 2006).

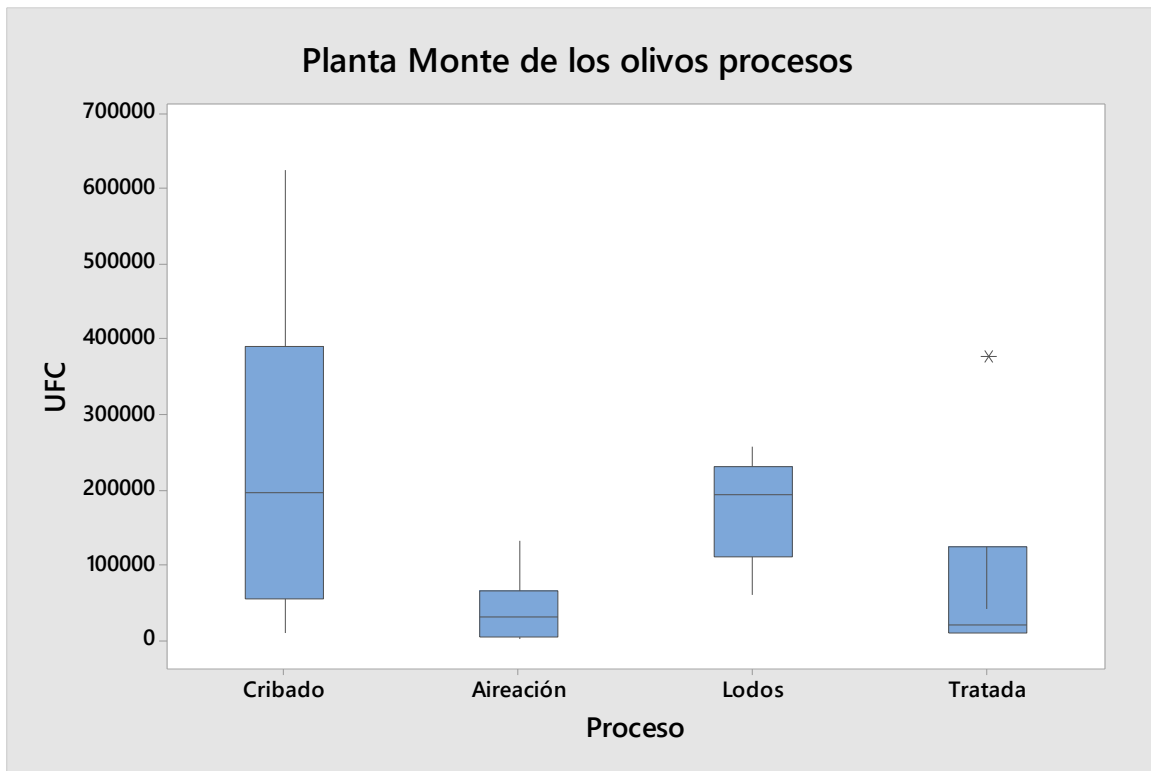


Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes “Monte de los olivos” comparación entre procesos.

En la PTAR Monte de los Olivos se encontró que el proceso que tiene una mayor concentración de UFC es el cribado pero también como se puede observar la figura 22 se muestra una mayor dispersión en las lecturas, así que podemos concluir que la variabilidad en las concentraciones obedecen a que el proceso no está estandarizado ya que la carga de contaminantes en el influente varía de acuerdo a la estación de año. (Figura 26).

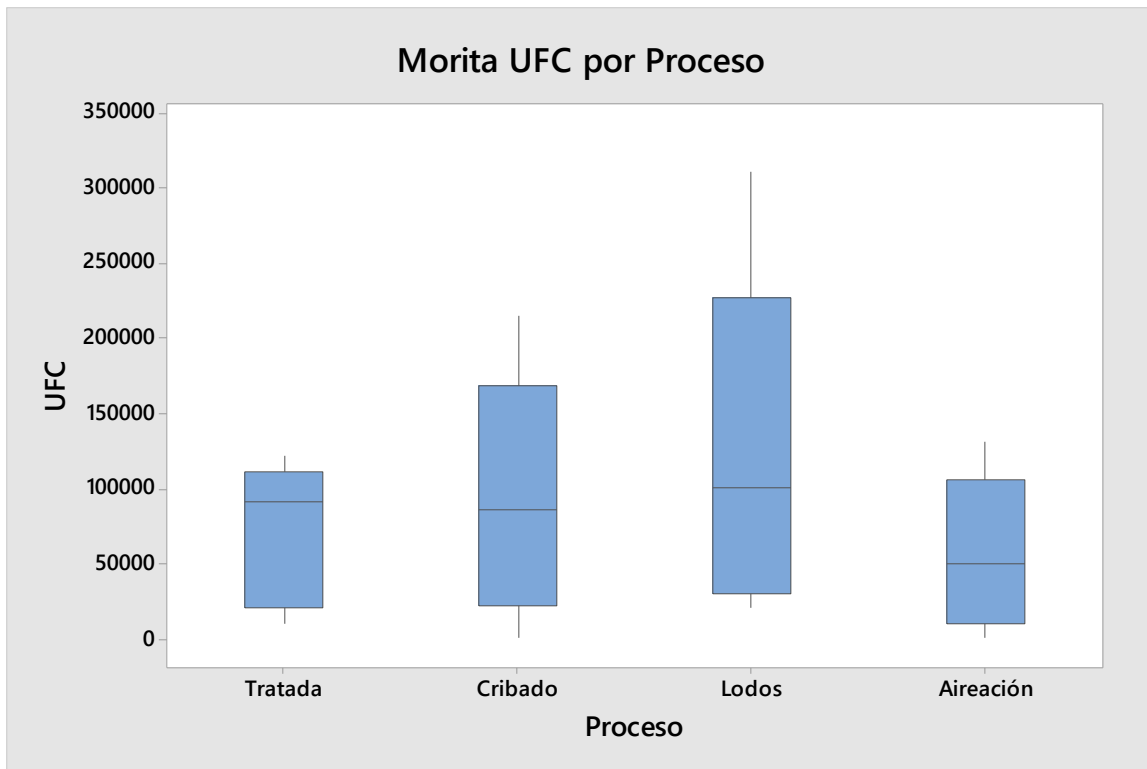


Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes "La Morita" comparación entre procesos del tratamiento.

En la PTAR "La Morita" la lectura más alta se encontró en los lodos durante el mes de septiembre (Figura 19) así también se puede observar en la Figura 23 la dispersión más amplia en este punto dejando en evidencia que el proceso no está estandarizado.

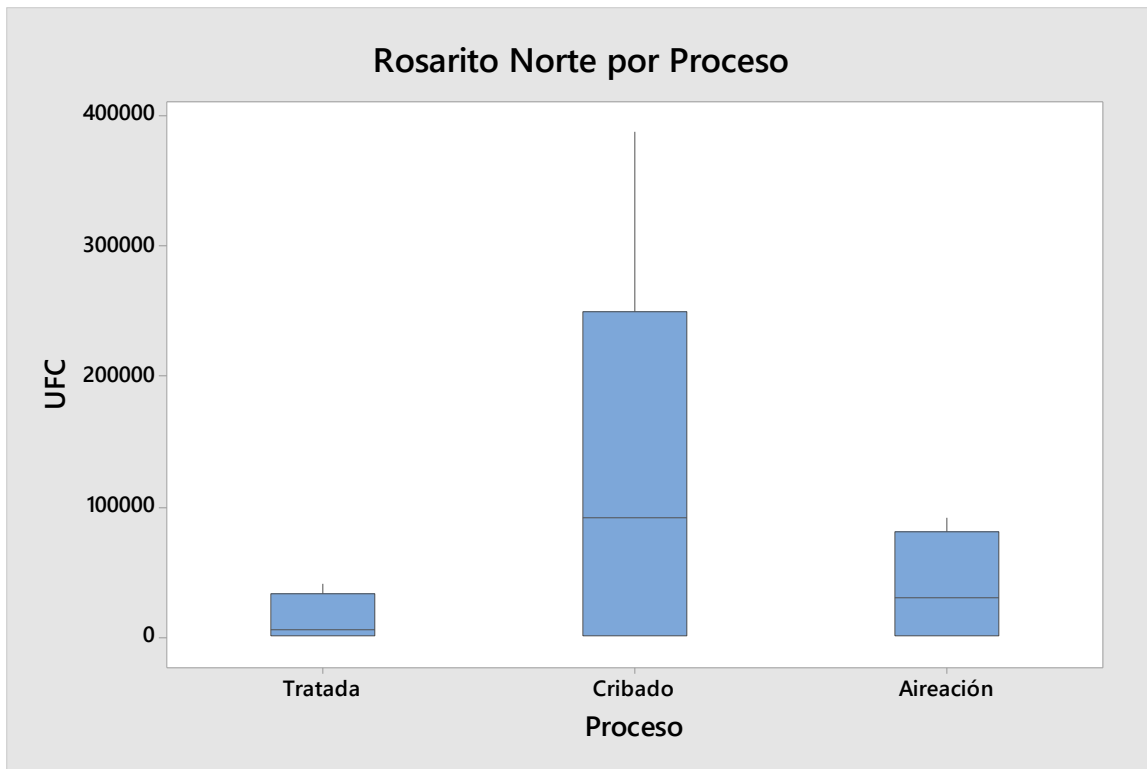


Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes "Rosarito Norte" comparación entre procesos del tratamiento.

