



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**TECNOLOGIAS ACTUALES Y EMERGENTES PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y LAS
VINAZAS PROVENIENTES DE LA DESTILACION DEL
TEQUILA**

MONOGRAFÍA

**QUE PRESENTA COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

CARLOS ALEJANDRO CEDANO MARTINEZ

SUPERVISORES

DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

M.C JAIME D. CUEVAS DOMÍNGUEZ

M.I.A JUAN CARLOS ÁVILA REVELES

Agradecimientos

Para llevar a término este trabajo monográfico de la mejor manera posible fue imprescindible el apoyo de muchas personas a las que les muestro mi gratitud.

A mi difunto padre el Ing. Alejandro Cedano Núñez y a mi madre la Lic. Rosa María Martínez Sierra, por su apoyo incondicional que me dado durante toda mi vida y de los cuales siempre pude y podre confiar en cualquier momento y bajo cualquier circunstancia.

A mi tío Marco Antonio Cedano Núñez por su invaluable guía y enseñanzas.

A mis tías María Rosa Cedano Núñez y Alfonsina Cedano Núñez que siempre me dieron animo y una guía certera y desinteresada.

A mi amigo Luis Arturo García Zapata y a la Fam. García Zapata, por su apoyo tanto en momentos difíciles como en los momentos gratos.

A mis maestros, ya que sin su paciencia y enseñanzas no hubiera podido terminar exitosamente mis estudios profesionales.

A mi amigo Luis Tello Mejía por su apoyo en momentos difíciles y que generalmente fueron irrealistas.

A mis tres maestros y revisores, Dr. José Hernández Rodríguez, M.C Jaime D. Cuevas Domínguez y M.I.A Juan Carlos Ávila Reveles, quienes me apoyaron con sus enseñanzas y aun más importantemente con su paciencia que fue necesaria para llevar a término tanto mis estudios profesionales como este trabajo monográfico.

Carlos Alejandro Cedano Martínez

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
ANTECEDENTES	6
1.1 Origen del Tequila.....	6
1.2 Que es el Tequila y el lugar de producción	6
1.3 El proceso de la producción del tequila.	10
1.4 Cocción de las piñas y la fermentación.	13
1.5 Preparación del mosto para la formulación y la fermentación.	16
1.5.1 Formulación.....	17
1.5.2 Fermentación.....	19
1.6 Primera destilación	19
1.6.1 Destilación de refinación.....	22
1.7 Dilución de Tequila	23
1.8 Envasado del tequila.	24
1.9 Vinazas	25
1.9.1 Parámetros de las vinazas	27
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	33
2.1. Tipos de tratamientos de aguas residuales.....	33
2.2 Tratamientos físicos de aguas residuales.....	35
2.2.1 Cribado.	35
2.2.2 Desarenadores.....	35
2.2.3 Sedimentadores ó Decantación primaria.....	37
2.2.4 Filtración.....	38
2.2.5 Evaporación	39
2.2.6 Evaporador de tubo vertical.	41
2.3 Tratamiento Químico de aguas residuales.....	42
2.3.1 Coagulación	43
2.3.2 Floculación.....	43
2.3.3 Adsorción.....	44
2.3.4 Oxidación.....	44

2.3.5 Intercambio iónico	45
2.3.6 Inhibición	46
2.3.7 Quelación o Quelatación	47
2.4 Tratamiento biológico de aguas residuales.....	47
2.4.1 Biodigestores aerobios.....	48
2.4.1.1 Fangos activados: Proceso básico	48
2.4.1.2 Procesos aerobios con biomasa soportada	50
2.4.2 Procesos biológicos anaerobios.....	52
2.4.3 Proceso biológico facultativo o compuesto.	54
2.4.3.1 Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno	54
TECNOLOGIAS ACTUALMENTE EN USO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS VINAZAS	57
3.1 Situación actual de la industria de la destilación azucarera.	57
3.2 Situación de la industria tequilera.....	59
3.3 Situación del tratamiento de aguas residuales de la industria cervecera.	63
NUEVAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE VINAZAS	65
4.1 La fotocátalisis como complemento o alternativa para el tratamiento de aguas residuales.	65
4.2 Dispositivos de Captación Solar Usados en la Fotocatálisis.	66
4.2.1 Captadores Solares Sin Concentración.	67
4.2.1.1 Sistemas de placa plana o cascada.....	68
4.2.1.2 Sistema tubular.....	69
4.3 La fotólisis	70
4.3.1 Concentrador Cilindro-Parabólico (CCP).....	72
4.3.2 Concentrador Cilindro-Parabólico Compuesto (CPC).	74
4.4 La fotooxidación	75
COMENTARIOS FINALES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79

INTRODUCCIÓN

El tequila es una bebida alcohólica con reconocimiento a nivel internacional y siendo un gran orgullo para los mexicanos, sin embargo, en general se desconocen los procesos necesarios para la elaboración de este producto.

Desde las primeras décadas del siglo XIX comenzó la producción a gran escala de tequila que se convirtió en el primer producto elaborado de exportación de lo que hoy es el estado de Jalisco.

Hoy en día la producción del tequila es una industria de gran importancia para México, a tal grado que se ha convertido en un producto distintivo del país. Sin embargo, como todas las industrias, la del tequila también tiene sus problemas, y uno de los principales actualmente es que durante la elaboración de esta bebida, se generan unos residuos llamados “vinazas” que tienen un gran impacto sobre el ambiente.

Las vinazas son los residuos del proceso de destilación, que contienen materia orgánica microbiana proveniente de los residuos de la levadura, sales, restos de bagazo, residuos de alcohol, azúcares. Además, de acuerdo con algunos estudios las vinazas de las destilerías contienen sustancias del tipo fenol las cuales son tóxicas para las plantas.

Las vinazas tequileras representan un problema de contaminación muy importante debido a la elevada carga orgánica, esto aunado a que por cada litro de tequila se generan de 7 a 10 litros de vinazas. Así cabe señalar que la calidad de las vinazas tequileras no cumple con las regulaciones ambientales para una descarga directa a cuerpos receptores, de acuerdo con la norma oficial mexicana, (NOM-064-ECOL-1994), la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de destilerías.

Para las diferentes plantas productoras del tequila el destino final de las vinazas difiere, en algunos casos las vinazas son almacenadas para posteriormente ser tratadas, “en otras se descargan en los terrenos de cultivo adyacentes a la planta, al drenaje municipal o a los ríos después de pasar por un tiempo en una laguna de oxidación.

De acuerdo con la secretaria de medio ambiente en el estado de Jalisco solamente las vinazas son descargadas en promedio de la siguiente forma:

- 24% al Drenaje.
- 29% al Riego a cultivos.
- 47% a Ríos o arroyos.

Así tan solo analizando rápidamente el caso del estado de Jalisco, se puede apreciar el enorme daño que causan al ambiente estos residuos.

Esto es porque tras la enorme producción del tequila queda una cantidad aun mayor de vinazas. Las cuales generan un gran impacto al medio ambiente ya que por sus características tienen un potencial

de afectación importante. Cuando las vinazas son irrigadas a las tierras de forma constante, estas se tornan estériles. Las aguas se ven afectadas de forma distinta, las vinazas toman todo el oxígeno que la vida acuática necesita para su supervivencia y es entonces que el ecosistema se ve gravemente afectado.

Es a partir de esta problemática que surge la idea del presente trabajo monográfico, en donde se pretenden describir algunos de los principales retos de la industria tequilera en cuanto a la problemática de la eliminación de los residuos del proceso de destilación del tequila, que son las denominadas “vinazas”.

Para llevar a cabo este trabajo, se ha recopilado información sobre los diferentes tipos de tecnologías disponibles para el tratamiento de residuos similares a las vinazas, ejemplificando las más utilizadas hoy en día en diversas industrias semejantes, pero además se ha incluido un apartado para describir nuevas tecnologías emergentes que aun cuando hoy en día son todavía ineficientes o altamente costosas en su operación, en un futuro próximo pueden llegar a constituir una opción viable para resolver los problemas ambientales generados por estos residuos.

Se ha tratado en todo el documento de mostrar la información más relevante de cada tecnología, buscando explicar su operación, cuáles son las viables y la forma en que permiten reducir en mayor o menor medida los problemas generados por las vinazas.

Así el presente trabajo monográfico, pretende cumplir los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Estudiar las características de las vinazas como un desecho de la elaboración del tequila, así como las tecnologías actualmente en uso para su tratamiento y las nuevas tecnologías que están en desarrollo, con el fin de reducir su impacto al medio ambiente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Crear conciencia del impacto ambiental provocado por las vinazas procedentes de la destilación del tequila y del escaso tratamiento que se les da.
2. Proveer la información sobre la efectividad de los tratamientos de aguas residuales actuales.
3. Describir las tecnologías emergentes de tratamiento de aguas residuales en su posible aplicación a las vinazas.

Para cubrir los objetivos señalados, se ha estructurado el presente trabajo de la siguiente forma:

Capítulo I Antecedentes: Este capítulo comprende la información por la cual se puede identificar al tequila, incluyendo el “agave azul como materia prima y la territorio denominado de origen como área de cosecha y elaboración del mismo. Se hace especial hincapié en la descripción de los procesos de elaboración de este producto mexicano.

Se da a conocer una descripción detallada de las vinazas tequileras, destacando sus características y proporcionando referencias para diferenciar el potencial de impacto medioambiental que las vinazas tequileras tiene en comparación a otras aguas residuales.