La PTAR Rosarito Norte presento la concentración más alta de 387738 UFC/m<sup>3</sup> en el proceso de cribado (Figura 20) coincidiendo este resultado con la PTAR "Monte de los Olivos", explicándose este comportamiento por las mismas razones discutidas en esta última.

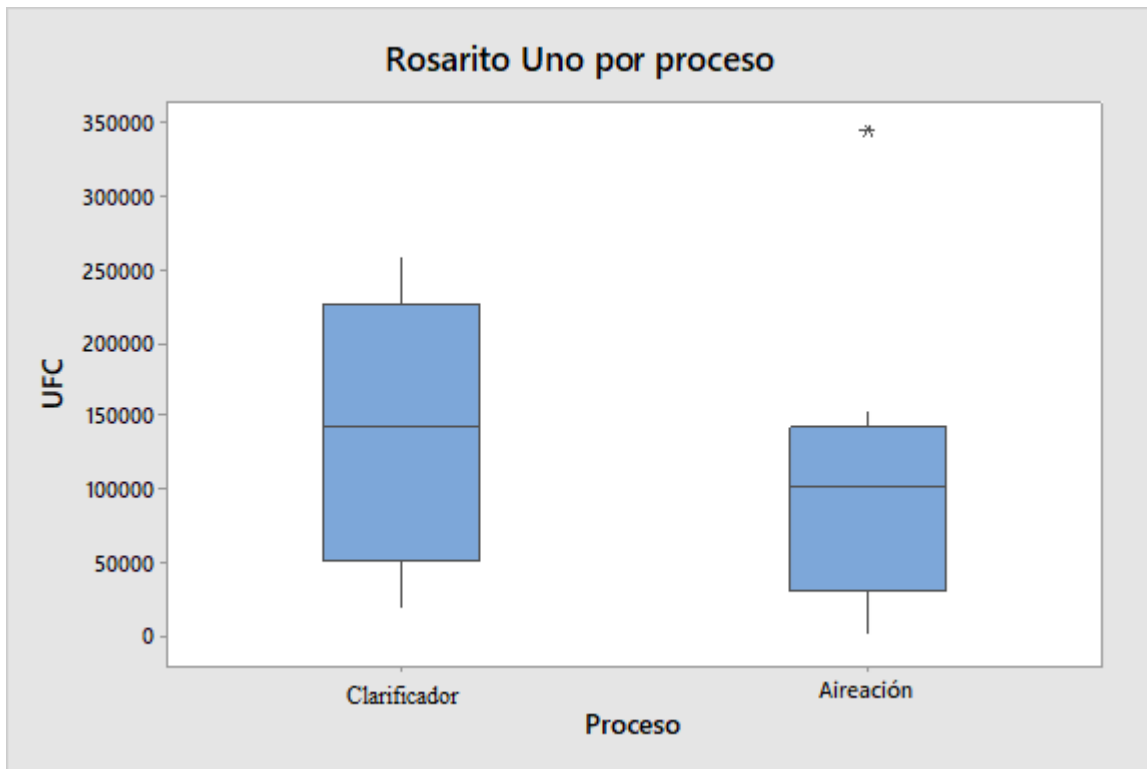


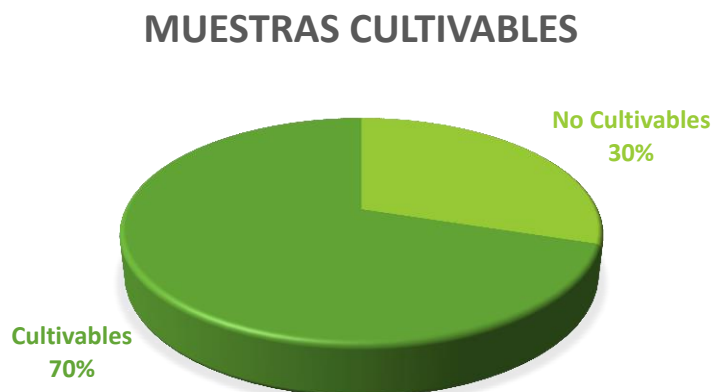
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes “Rosarito 1” comparación entre procesos del tratamiento.

La PTAR “Rosarito 1” presento mayor dispersión de datos en el clarificador, pero a diferencia del comportamiento de las otras PTAR en este punto no se encuentra la mayor concentración, la cual la lectura más alta fue de 343962 UFC/m<sup>3</sup> en segundo tanque de aireación. Cabe mencionar que este dato es atípico pues no se vuelve a presentar un valor cercano durante los siguientes muestreos, esto lo podemos notar en la Figura 25 que muestra los diagramas comparativos por proceso de la PTAR donde se pueden notar la concentración más altas en el Tanque de aireación y en el Clarificador la dispersión más amplia.

### Resultados de identificación de bacterias

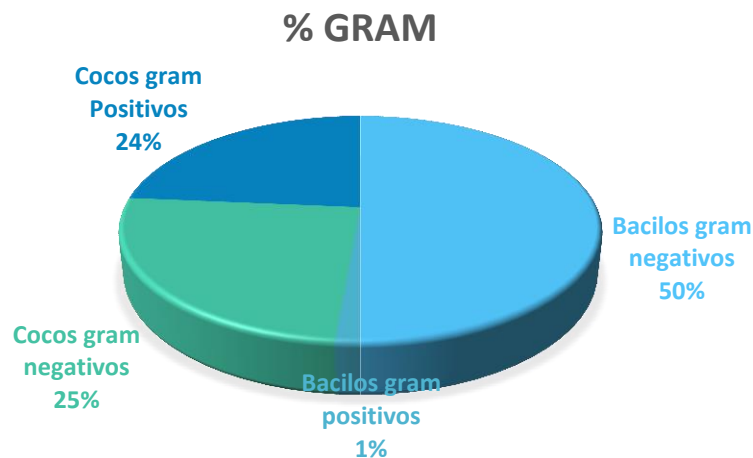
En los muestreos de bioaerosoles se encuentran bacterias cultivables y no cultivables, debido al efecto negativo de las condiciones atmosféricas sobre la viabilidad de las bacterias (Cook y Bolster, 2007, Cunningham *et al.*, 2009, del Campo *et al.*, 2009, Kana *et*

*al.*, 2008, Polifroni *et al.*, 2009). Por esta razón se encontró un 30% de bacterias no cultivables presentes en el aire en este estudio (Grafica I)



*Grafica I. Muestras cultivables.*

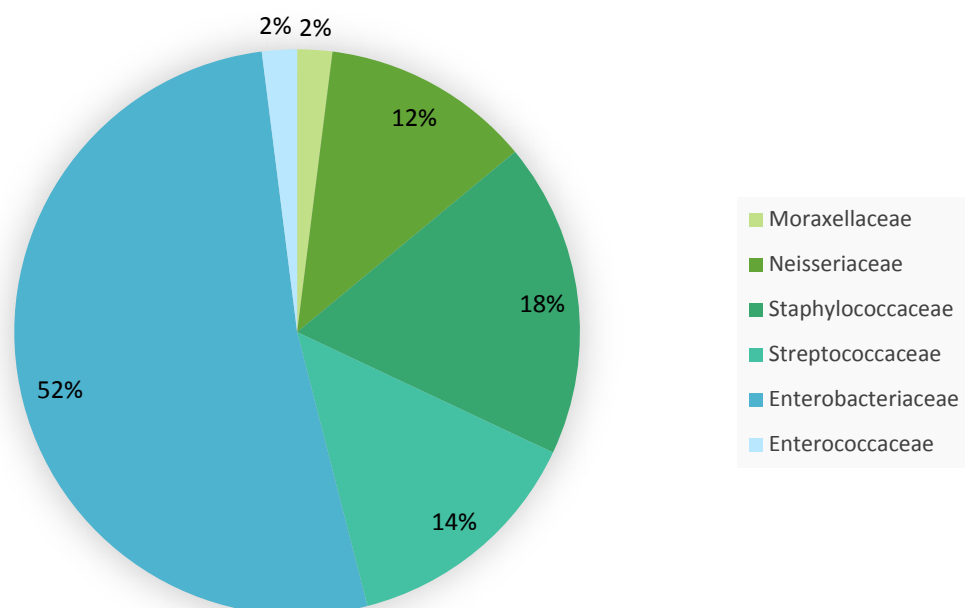
Con respecto a la morfología celular de las bacterias encontradas durante los muestreos, se obtuvo que 51% son bacilos y el 49% son cocos (Grafica II). En cuanto a sus propiedades tintoriales se obtuvo 25% Gram positivos y 75% Gram negativos. El grupo de bacterias Gram negativas generalmente tiene un bajo grado de supervivencia durante la aerosolización y el proceso de desecación que se experimenta en el medio ambiente, por lo que su capacidad para crecer en medios de cultivo disminuye drásticamente (Marthi *et al.*, 1990; Heidelberg *et al.*, 1997; Franchia *et al.*, 2006). Sin embargo lo encontrado en este estudio coincide con lo reportado por Fracchia *et al.* (2006) que demuestra que en el influente pueden sobrevivir bacterias Gram negativas y ser un riesgo potencial para la salud de los trabajadores de la PTAR.



Grafica II. Morfología celular de las bacterias encontradas durante los muestreos.

La Familia *Enterobacteriaceae* constituye un grupo grande y heterogéneo de bacterias gramnegativas. El porcentaje de enterobacterias encontradas en el aire muestreado fue de un 42% (Grafica III) siendo esta familia la dominante al igual que en el estudio reportado por Michałkiewicz *et al.* (2011). La segunda familia sobresaliente fue *Staphylococcaceae* con un 18%, lo cual es de esperarse ya que se trata de gérmenes ubicuos, encontrándose de forma universal en el suelo, el agua y la vegetación, así como formando parte de la biota intestinal de humanos y animales, siendo también de los microorganismos más resistentes a las condiciones adversas del medio ambiente.

## Familias identificadas presentes en el aire



Grafica V Porcentaje de Familias identificadas presentes en el aire.

Dentro de las enterobacterias, la especie dominante encontrada durante los muestreos fue *Shigella spp.* con un 23% (Tabla XII) respecto al total de especies encontradas. Ferreira *et al.* en el año 2007 encontró a este mismo género en una proporción del 7%, este resultado puede deberse a que la muestra se transportó directamente en el medio de cultivo excluyendo factores como el pH de las muestras que puede afectar su viabilidad.

Tabla VI Géneros bacterianos encontrados en el aire durante el muestreo de las 4 PTAR.

Genero	%
<i>Shigella spp</i>	23
<i>Staphylococcus aureus</i>	18
<i>Streptococcus spp</i>	14
<i>Providencia rettgeri</i>	9
<i>Proteus mirabilis</i>	5
<i>Yersinia spp</i>	5
<i>Neisseria lactamica</i>	5
<i>Neiseria sicca</i>	5
<i>Neisseria</i>	2

<i>Enterococcus</i>	2
<i>Klebsiella oxytoca</i>	2
<i>klebsiella ozaenae</i>	2
<i>Plesiomonas Shigeloides</i>	2
<i>Pseudomona Alcaligenes</i>	2
<i>Yersinia pestis</i>	2
<i>Acinetobacter baumani</i>	2

El género *Shigella* se identificó con mayor frecuencia en el cribado en la PTAR de Monte de los Olivos con un 31% (Tabla XIII). Esto es de interés clínico ya que es una bacteria altamente enteroinvasiva; su hábitat es el colon y el humano es el principal reservorio. Se transmite a través de contacto directo o indirecto (alimentos y líquidos contaminados, principalmente) con heces de personas infectadas. Las enfermedades diarreicas causadas por agentes patógenos bacterianos, virales o parasitarios constituyen un severo problema de salud. De acuerdo a estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, cada año mueren 1.5 millones de niños por enfermedad diarreica y se presentan 2 billones de episodios/año a nivel mundial (WHO,2009).

Tabla VIII. Bacterias presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales "Monte de los Olivos"

Genero	%
<i>Shigella spp</i>	31.25
<i>Staphylococcus aureus</i>	18.75
<i>Staphylococcus</i>	6.25
<i>Plesiomonas shigeloides</i>	6.25
<i>Streptococcus spp</i>	6.25
<i>Acinetobacter baumani</i>	6
<i>Acinetobacter baumani</i>	6.25
<i>Yersinia pestis</i>	6.25
<i>Yersinia spp</i>	6.25
<i>Neisseria lactamica</i>	6.25
<i>Neisseria sicca</i>	6.25

El género con mayor prevalencia en la PTAR “La Morita” fue *Streptococcus spp* (31%) seguido de *Staphylococcus aureus* (15%) (Tabla XIV), siendo estas bacterias patógenas que pueden causar enfermedades de la piel, el tracto respiratorio superior y la cavidad oral (Cardona, 2003). *Staphylococcus aureus* sigue siendo una de las causas más comunes de infecciones nosocomiales y comunitarias, manifestando una carga alta de morbilidad y mortalidad (Ardura, 2009).

Tabla XIV. Bacterias presentes en la Planta de tratamiento de aguas residuales “La Morita”

<b>Genero</b>	<b>%</b>
<b><i>Streptococcus spp</i></b>	31
<b><i>Staphylococcus aureus</i></b>	15
<b><i>Pseudomona alcaligenees</i></b>	8
<b><i>Kebsiella ozaenae</i></b>	8
<b><i>Shigella spp</i></b>	8
<b><i>Neiseria sicca</i></b>	8
<b><i>Yersinia spp</i></b>	8
<b><i>Providencia rettgeri</i></b>	8

En la ciudad de Rosarito la especie con mayor incidencia fue *Providencia rettgeri* (antes *Proteus rettgeri*) con un 23% (tabla XV) esta es una bacteria móvil perteneciente al género *Providencia*, que junto a *Proteus* y *Morganella* forman la tribu *Proteeae* o *Pro*. Componente normal de la biota intestinal en el hombre. Como patógeno humano se ha descrito como causante de infecciones urinarias, sobre todo en pacientes mayores y con catéteres uretrales, y en infecciones de heridas en pacientes inmunodeprimidos y quemados. A diferencia de esto, para *P. stuartii* son muy escasas las publicaciones de bacteremias causadas por este microorganismo. Sin embargo en Colombia se ha encontrado la enzima NDM-1 que genera resistencia a carbapenémicos en *Providencia rettgeri*, cuando se presenta esta, la posibilidad que haya genes asociados para la producción de resistencias es alta, generando así que se presenten mecanismos que evitan la acción del antibiótico haciendo difícil implementar un tratamiento efectivo (Castañeda *et al.*, 2016).

Grafica XV. Bacterias presentes en las PTAR de la ciudad de Rosarito.

Genero	%
<i>Providencia rettgeri</i>	23
<i>Shigella spp</i>	23
<i>Proteus mirabilis</i>	15
<i>Staphylococcus aureus</i>	8
<i>Klebsiella shigella spp</i>	8
<i>Klebsiella oxytoca</i>	8
<i>Neiseria spp</i>	8
<i>Streptococcus spp</i>	8

### Resultados análisis de PCR

El análisis de PCR realizado para la cepa de *Staphylococcus aureus* aisladas resulto negativa, lo cual indica que no se encontró la presencia del gen *mec A* en las muestras seleccionadas.

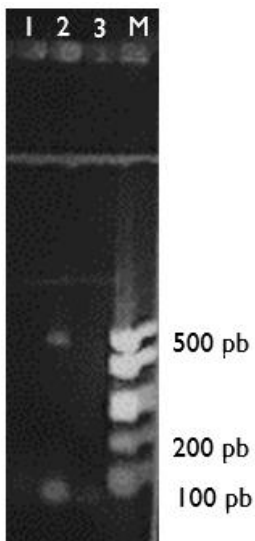


Figura 25. Electroforesis en gel de agarosa de los productos amplificados para el gen *mecA*. Las muestras del pocillo 1 corresponden a MOTA4, pocillo 3 control negativo, pocillo 2 control positivo y M (marcador de 500 pb)

*Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (SARM) es uno de los microorganismos con mayor resistencia a nivel mundial (OMS) causa un 64% más de mortalidad que *Staphylococcus aureus*. SARM es el cuarto microorganismo de importancia para la OMS para la búsqueda, investigación y desarrollo de nuevos antibióticos por lo que es de suma

importancia su detección en la comunidad aun cuando en este estudio no fue positiva su detección.

### Análisis estadístico

Los resultados arrojados de la correlación de Spearman se presentan en la tabla XII, donde podemos observar que solo la Planta de tratamiento La Morita muestra una buena correlación de las UFC con la velocidad del viento ( $r_s=0.7$ ,  $p=0.0$ ), indicando esto que a mayor velocidad del viento será mayor la aerosolización de las bacterias lo cual representaría un mayor riesgo a la salud sobre los trabajadores de la PTAR, así como para la población aledaña a esta.

En la tabla XVI se muestra un estudio realizado en el año 2010 en la ciudad de Tijuana en donde se muestreo el exterior de la PTAR “Monte de los Olivos”, se encontró una concentración de 9400 UFC/m<sup>3</sup>; 66 veces menor que el valor más alto encontrado en este estudio. En ese mismo proyecto se muestreo la cuenca del rio Tijuana donde la concentración más alta de UFC/m<sup>3</sup> fue de 40100 (Hurtado, 2015) que corresponde 15 veces menos al valor máximo encontrado en el muestreo dentro de la PTAR más cercana a dicha cuenca; aun cuando este valor es muy disparado, en Polonia se encontró en el tanque de aireación 225000 UFC/m<sup>3</sup> (Michal, 2011) siendo este valor solo tres veces menor que la lectura encontrada en este estudio.

Tabla XVI. Análisis comparativo de estudios de bioaerosoles en PTAR de diferentes partes del mundo.