Capítulo II Tipos de tratamientos de aguas residuales: Tomando en cuenta que las vinazas tequileras reciben muy poco ó nulo tratamiento, en este capítulo se presenta una concisa compilación de una gran cantidad de tecnologías convencionales dirigidas al tratamiento de aguas residuales. También se exponen los puntos fuertes y débiles de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Capítulo III Tecnologías actualmente en uso para el tratamiento de las vinazas: Este capítulo fue realizado para ilustrar y explicar las dificultades de la aplicación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales, con esta finalidad se presentan casos reales de plantas de tratamiento de vinazas tequileras y de otras industrias alcoholeras que se asemejan en sus características. De esta manera se muestra las similitudes y diferencias al tratar diferentes tipos de vinazas en condiciones reales.

Capítulo IV Nuevas alternativas de tratamiento de vinazas: Todas las tecnologías ya establecidas ó convencionales basan su operación en energía proveniente de fuentes no renovables. Se espera que en un futuro no lejano las fuentes de energía no renovable no sean capaces de mantener los bajos costos de la energía, como consecuencia los tratamientos, así llamados, convencionales serán más costosos.

Así como ya existen fuentes de energía renovable también hay tratamientos de aguas residuales que aprovechan estas fuentes por lo que en este documento se presenta información sobre tratamientos que utilizan principalmente energías renovables, en el futuro estos tratamientos podrían ser o no parte de los tratamientos ya existentes ya que no se ven tan severamente afectados por el aumento en los costos de las energías no renovables.

Capítulo V Comentarios finales: Se presentan algunos comentarios finales recalcando que el tratamiento a las vinazas sigue siendo hoy en día un problema, para el cual no existe una única solución y que necesita mayor estudio y que debe involucrar diversas especialidades de la ciencia.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

Este capítulo integra la información más relevante para comprender a que se le denomina tequila, dentro de esta información se indica que para la elaboración del tequila se requiere “Agave Azul” el cual debe ser cosechado en las áreas que están comprendidas territorio denominado de origen, la cual es ampliamente detallada en este capítulo.

El tequila es una parte importante de la cultura mexicana, por lo cual en este capítulo se encuentra una guía que presenta de forma detallada pero simple todos los procesos industriales necesarios para la obtención de este producto. También se expone el lado negativo de la elaboración del tequila y es que tras su destilación quedan desechos llamados vinazas de las cuales se presentan sus características y la problemática que las vinazas representan para el medio ambiente.

1.1 Origen del Tequila

El tequila es un agua ardiente obtenido de la destilación de una mezcla llamada mosto y está elaborada con las mieles de “Agave Azul”.

En el pueblo de Tequila en algún momento del siglo XVI se presume que los españoles comenzaron la elaboración de mezcal de agave azul, el agave azul pese a su gran cantidad en esas tierras era un bien muy apreciado, en ese momento lo menos importante era el mezcal pues realmente lo que se apreciaba era la versatilidad de los materiales del agave, las hojas de la planta eran aprovechadas para construir techumbres, fabricar agujas, punzones, alfileres, clavos, hacer cuerdas, elaborar papel además de utilizarse las pencas secas como combustible, sus cenizas se usaban como jabón, lejía o detergente y la savia era utilizada para la curación de heridas.

Con el tiempo se fue refinando los métodos de elaboración del mezcal hasta obtener una bebida alcohólica de mejor calidad, el tequila que se conoce hoy en día. Para las primeras décadas del siglo XIX comenzó la producción a gran escala de tequila que se convirtió en el primer producto elaborado de exportación de lo que hoy es el estado de Jalisco.

1.2 Que es el Tequila y el lugar de producción

Basándose en lo expresado en la Norma Oficial Mexicana 006-SCFI-2005 se define que: Tequila es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación de la mezcla de las mieles de agave en un porcentaje mínimo del 51 % con un preparado de otras mieles, las cuales pueden ser azúcar estándar, piloncillo, glucosa, fructuosa, melaza, etc., el agregado de azúcares no puede ser superior al 49% de la mezcla total

y es a esta combinación de mieles a la que se le llama mosto. Las mieles de agave deben de ser únicamente del “Agave tequilana weber variedad azul”, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no. El mosto es destilado en las instalaciones de la fábrica de un Productor Autorizado la cual debe estar ubicada en el territorio denominado de origen (TDO).

La NOM-006-SCFI-200 establece la clasificación de tequila.