Lugar, año	Maximo UFC/m <sup>3</sup>	Punto de muestreo	Referencia
Beijing, China 2012	3021±537	*****	Xuesong Guo <i>et al</i> 2013
Sureste de España	2330	Deshidratacion de lodos	Sánchez-Monedero <i>et al.</i> 2007
Tijuana, Mexico, 2010	9400	Exterior PTAR	Hurtado <i>et al.</i> 2014
	40100	Rio Tijuana	Hurtado <i>et al.</i> 2014
Beijing, China, 2014	1697	Deshidratacion de lodos	Jing Li <i>et al.</i> 2015
Sur de Polonia, 2015	6900	*****	Kowalski <i>et al</i> 2017
Polonia,2001-03	225000	Tanque de aireacion	Michal Michalkiewicz <i>et al.</i> 2011
Tijuana, Mexico, 2017	625768	Cribado en Primavera	Yocupicio <i>et al.</i> 2017

#### IV. CONCLUSIÓN

Las concentraciones de UFC/m<sup>3</sup> encontrados en el presente estudio indican que los niveles de bioaerosoles en el aire en las PTAR de las ciudades Tijuana y Rosarito son realmente muy elevados. Las concentraciones de bioaerosoles más altas se registraron en las PTAR de la ciudad de Tijuana, principalmente en el cribado y compresión de lodos. En el primer caso es de esperarse que sea un importante foco de emisión de bioaerosoles ya que el influente no ha recibido tratamiento. Mientras que en la ciudad de Rosarito se encontró el principal foco de emisión durante la aireación; en otro estudio hecho en Polonia en un tratamiento de aireación (Gotkowska-Plachta *et al.*, 2013), se sugiere que con burbujas finas se puede minimizar la aerosolización de las aguas residuales.

De los microorganismos identificados algunos son patógenos, los cuales pueden causar enfermedades en las personas expuestas a estos. La presencia de *Shigella spp.* en las cuatro plantas; principalmente en la planta “Monte de los Olivos” sugiere que las PTAR son una fuente puntual de contaminación biológica atmosférica.

Las muy altas concentraciones de bioaerosoles presentes en las cuatro PTAR pueden representar un riesgo para la salud de los trabajadores de las plantas y los habitantes de las zonas aledañas.

Es de suma importancia continuar la investigación de bioaerosoles tomando en cuenta mayores periodos de muestreo para ver la variabilidad estacional y temporal, así como muestreos personales para conocer el tipo, concentración, dispersión y exposición de estos, además de su relación con los riesgos potenciales para la salud de la población de Tijuana y Rosarito.

Se recomienda para las PTAR aumentar el tiempo de residencia durante el proceso de desinfección lo cual nos daría como resultado una menor carga microbiana en el efluente, ya que en este estudio se identificaron altas concentraciones de UFC en esta parte del tratamiento, de tal manera que el impacto negativo se vea reducido en el reservorio final de esta agua el cual es el océano pacífico.

Por último, es conocido que en Baja California las principales causas de enfermedad son los padecimientos infecciosos ocupando el primer lugar las infecciones respiratorias agudas según el reporte del ISESALUD del año 2013, quedando pendiente el análisis para ver si existe una correlación entre estas infecciones y los microorganismos presentes en el aire de la región.

## V. REFERENCIAS

1. Atlas R., Bartha R. (2001). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Pearson, 4ª ed, pág. 450.
2. Alvarez, A.J., Buttner, M.P., Stetzenbach, L.D. (1995). PCR for bioaerosol monitoring: sensitivity and environmental interference. *Appl. Environ. Microbiol.* 61 (10), 3639-3644.
3. Balasubramanian, R., Qian, W.B., Decesari, S., Facchini, M.C., Fuzzi, S. (2003). Comprehensive characterization of PM 2.5 aerosols in Singapore. *Journal of Geophysical Research* 108: 4523.
4. Bauer, H., Fuerhacher, M., Zibuschka, F., Schmid, H., Puxbaum, H. (2002). Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants. *Water Res.* 36, 3965-3970.
5. Benefield, L.D. y Randall, C.W. (1982). *Biological Process Design for Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
6. Bipasha G., Himanshu L., Arun S. (2015). Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanism. *Elsevier Environment International* 85, 254-272.
7. Bitton, G. (1994). *Wastewater Microbiology*; Wiley & Sons: New York.
8. Blais Lecours, P., Veillette, M., Marsolais, D., Duchaine, C. (2012). Characterization of bioaerosols from dairy barns: reconstructing the puzzle of occupational respiratory diseases using molecular approaches. *Appl. Environ. Microbiol.* 78 (9), 3242-3248.

9. Brandi, G., Sisti, M., Amagliani, G. (2000). Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *J. Appl. Microbiol.* 88, 845-852.
10. Bustos-Martinez J., Hamdan-Partida A., Gutierrez-Cardenas M. (2006). *Staphylococcus aureus*: la reemergencia de un patógeno en la comunidad. *Rev. Biomed*; 17:287-305.
11. Cardona J.D. (2003). Contaminación ambiental y enfermedad respiratoria. *Revista de Neumología* 15: 1-4.
12. Castañeda, J., Gómez, K., Corrales, L., Cortés S. (2016). Perfil de resistencia a antibióticos en bacterias que presentan la enzima NDM-1 y sus mecanismos asociados: una revisión sistemática. *NOVA*.13 (25): 95-111.
13. Dungan, R. S., & Leytem, A. B. (2009b). Qualitative and quantitative methodologies for determination of airborne microorganisms at concentrated animal-feeding operations. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25: 1505–1518.
14. De Leon-Rodriguez N., Lathemb T., Rodriguez-Ra L. M., Barazeshc J. M., Andersond B. E., Beyersdorfd A. J., Ziembad Luke D., Berginb Michael, Nenesb Athanasios, and Konstantinidisa Konstantinos T. (2013). Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *PNAS*. Vol. 110 no. 7: 2575–2580.
15. De la Rosa, M.C., Mosso M.C., Ullán, C. (2002). El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. *Observatorio Medioambiental* ISSN: 1139-1987 Vol. 5 (2002): 375-402.
16. Domínguez-Malfavón L, Cervantes-González E, García-Romero JR, Torres-Mota AM, Rojas-Avelizapa NG, García-Mena J (2007) Study of the microbial diversity of outdoor bioaerosols of Mexico City. In: Wang Y, Li S, Huang P, Yang Y, An Y, Sun X (eds) *Progress in environmental science and technology* (vol. I). Proceedings of the 2007 International Symposium on Environmental Science and Technology. ISBN 978-7-03-020403-5. Published by Science Press 16 pp 502–509.

17. Douwes, J., Heederik, D., Douwes, J., Pearce, N., Thorne, P., (2003). Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *The Annals of Occupational Hygiene* 47, 187-200.
18. Fracchia, L., Pietronave, S., Rinaldi M., Martinotti M.G. (2006). Site-related airborne biological hazard and seasonal variations in two wastewater treatment plants. *Water research* 40, 1985-1994.
19. Ferreira da Silva M., Vaz-Moreira I., Gonzalez-Pajuelo M., Nunes O., Manaia C. (2007). Antimicrobial resistance patterns in *Enterobacteriaceae* isolated from an urban wastewater treatment plant, *FEMS Microbiology Ecology*, Volume 60, Issue 1, 1 April 2007, Pages 166–176.
20. Gangamma S. (2014). Characteristics of airborne bacteria in Mumbai urban environment. *Sci Total Environ* 488–489:70–74
21. Garcia-Mena J., Murugesan S., Pérez-Muñoz A., García-Espitia M., Maya O., Jacinto-Montiel M., Monsalvo-Ponce G., Piña-Escobedo A. Domínguez-Malfavón L., Gómez-Ramírez M., Cervantes-González E., Núñez-Cardona M. (2016). Airborne Bacterial Diversity from Low Atmosphere of Greater Mexico City. *Microb Ecol* 72:70–8. Springer Science+Business.
22. Gotkowska-Plachta, A., Filipkowska, Z., Korzeniewska, E., Janzukowicz, W., Dixon, B., Golas, I., Szwalgin, D. (2013). Airborne microorganisms emitted from wastewater treatment plant treating domestic wastewater and meat processing industry wastes. *Clean-Soil Air Water* 41, 429-436.
23. Gil M. (2000). *Staphylococcus aureus*: Microbiología y aspectos moleculares de la resistencia a meticilina. *Rev. Chile Infect*; 17(2): 145-152.
24. Gregory PH. (1973). *The microbiology of the atmosphere*. Ed. John Wiley and Sons, New York..
25. Herrera Aguilar K. (2009). Impacto de la calidad microbiológica del aire externo en el ambiente interno en la salud del personal de cuatro laboratorios de instituciones públicas en la Ciudad de Guatemala y Barcenas Villa Nueva.
26. Hurtado Ayala L.A. (2015). Evaluación espacio-temporal de consorcios microbianos en la cuenca atmosférica de la ciudad de Tijuana, B. C. Tesis de doctoral.

27. Hurtado L., Rodríguez G., López J., Castillo J., Molina L., Zavala M., Quintana P. (2014). Characterization of Atmospheric Bioaerosols at 9 sites in the Cal-Mex Region, Tijuana, Mexico. *Atmospheric Environment* 96 : 430-436.
28. Industrial Wastewater Management Treatment, and Disposal. (2008). 3ª Edición WEF Manual of Practice No. FD-3.
29. Islam M., Uddin M., Alam M., Kobayashi N., Ahmed M., (2011). Detection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) from animal and human origin in Bangladesh by polymerase chain reaction. *Bangladesh Journal of Veterinary Medicine*, 161-166.
30. Junhuni, Z., Ruifu, Y., Fengxiang, C., Meiling, C., Hong, C. (1997). Polymerase chain reaction analysis of laboratory generated bioaerosols. *Aerobiologia* 13 (1), 7-10.
31. Kowalski M., J. Wolany, J.S. Pastuszka, G. Plaza, A. Walzlo, K. Ulfig, A. Malina. (2017). Characteristics of airborne bacteria and fungi in some Polish wastewater treatment plants. *Springer. Int. J. environ. Sci. technol* 14:2181-2192
32. Le Goff O., Godon J., Milferstedt K., Bacheley H., Steyer J.P., Wery N. (2012). A new combination of microbial indicators for monitoring composting bioaerosols. *Atmospheric Environment*: 61:428-433 Elsevier.
33. Li, J., Zhou, L., Zhang, X., Xu, C., Dong, L. (2015). Bioaerosol emissions and detection of airborne antibiotic resistance genes from a wastewater treatment plant. *Elsevier*, 30, 1-9.
34. Lighthart, B. (1997). The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. *FEMS Microbiology Ecology* 23: 263-274. Elsevier, Gran Bretaña.
35. Maldonado-Vega, M., Peña-Cabriales, J.J., De los Santos Villalobos, S., Castellanos-Arévalo, A., Camarena-Pozos, D., Arévalo-Rivas, B., Valdés-Santiago, L., Hernández-Valadez, L., Guzmán de Peña, D. (2014). Bioaerosoles y Evaluación de la calidad del aire en dos centros hospitalarios ubicados en León, Guanajuato, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 30, núm. 4, pp. 351-363.

36. Meier R y Zingre H. (2000). Qualification of air sampler systems: the MAS-100, Swiss Pharma 22: 15-21.
37. MERCK COMPANY. Manual 02 del MAS-100
38. Metcalf y Eddy (1996) Ingeniería de las aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. 3ª Edición Volúmenes 1 y 2. Mc. Graw Hill. Mexico.
39. Metcalf y Eddy, Inc. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill
40. Zimmerman, M.C., Gerardi M., (2005). Wastewater Pathogens. Willey-Interscience.
41. Michalkiewicz M., Pruss A., Dymaczewski Z., Jez-Walkowiak J., Kwasna S. (2011). Microbiological air monitoring around municipal wastewater treatment plant, Pol. J. Environ. Stud. Vol. 20, No.5 , 1243-1250.
42. Mohr A. (2002). Fate and transport of microorganisms in air. En: Manual of Environmental Microbiology”, 2<sup>nd</sup> Edition ASM Press, Washington, 827-838
43. Millipore, Manual de usuario M air T (2010).
44. Noyola A., Morgan-Sagastume J.M., Guereca L.P. (2013). Selección de Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. México.
45. NTP 288. Síndrome del edificio enfermo: enfermedades relacionadas y papel de los bioaerosoles. Ministerio de trabajo y asuntos sociales. España (2003).
46. Reporte SEMARNAT, (2015). Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco.
47. Rodie B. E. y Hardeberg. (1987). Ingeniería Sanitaria. Ed. Continental S.A. de C.V. México D.F.
48. Rosas I., Cravioto A. y Excurra E. (2004). Microbiología ambiental. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
49. Sánchez -Monedero, M. A., Aguilar, M. I., Fenoll, R. y Roig, A. (2007). Generación de bioaerosoles en estaciones depuradoras de aguas residuales. Ingeniería Revista Academica de la FI-UADY, 11-1: 37-42
50. Sánchez -Monedero, M. A., Aguilar, M. I., Fenoll, R. y Roig, A. (2008). Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants. Water research 42: 3739-3744 Elsevier.

51. Soto, T, Lozano, M, Vicente-Soler, J, Cansado, J & Gacto, M. (2009). Microbiological survey of the aerial contamination in urban areas of the city of Murcia, Spain, *Anales de Biología* 31: 7-13.
52. Park C.W., Park J.W., Lee S.H. Hwang, J. (2014). Real-time monitoring of bioaerosols via cell-lysis by air ion and ATP bioluminescence detection, *Biosensors and Bioelectronics* Volume 52, Pages 379–383.
53. Pascual, L., Pérez-Luz, S., Amo, A., Moreno, C., Apraiz, D., Catalán, V. (2001). Detection of *Legionella pneumophila* in bioaerosols by polymerase chain reaction. *Can. J. Microbiol.* 47, 341-347.
54. Pascual L., Pérez S., Yáñez M. A., Santamaría A., Gibert K., Salgot M., Apraiz D. y Catalán V. (2003). Bioaerosol emission from wastewater treatment plants. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España; Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal Sanitaria y Edafología, Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona, Barcelona.
55. Parkin, G. F. and Owen, W.F. (1986). “Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges.” *Journal of Environmental Engineering*, 24 (8): 867-920.
56. Piatkin, K.D. y Krivoshein, Y.S. (1981). *Microbiologia*. Editorial MIR., pp 683.
57. Orsini, M., Laurenti, P. Boninti, F., Arzani, D., Ianni, A., Romano-Spica, V. (2002). A molecular typing approach for evaluating bioaerosol exposure in wastewater treatment plant workers. *Water Res.* 36, 1375-1378.
58. Rizzo, L., Manaia C., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C., Ploy, M.C., Michael, Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review. *Sci. Total Environ.* 447, 345-360.
59. Sykes, P., Jones, K., Wildsmith, J.D. (2007). Managing the potential public health risk from bioaerosol liberation at commercial composting sites in the UK: an analysis of the evidence base. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 410-424.
60. Tamagnini L. M, Paraje M. (2015). ¿Que son las bacterias viables no cultivables? (revisión bibliográfica) *Revista Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales*, Vol. 2. 99-102.

61. Tilley, I.R. (1997). *Bioaerosols: A Survey*. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1-20.
62. Tunlid, A., H. A. J. Hoitink, C. Low y D. C. White. (1989). Characterization of bacteria that suppress *Rhizoctonia* damping-off in bark compost media by analysis of fatty acid biomarkers. *Applied and environmental microbiology* 55: 1368-1374.
63. Vadrot, C., Bex, V., Moulleseaux, A., Squinazi, F., Darbord, J.-C. (2004). Detection of *Micobacterium tuberculosis* complex by PCR in hospital air. *J.Hosp. Infec.* 58 (4), 262-267.
64. Velázquez-Meza ME, Aires de Sousa M, Echaniz AG, Solórzano SF, Miranda NG, Silva SJ, de Lencastre H. (2004). Surveillance of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in a pediatric hospital in Mexico City a 7 year period (1997 to 2003): Clonal evolution and impact of infection control. *J Clin Microbiol*; 42: 3877-80.
65. Walsera, S., Gerstnera D., Brennera B. (2015). Evaluation of exposure–response relationships for health effects of microbial bioaerosols – A systematic review, *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 218: 577–589.
66. Warneck, P. (1988). *Chemistry of the natural atmosphere*. In: *International Geophysics Series*, vol. 41. Academic Press, Inc., 770 p.
67. Wu Y., Chan C., Chew G. L., Shih P., Lee C. y Chao H. J. (2003). Meteorological factors and ambient bacterial levels in a subtropical urban environment. *Int J Biometeorol* DOI 10.1007/s00484-011-0514-6.
68. Wu S., Wang B., Yang D., Wei H., Li H., Pan L., Huang L., Wang X., Qin Y., Zheng C., Shima M., Deng F., Guo X. (2016). Ambient particulate air pollution and circulating antioxidant enzymes: A repeated-measure study in healthy adults in Beijing, China, *Environmental Pollution* 208: 16-24.
69. Xuesong G., Pianpian W., Wenjie D., Weiyi Z., Lin L. (2014). Reduction and characterization of bioaerosols in a wastewater treatment station via ventilation. *Journal of environmental sciences* 26:1575-1583.