De acuerdo al porcentaje de los azúcares provenientes del agave, se distinguen dos categorías de tequila:

- "Tequila 100% de agave" o "Tequila 100% puro de agave"
 - “Bebida alcohólica regional obtenida por destilación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído, en las instalaciones de la fábrica de un Productor Autorizado la cual debe estar ubicada en el territorio comprendido en la Declaración, derivados de las cabezas de Agave tequilana weber variedad azul, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no. Que no es susceptible de ser enriquecido con otros azúcares distintos a los obtenidos del Agave tequilana weber variedad azul cultivado en el territorio comprendido en la Declaración. Para que este producto sea considerado como “Tequila 100% de agave” debe ser envasado en la planta que controle el propio Productor Autorizado, misma que debe estar ubicada dentro del territorio comprendido en la declaración. Este producto debe ser denominado únicamente a través de alguna de las siguientes leyendas: “100% de agave”, “100% puro de agave”, “100% agave”, o “100% puro agave”, al final de las cuales se puede añadir la palabra “azul”.”
- "Tequila"
 - “Es aquel producto en el que los mostos son susceptibles de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente en la formulación con otros azúcares hasta en una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa. Este enriquecimiento máximo de hasta 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, no se puede realizar con azúcares provenientes de cualquier especie de agave. Sólo se podrá incrementar el 51% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa con azúcares reductores totales provenientes de Agave tequilana weber variedad azul cultivado en el territorio comprendido en la Declaración. Este producto puede ser envasado en plantas ajenas a un Productor Autorizado, siempre y cuando los envasadores cumplan con las condiciones establecidas en el inciso 6.5.4.2 y demás aplicables de la NOM-006-SCFI-2005.”

De acuerdo a las características adquiridas en procesos posteriores a la destilación y rectificación, el tequila se clasifica en una de las siguientes Clases:

- “Blanco”
- “Joven u Oro”
- “Reposado”
- “Añejo”
- “Extra Añejo”

Para el mercado internacional se puede sustituir la clasificación mencionada en el párrafo anterior por la traducción al idioma correspondiente, o bien, por la siguiente:

- “Silver” en lugar de Blanco
- “Gold” en lugar de Joven u Oro
- “Aged” en lugar de Reposado
- “Extra aged” en lugar de Añejo
- “Ultra aged” en lugar de Extra Añejo

El territorio denominado de origen (TDO) se publicó en el “Diario Oficial” de la federación la resolución del 22 de Noviembre de 1974 de la entonces Secretaría de Industria y Comercio, La cual otorgó la protección a la denominación de origen tequila estableciendo un territorio que hasta la fecha del 26 de junio de 2000, comprende los estados de Jalisco, Nayarit, Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas con un total de 181 municipios, los detalles de de los municipios se pueden apreciar en la figura 1.1 y en la tabla 1.1



Fig. 1.1 Mapa de la republica Mexicana que muestra en color verde oscuro los municipios considerados como territorio denominado de origen (TDO) del tequila.

La tabla 1.1 especifica la totalidad de los municipios de TDO en los estados de Jalisco, Nayarit, Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas.

Estado	Municipios
Jalisco con un total de 125 municipios	Acatic, Acatlán de Juárez, Ahualulco de Mercado, Amatitán, Ameca, Arandas, EL Arenal, Atotonilco el Alto, Autlán de Navarro, Ayotlán, Ayutla, Casimiro Castillo, Ciudad Guzmán, Cihuatlán, Cocula, Colotlán, Cautitlán de García Barragán, Cuquío, Chapala, Degollado, Encarnación de Díaz, Etzatlán, Gómez Farías, El Grullo, Guadalajara, Ixtlahuacán del Río, Iahuacán de los Membrillos, Jalostotitlán, Jamay, Jesús María, Jilotlán de los Dolores, Jocotepec, Juanacatlán, La Barca, Lagos de Moreno, La Huerta, Magdalena, Mascota, Mazamitla, Mezquitic, Ocotlán, Ojuelos de Jalisco, Pihuamo, Poncitlán, Puerto Vallarta, Quitupán, El Salto, San Juan de los Lagos, San Julián, San Martín Hidalgo, San Miguel el Alto, Sayula, Tala, Talpa de Allende, Tamazula de Gordiano, Tapalpa, Tecalitlán, Tecolotlán, Teocaltiche, Teocuitatlan de Corona, Tepatitlán de Morelos, Tequila, Tizapán el Alto, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tomatlán, Tonalá, Tototlán, Tuxpan, Unión de San Antonio, Unión de Tula, Villa Corona, Villa Hidalgo, villa Purificación, Yahualica de González Gallo, Zacoalco de Torres, Zapopan, Zapotiltic, Zapotlán del Rey, Zapotlan El Grande, Zapotlanejo, Amacueca, Antonio Escobedo, Atemajac de Brizuela, Atengo, Atenguillo, Atoyac, Bolaños, Cabo Corrientes, Cañadas de Obregón, Chimaltitán, Chiquilistlán, Concepción de Buenos Aires, Cautla, Ejutla, Guachinango, Hostotipaquillo, Huejuquilla el Alto, Huejúcar, Juchitlán, El Limón, Manzanilla de La Paz, Mexxicacán, Mixtlán, San Cristóbal de la Barranca, San Diego de Alejandría, San Gabriel , San Juanito de Escobedo, San Marcos , San Martín de Bolaños, San Sebastián del Oeste, Santa María de los Ángeles, Santa María del Oro, Techaluta de Montenegro, Tenamaxtlán, Teuchitlán, Tolimán, Tonaya, Tonila, Totatiche, Tuxcacuesco, Tuxcueca, Valle de Guadalupe, Valle de Juárez, Villa Guerrero, Zapotitlán de Vadillo.