## Cibergrafía

70. Instituto nacional de ecología y cambio climático.  
<<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/440/cap1.html> [20/05/16 12:00]
71. CONAGUA<<https://datos.gob.mx/busca/dataset/catalogo-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion>> [28/09/2017 10:00]
72. Apuntes de población de Baja California  
<<http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2013/Apunte%20Poblacion%20de%20Olos%20municipios%20de%20Baja%20California%202010-2030.pdf>> [18/04/2017]
73. INEGI<<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/02/02005.pdf>> [18/04/2017]
74. Manual de depuración de aguas residuales urbanas <  
<http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>> [05/10/17 18:00]
75. Oliver König, Jonas Kaufmann, (2016). Windfinder Version 3.0.2 [Aplicacion movil]  
<https://www.windfinder.com/#3/52.5170/13.4000>
76. Catalogo TISH< <https://tisch-env.com/impactors/non-viable-cascade-impactor/>  
>[10/02/2018 9:25]
77. Gobierno de Baja California  
<[http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro\\_estado/ubica\\_geografica.jsp](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/ubica_geografica.jsp)>
78. Catalogo Thermo Fisher Scientific
79. Catalogo Merk Millipore
80. OMS <http://www.who.int/es/news-room/detail/27-02-2017-who-publishes-list-of-bacteria-for-which-new-antibiotics-are-urgently-needed>
81. Diagnóstico y salud de estado de Baja California ISESALUD 2013  
[www.bajacalifornia.gob.mx/portal/gobierno/ped/doctos/diagnostico\\_estrategico.pdf](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/gobierno/ped/doctos/diagnostico_estrategico.pdf)  
[24/04/2018]

## Anexos

Anexo 1. Tabla de corrección estadística de Feller para tapa del orificio

Tabla de conversión orificios positivos MAS-100

Tapa de Impactación 300 x 0.6

MBV AG, 8712 Stäfa

r = Número de unidades formadoras de colonias contadas en la placa Petri de 90 mm

Pr = Total estadístico probable

r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr
1	1	51	56	101	123	151	209	201	332	251	541
2	2	52	57	102	124	152	211	202	335	252	547
3	3	53	58	103	126	153	213	203	338	253	553
4	4	54	59	104	127	154	216	204	341	254	560
5	5	55	61	105	129	155	218	205	344	255	566
6	6	56	62	106	131	156	220	206	347	256	573
7	7	57	63	107	132	157	222	207	350	257	580
8	8	58	64	108	134	158	224	208	353	258	587
9	9	59	66	109	135	159	226	209	357	259	594
10	10	60	67	110	137	160	228	210	360	260	601
11	11	61	68	111	138	161	230	211	363	261	609
12	12	62	69	112	140	162	232	212	367	262	616
13	13	63	71	113	142	163	235	213	370	263	624
14	14	64	72	114	143	164	237	214	374	264	632
15	15	65	73	115	145	165	239	215	377	265	641
16	16	66	74	116	146	166	241	216	381	266	649
17	17	67	76	117	148	167	243	217	384	267	658
18	19	68	77	118	150	168	246	218	388	268	667
19	20	69	78	119	151	169	248	219	391	269	677
20	21	70	80	120	153	170	250	220	395	270	686
21	22	71	81	121	155	171	253	221	399	271	696
22	23	72	82	122	156	172	255	222	403	272	707
23	24	73	83	123	158	173	257	223	407	273	717
24	25	74	85	124	160	174	260	224	410	274	728
25	26	75	86	125	161	175	262	225	414	275	740
26	27	76	87	126	163	176	264	226	418	276	752
27	28	77	89	127	165	177	267	227	422	277	765
28	29	78	90	128	167	178	269	228	427	278	778
29	30	79	92	129	168	179	272	229	431	279	791
30	32	80	93	130	170	180	274	230	435	280	805
31	33	81	94	131	172	181	277	231	439	281	820
32	34	82	96	132	174	182	279	232	444	282	836
33	35	83	97	133	175	183	282	233	448	283	853
34	36	84	98	134	177	184	284	234	452	284	871
35	37	85	100	135	179	185	287	235	457	285	889
36	38	86	101	136	181	186	289	236	462	286	909
37	39	87	103	137	183	187	292	237	466	287	931
38	41	88	104	138	184	188	295	238	471	288	954
39	42	89	105	139	186	189	297	239	476	289	979
40	43	90	107	140	188	190	300	240	481	290	1006
41	44	91	108	141	190	191	303	241	486	291	1036
42	45	92	110	142	192	192	306	242	491	292	1069
43	46	93	111	143	194	193	308	243	496	293	1107
44	47	94	113	144	196	194	311	244	501	294	1150
45	49	95	114	145	198	195	314	245	507	295	1200
46	50	96	115	146	200	196	317	246	512	296	1260
47	51	97	117	147	202	197	320	247	518	297	1335
48	52	98	118	148	203	198	323	248	523	298	1435
49	53	99	120	149	205	199	326	249	529	299	1585
50	55	100	121	150	207	200	329	250	535	300	1885

Tabla XVII. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales "Monte de los Olivos"

Muestra	UFC/m3	Hora	Temperatura	HR %	Dirección del viento	Velocidad km/h	Fecha de Muestreo	Estación
MOC1	279183	09:49	85	48	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
MOTA1	10000	10:00	20	85	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera

<b>MOTA2</b>	70531	10:04	20	85	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MOL1</b>	60379	10:12	24	48	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MOAT1</b>	10000	10:21	21	54	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MOC2</b>	625768	10:05	22	50	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>MOTA2</b>	30075	10:12	25	42	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>MOAT2</b>	30075	10:18	25	42	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>MOC3</b>	70531	03:21	32	37	Oeste	5	10/06/2016	Verano
<b>MOTA13</b>	131992	03:26	32	38	Oeste	5	10/06/2016	Verano
<b>MOTA23</b>	0	03:29						
<b>MOL3</b>	163080	03:33	33	35	Oeste	5	10/06/2016	Verano
<b>MOAT3</b>	376749	03:37	32	36	Oeste	5	10/06/2016	Verano
<b>MOTA4</b>	10000	01:37	31	43	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MOTA42</b>	30075	01:40	32	38	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MOC4</b>	111400	01:46	31	39	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MOL4</b>	194412	01:55	31	38	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MOAT4</b>	10000	02:00	30	39	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MOTA5</b>	60379	02:05	23	18	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>MOL5</b>	204910	03:10	32	23	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>MOAT5</b>	10000	03:13	34	22	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>MOC5</b>	10000	03:02	33	25	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>MOTA6</b>		02:06	21	31	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>MOC6</b>	311441	02:11	29	31	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>MOL6</b>	257821	02:19	29	30	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>MOAT6</b>	40151	02:23	34	22	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño

*Tabla XVIII. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales "La Morita"*

<b>Muestra</b>	<b>UFC/m3</b>	<b>Hora</b>	<b>Temperatura</b>	<b>HR %</b>	<b>Dirección del viento</b>	<b>Velocidad km/h</b>	<b>Fecha de Muestreo</b>	<b>Estación</b>
<b>ML1</b>	40151	11:11	27	49	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>ME 1</b>	30075	11:23	24	49	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MPT1</b>	101143	11:28	24	50	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MAT1</b>	30075	11:35	26	45	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera
<b>MTA1</b>	20025	11:52	29	39	Suroeste	10	21/03/2016	Primavera

<b>MTA2</b>	50252	11:00	28	37	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>ML2</b>	20025	11:12	29	33	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>MAT2</b>	10000	11:15	29	32	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>ME2</b>	70531	11:26	29	32	Oeste	5	02/04/2016	Primavera
<b>MTA4</b>	131992	12:35	23	64	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>ML4</b>	311441	12:41	25	60	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MAT4</b>	101143	12:45	27	56	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>ME4</b>	0	12:55	28	48	oeste-noroeste	15	17/09/2016	Otoño
<b>MTA5</b>	0	02:06	31	29	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>ML5</b>	101143	02:18	33	24	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>MAT5</b>	90913	02:13	32	27	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>ME5</b>	152690	02:25	33	23	oeste-noroeste	18.52	08/10/2016	Otoño
<b>ME6</b>	215437	01:21	27	33	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>MAT6</b>	121682	01:14	25	35	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>ML6</b>	142328	01:12	24	36	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño
<b>MTA6</b>	80709	01:02	24	38	Suroeste	25.9	05/11/2016	Otoño

La principal fuente de emisión de bioaerosoles en la planta de tratamiento de aguas residuales “Rosarito Norte” es el cribado.

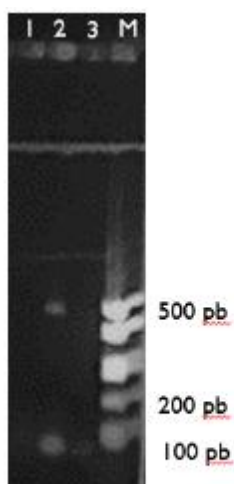
*Tabla XIX. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales “Rosarito Norte”*

Muestra	UFC/m3	Hora	Temperatura	HR %	Dirección del viento	Velocidad km/h	Fecha de Muestreo	Estación
<b>RTA1</b>	10000	09:32	19	65	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RC1</b>	0	09:37	21	56	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RTA2</b>	0	09:42	22	59	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RAT1</b>	10000	09:49	21	57	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RTA2</b>	90913	08:42	22	60	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RC2</b>	0	08:49	21	62	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RTA2-2</b>	60379	08:56	20	68	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RAT2</b>	0	09:01	19	70	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RTA3</b>	30075	01:58	31	42	sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RC3</b>	387738	02:06	31	45	sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RTA23</b>	30075	02:12	31	49	sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RAT3</b>	40151	02:18	30	47	sureste	26	20/08/2016	Verano

<b>RTA3*</b>	215437	03:02	30	47	sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RC4</b>	111400	02:20	31	44	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RTA14</b>	0	02:24	31	41	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RTA24</b>	0	02:30	31	40	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RAT4</b>	0	02:35	30	42	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RE6</b>	90913	01:35	29	44	sureste	17	19/11/2016	Otoño
<b>RAT6</b>	10000	01:22	30	33	sureste	17	19/11/2016	Otoño
<b>RTA16</b>	80709	01:31	29	45	sureste	17	19/11/2016	Otoño
<b>RTA26</b>	80709	01:40	28	45	sureste	17	19/11/2016	Otoño

*Tabla XX. Datos del muestreo realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales "Rosarito Uno"*

Muestra	UFC/m3	Hora	Temperatura	HR %	Dirección del viento	Velocidad km/h	Fecha de Muestreo	Estación
<b>RIE1</b>	20025	10:33	22	54	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RIC1</b>	194412	10:47	23	48	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RITA1</b>	30075	11:00	24	41	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RITA21</b>	40151	11:04	25	40	Suroeste	17	22/03/2016	Primavera
<b>RIEX2</b>	80709	09:30	22	67	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RITA12</b>	0	09:40	22	58	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RITA22</b>	0	09:44	21	63	Sur	8	14/05/2016	Primavera
<b>RITA13</b>	152690	03:00	30	47	Sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RITA23</b>	111400	03:02	29	52	Sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RITA33</b>	121682	03:06	31	46	Sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RICL3</b>	257821	03:10	31	47	Sureste	26	20/08/2016	Verano
<b>RICL4</b>	80709	03:20	31	41	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RITA24</b>	142328	03:26	31	41	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RITA14</b>	101143	03:30	30	38	noroeste	20	24/09/2016	Otoño
<b>RIC6</b>	142328	02:08	28	35	Sureste	17	19/11/2016	Otoño
<b>RITA26</b>	343962	02:19	28	37	Sureste	17	19/11/2016	Otoño
<b>RITA6</b>	50252	02:13	28	34	Sureste	17	19/11/2016	Otoño



Electroforesis en gel de agarosa de los productos amplificados para el gen *mecA*. Muestras del pocillo 1 corresponden a MOTA4, 3 control negativo, 2 control positivo y M (marcador de 500 pb). La muestra fue negativa, no se encontró el gen resistente a meticilina en la muestra de Monte de los olivos del Tanque de aireación durante el verano.

Figura 26. Electroforesis

Tabla XXI. Medidas de condiciones ambientales por estación del año.

PTAR	Estación	Media de Factores ambientales			
		Temperatura	%Humedad	Dirección del viento	Velocidad km/h
<b>Monte de los Olivos</b>	Primavera	26	43	Oeste	7
	Verano	31	39	Oeste-noroeste	15
	Otoño	29	25	Oeste-noroeste	22
<b>La Morita</b>	Primavera	27	41	Suroeste	8
	Verano	26	57	Oeste-noroeste	15
	Otoño	29	31	Oeste-noroeste	22
<b>Rosarito Norte</b>	Primavera	21	62	Sur	13
	Verano	31	44	Suroeste	23
	Otoño	29	42	Suroeste	17
<b>Rosarito 1</b>	Primavera	23	53	sur	13
	Verano	30	45	Suroeste	23
	Otoño	28	35	Suroeste	17

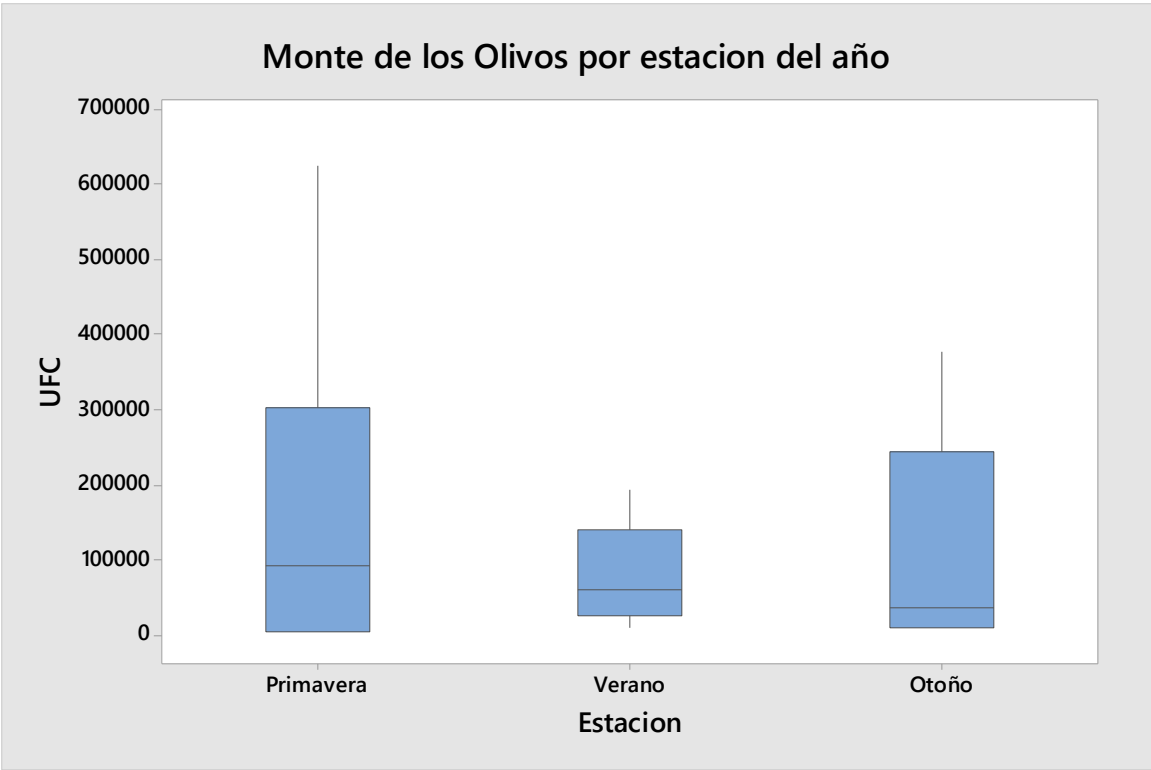


Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes "Monte de los olivos" comparación de estaciones.

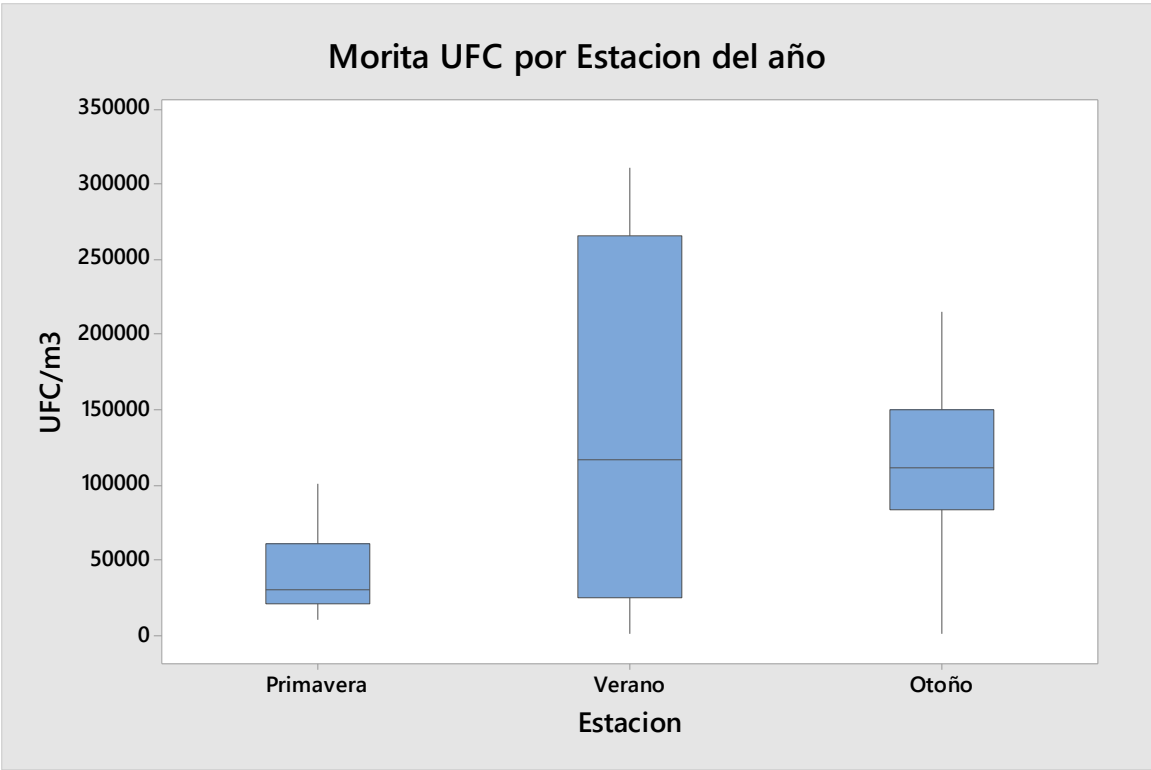


Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes "La Morita" comparación entre estaciones del año