Continuación de la tabla 1.1

Nayarit con 8 municipios	Ahuacatlán, Amatlán de Cañas, Ixtlán del Rio, Jala, Xalisco, San Pedro de Lagunillas, Santa María del Oro, Tepic.
Guanajuato con 7 municipios	Abasolo, Cuerámara, Huanimaro, Manuel Doblado Pénjamo, Purísima del Rincón, Romita.
Michoacán con 30 municipios	La Palma, Vistahermosa de Negrete, Ixtlán, Sahuayo de Jose, María Morelos, Jiquilpan, La Piedad de Cabadas, Numarán, Churintzio, Penjamillo de Degollado, Jacona de Plancarte, El Tecolote, Tangancícuaro de Arista, Coenen, Chilchota, Tanaco, Charápan, Los Reyes de Salgado, Angahuán, Peritán de Ramos, Apo, Tancitaro, Pareo, Pucuario, Acúmbaro, Zacapu Nahuatzén, Paracho de Verduzco, Arandín, Taretán.
Tamaulipas con 11 municipios	Aldama, Altamira, Antiguo Morelos, Gómez Farías, González, Llera, Mante, Nuevo Morelos, Ocampo, Tula y Xicoténcatl.

1.3 El proceso de la producción del tequila.

Basándose en las diferentes visitas realizadas a las fábricas “Tequila casa de los Gonzales”, “Casa tequilera Aranda” y “Rancho el Indio” y el asesoramiento del Maestro en Ciencias Marco Antonio Cedano Núñez se describirán los diferentes procesos para la elaboración del tequila.

1. En el campo se corta las hojas y las raíces del agave dejando únicamente la piña para la producción de tequila, a este proceso se le conoce como jima. Las piñas provenientes del campo (fig. 1.2), serán descargadas en el patio de molienda.
2. Cada vehículo debe pesarse antes de ir a recoger las piñas, y una vez ya cargado, esto con el fin de saber cuantos kilos de piña de agave se están recibiendo.
3. Todo esto debe de hacerse en una báscula pública en donde se obtendrá la “ficha de pesada” la cual contiene marcados los pesos en vacío, lleno y la diferencia que es el neto de agave recibido, además de estar foliada con un numero propio del lugar donde se renta la báscula.
4. Con esta ficha el personal de la planta es enterado de la cantidad de agave que está recibiendo y hace una entrada de almacén.

Al entrar el agave debe de verificarse lo siguiente:

- Jimado: La piña del agave ya no debe tener pencas.
- Altura de la jima de la piña: se asegurarse de que la altura del corte de la hoja del agave sea el adecuado.
- Emplagamiento: se observa que la piña no tenga evidencia de que padeció de alguna plaga.
- Color de las piñas: se revisa que el color de la piña sea el correspondiente a su madurez y que no presente anomalías.

De cada carga de piñas recibida se toma una muestra estadística con el objetivo de conocer la cantidad de azúcares que contiene el agave, que están disponibles para su posterior fermentación.

Una vez descargado el camión en el patio ahí se procederá a cortar las piñas en 2 o más porciones (fig. 1.3), esto con el fin de ser procesadas fácilmente. Una vez cortadas las piñas agave, se procederá a llenar con ellas los hornos o autoclaves (fig. 1.4).



Fig. 1.2 Foto de uno de los múltiples campos de procedencia de las piñas de agave.



Fig. 1.3 Foto de piñas de agave cortadas en 2 o más pates



Fig. 1.4 Foto de un autoclave durante el llenado.

1.4 Cocción de las piñas y la fermentación.

Cuando el horno se encuentre lleno, se cierra y se asegura la puerta, y se procede con la alimentación del vapor hasta que la presión de vapor llegue a un 1 Kg/cm^2 se mantendrá así hasta que la fuga del vapor por el desfogue sea muy alta indicando que el horno se encuentre lleno con el vapor, disminuyendo posteriormente el flujo de vapor hasta que la presión de vapor llegue a 0.5 Kg./cm^2 (fig. 1.5), se mantendrá así por un tiempo aproximado de 22 horas, este será el tiempo de cocimiento del agave.

Durante el cocimiento de las piñas de agave los hornos o autoclaves permanecen casi sellados, dejando abierta únicamente la válvula para purgar los condensados y las mieles amargas, hasta que transcurra 8 horas a partir del inicio del cocimiento, después de lo cual se cierra la válvula de mieles amargas, y se abre la de mieles dulces para iniciar la recolección.

Una vez transcurridas las 22 horas de cocimiento con vapor, se dará un tiempo de reposo de otras 22 horas, esto con el fin de que el agave cocido absorba lentamente el vapor remanente y termine la hidrólisis.

Una vez transcurrido el tiempo de reposo, se debe tomar una muestra homogénea del agave cocido con el fin de obtener en el laboratorio la cantidad de Azúcares Reductores (azúcares con su grupo carbonilo CO) disponibles.

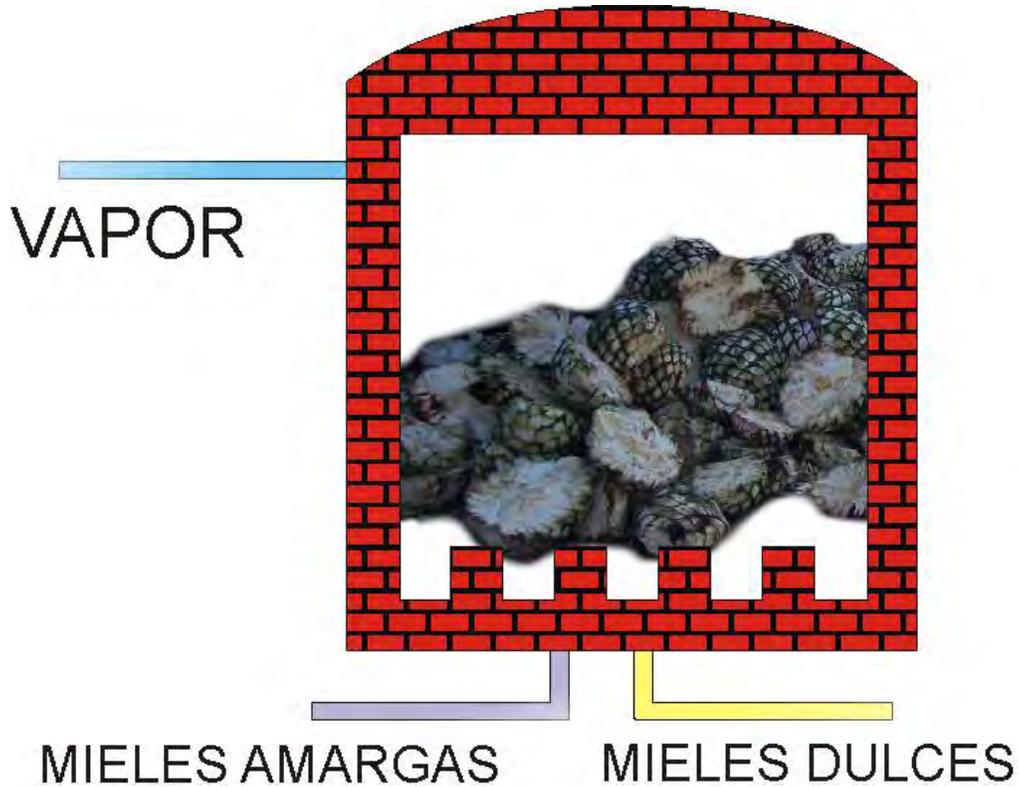


Fig. 1.5 Figura del ingreso del vapor al horno de cocción y salidas de las mieles condensadas.

A continuación se enuncian los procedimientos de la molienda de agave:

Antes de iniciar la alimentación de agave cocido, proveniente de los hornos a la banda alimentadora de la desgarradora, se abrirán las válvulas manuales que alimentan agua a los molinos, se encienden los motores de los molinos

Se espera unos segundos a que el volante de inercia provoque que la velocidad de la desgarradora sea estable.

Se arranca la banda alimentadora a la desgarradora para que los trozos de piña caigan en la tolva de la desgarradora.

Como se puede apreciar en la fig. 1.6 través de la banda transportadora, los pedazos desgarrados de agave, pasaran por los cuatro molinos, los cuales se encargaran de exprimir el agave para obtener la mayor cantidad de jugo, que será recolectado en una canaleta que conducirá los jugos al tanque de recolección de jugos (fig. 1.7). Se accionara la banda para salida de bagazo.



Fig. 1.6 Foto con vista lateral de los molinos de agave y depósito del bagazo.



Fig. 1.7 Foto de un tanque de recolección de jugos.

El jugo obtenido de la molienda contiene sacarosa (azúcar) disuelta, la medición de los azúcares se hace en grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), como mínimo el jugo tiene entre 10 y 12 $^{\circ}\text{Bx}$, esto quiere decir que en 1,000 gramos de solución hay de 100 a 120 gramos de azúcar disuelta y de 900 a 880 gramos de otros componentes.

Cuando se haya terminado de moler el lote de agave, todos los jugos recolectados en el tanque de jugos, serán muestreados para determinación de cantidad de Azúcares Reductores, la concentración de los jugos se regula agregando o evitando el agregado de agua.

Una vez terminada la molienda deberá limpiarse el sistema agregando agua de embebecimiento en forma manual lo que se enviara al último lote de formulación, junto con los jugos que previamente deben de ser más concentrados.