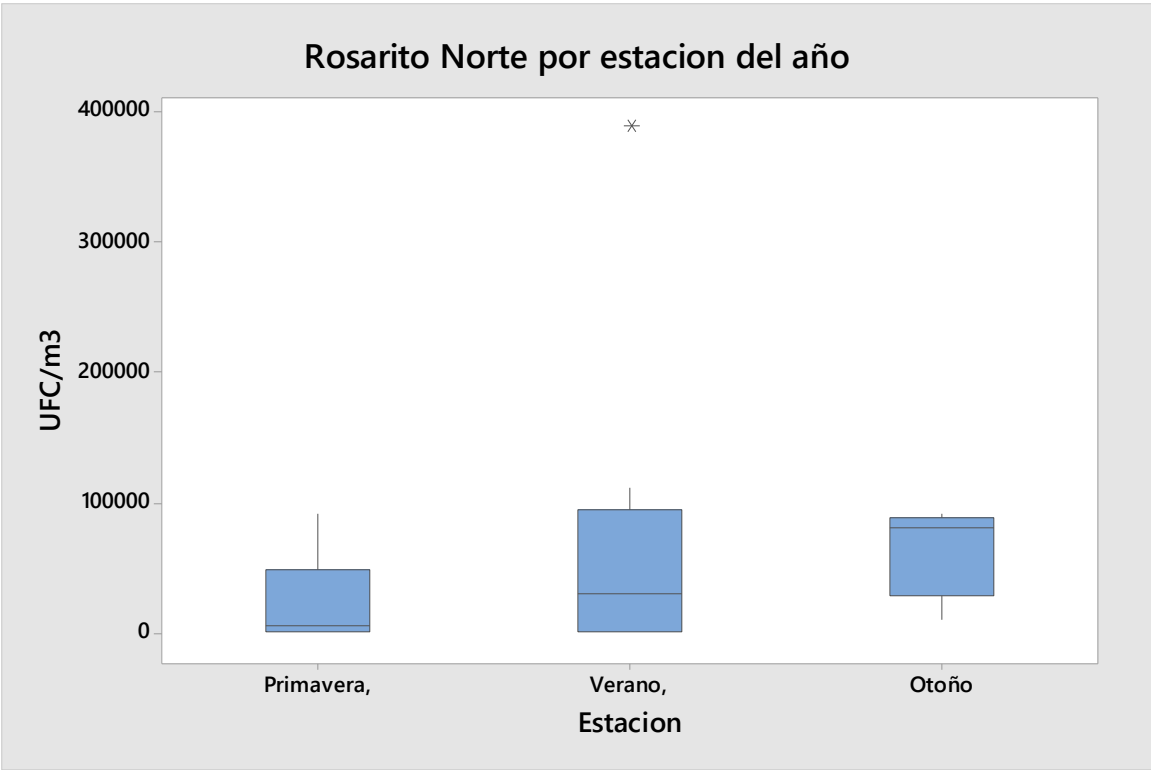


Figura 28. Diagrama de cajas y bigotes "Rosarito Norte" comparación entre estaciones del año

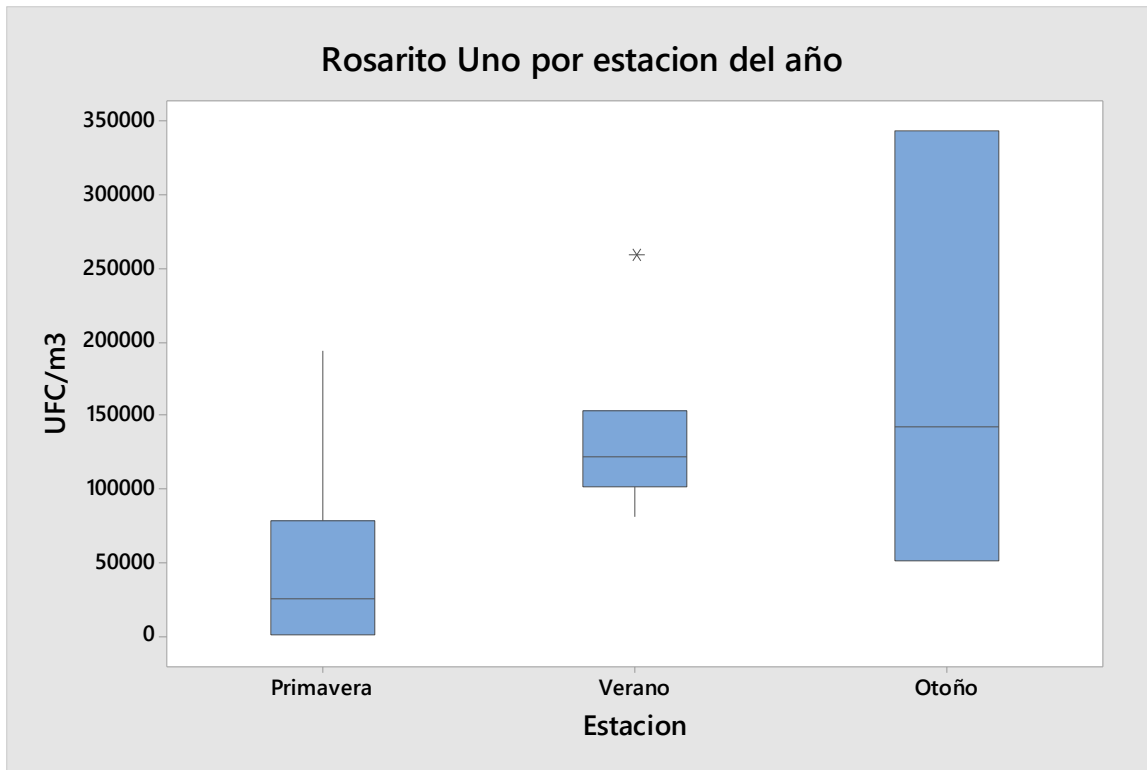


Figura 29. Diagrama de cajas y bigotes "Rosarito 1" comparación entre estaciones del año

## Fotografias

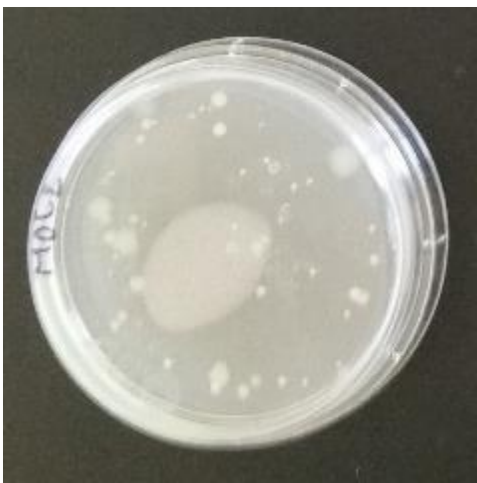


Figura 30. Caja Petri lista para el conteo de unidades formadoras de colonias.

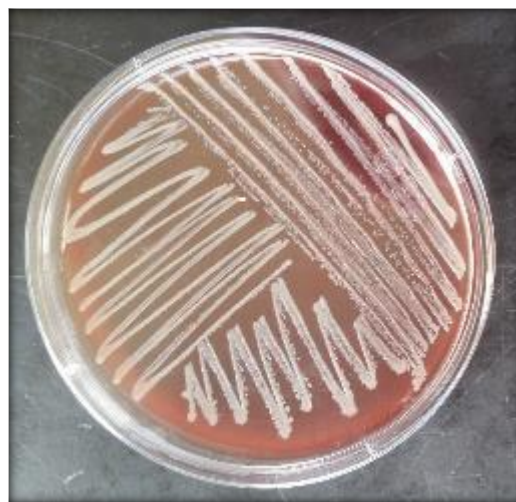


Figura 31. Agar Mckonkey con crecimiento de cepa lactosa positivo

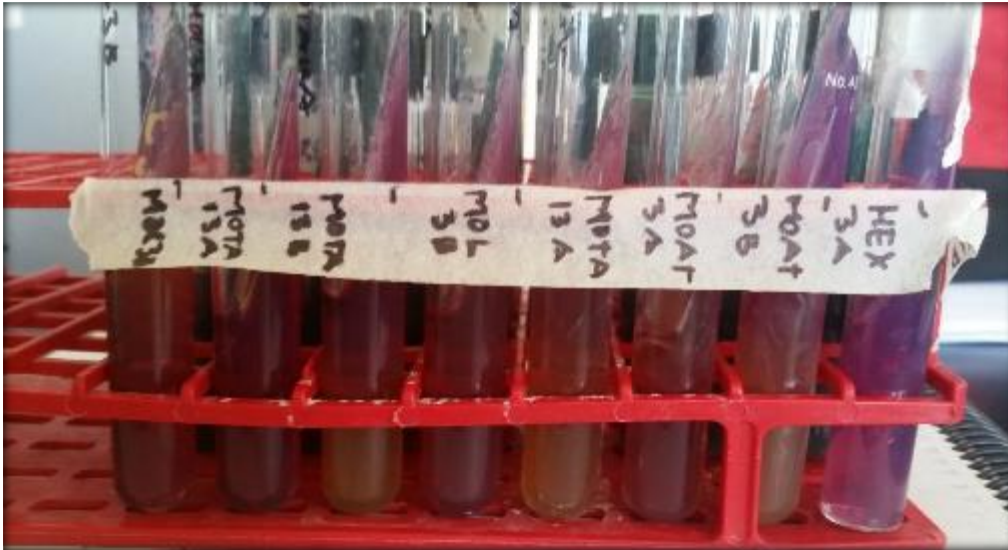


Figura 32. Pruebas bioquímicas



Figura 33. Pruebas bioquímicas II



Figura 34. Muestreador M air T