El bagazo producido en la molienda se colectara en su área correspondiente de donde se obtendrá la muestra para su análisis de azúcares presentes así como de humedad (fig. 1.8).



Fig. 1.8 Foto de la recolección de bagazo después de la molienda para su posterior análisis.

1.5 Preparación del mosto para la formulación y la fermentación.

Las proporciones de ingredientes y tiempo que a continuación se mencionan son únicamente representativas del común general de varias fábricas y por ello no son las únicas medidas utilizadas en la industria del tequila.

El paso previo para la preparación del mosto fresco que se fermentara, es el de la preparación de levadura la cual se describe a continuación:

En un recipiente se vierten 30 litros de jugo de agave a una temperatura que se encuentra entre 27 y 30 grados centígrados, en el laboratorio se realiza un preparado de levadura que varía en su composición según lo considere la fabrica, la mezcla de levadura se agrega al recipiente con los 30 litros de jugo de agave.

El jugo inoculado se deja fermentar por 12 o más horas, hasta alcanzar el 50% de los 10 a 12°Bx iniciales. Los 30 litros de jugo de agave fermentado son vertidos a un estanque que ya tiene 300 litros

de jugo de agave inalterado, ya combinados los jugos de agave fermentado y los inalterados se agrega aire mediante inyectores por un tiempo aproximado de 3 horas, esto con el fin de homogeneizar y oxigenar la mezcla, a esta mezcla se le permite propagar la levadura de 8 a 12 horas posteriores a la inyección de aire.

1.5.1 Formulación

Después de la propagación de la levadura, la mezcla se vierte a un estanque de 3000 litros cuando la levadura tenga el 50% de su población de hongo inicial, se llena el tanque formulador con jugo de agave, levadura y mieles de cocimiento como se puede ver en la fig. 1.9, la proporción final de cada elemento que se mezcla en el estanque de formulación es decidida dependiendo de las condiciones de los jugos de agave y las mieles de cocimiento. Los jugos de agave provenientes de molienda se alimentan controlados por el medidor de nivel y el controlador de concentración. La levadura se alimenta desde el tanque de inoculación controlada para alcanzar un 10% del volumen de los jugos de molienda alimentados.

Las mieles de cocimiento (fig. 1.10) se alimentan desde el tanque de recepción de mieles a través de la válvula, siendo la cantidad determinada previamente y de acuerdo a la experiencia de lo producido por cada horno diariamente y que deberá ser distribuido en cantidades iguales a los formuladores preparados en la fig. 1.11, se estima que para 3000 litros de la mezcla se necesita 600 Litros de mieles de cocimiento por cada lote.

Una vez realizada la mezcla se inicia la agitación mediante inyección de aire, el tiempo de duración del aire solo será el suficiente para efectuar la mezcla lo cual se determinara mediante toma de muestras en tiempos determinados hasta una homogenización total (Un tiempo aproximado de 30 minutos por lote preparado). Una vez terminada la mezcla homogenizada el mosto preparado se envía a los fermentadores para inicio del proceso de fermentación. La temperatura del mosto en el formulador para ser enviado a los fermentadores deberá estar en el rango de $27^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

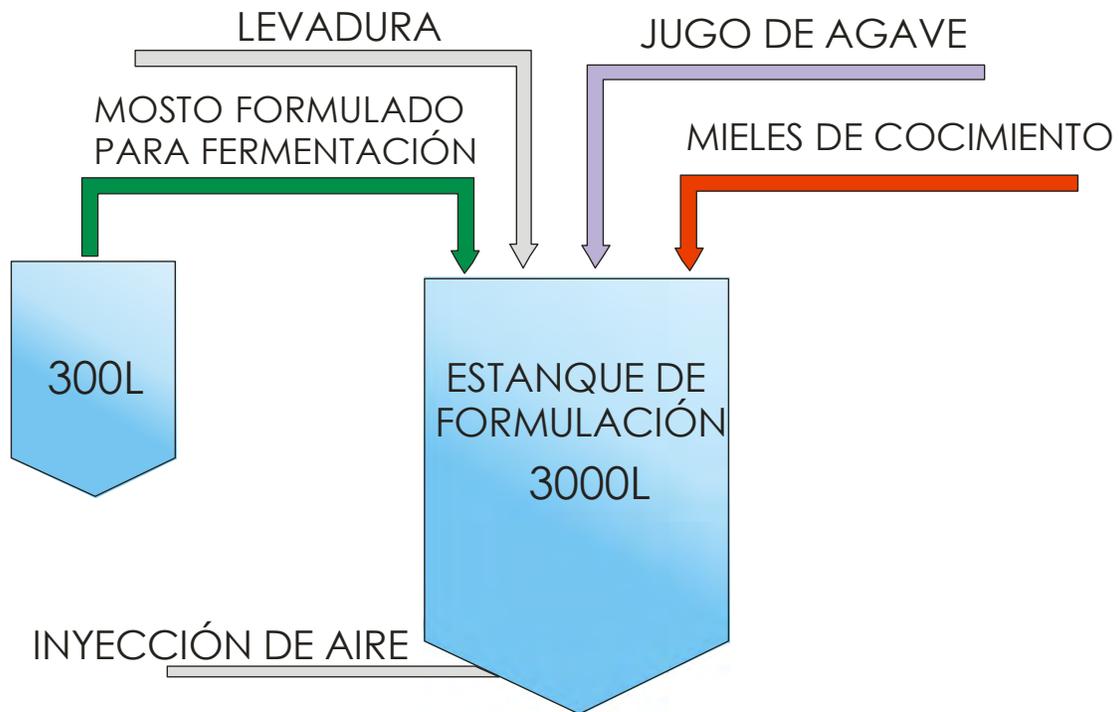


Fig. 1.9 Figura del estanque de formulación en el cual se mezcla el mosto formulado para la fermentación, jugo de agave, mieles de cocimiento y levadura para obtener un total de 3000 litros.



Fig. 1.10 Foto de las mieles de cocimiento durante su etapa de evaporización.



Fig. 1.11 Foto de la etapa de llenado del fermentador.

1.5.2 Fermentación.

Después de la formulación le sigue inmediatamente la fermentación. Una vez preparado el mosto fresco en el formulador en las concentraciones y temperaturas adecuadas, es enviado a los fermentadores.

El fermento alimentado a cada fermentador se le aplica 60 minutos de aire adicional con el fin de incrementar la biomasa. El mosto así preparado tarda aproximadamente 60 horas en terminar su fermentación, durante todo el lapso de tiempo la temperatura del mosto deberá estar entre los $27^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, al término de éste se extraerá el fermento agotado en azúcares (mosto muerto) y la mezcla alcohólica presente es enviada hacia los alambiques de destrozamiento para iniciar la etapa de destilación.

1.6 Primera destilación

Una vez que el laboratorio autoriza que un fermento está listo para destilar, éste es bombeado desde el fermentador hasta el alambique (fig. 1.12). El alambique se llenará automáticamente mediante el control de nivel, al mismo tiempo de llenarse el equipo, se iniciará la alimentación de vapor cuando el líquido haya cubierto el área de calentamiento de la chaqueta de vapor, para evitar que el líquido se caramelize en las paredes internas del recipiente.

La alimentación de vapor proseguirá hasta que la temperatura interna del alambique sea de unos 80°C, después de lo cual se iniciará a cerrarse parcialmente la válvula de vapor, hasta que la presión sea de e 0.5 Kg. /cm², manteniéndose así hasta el fin de la destilación.



Fig. 1.12 Foto de alambique en el cual se evapora el fermento.

Con esta presión y temperaturas debe de iniciarse la recepción de destilado o mejor conocido en la industria como destrozamiento, pues durante esta etapa en la que se separa las “cabezas”, las “colas”, el “ordinario” y las vinazas. Para poder obtener la destilación, se hace pasar al vapor por un condensador (fig. 1.13) y de esta forma se obtiene la primera parte de la destilación que corresponde a las “cabezas”, las cuales deben de ser separadas y enviadas al estanque de cabezas y colas. Esta separación prosigue hasta que se alcanza un 50% alcohol volumen., que es verificado manualmente en las probetas, además de ser detectado automáticamente por el medidor de alcohol en línea, una vez pasada la concentración de alcohol de las cabezas, se iniciar la recolección de la parte que se convertirá en tequila, a esta parte se le conoce como “ordinario” el cual se considera como tal cuando tiene un 40% de alc. Vol. hasta una concentración del 12% alc. Vol., después de lo cual se inicia la recolección de “colas” que es la última porción de destilado y se considera “colas” del 12% alc. Vol. hasta 10% alc. Vol., en el momento en que se alcanza el 10% alc. Vol. se cierra totalmente la válvula de vapor para dejar de producir destilado.



Fig. 1.13 Foto de condensadores que reciben los vapores de los alambiques.

Una vez terminado el destrozamiento, el producto recolectado (ordinario), en el tanque de recepción (fig. 1.14), se manda al tanque de almacenamiento de ordinario, el producto de cabezas y colas se manda al tanque de almacenamiento de cabezas y colas.



Fig. 1.14 Foto de un tanque de recepción.

1.6.1 Destilación de refinación

Al inicio de la segunda destilación se verifica que el tanque de almacenamiento de ordinario filtrado tenga al menos el volumen necesario que en este caso es de 3,000 Litros para llenar el alambique refinador de la segunda destilación, al iniciar la operación se llena el tanque y se comienza el calentamiento del alambique mediante la alimentación de vapor.

Se inicia una rampa de presión del vapor alimentado medido en 1.5 Kg. /cm.2 hasta tenga una temperatura de 76 °C como la temperatura del ordinario contenido y a partir de ese momento, se inicia a bajar la presión del vapor alimentado hasta 0.5 Kg. /cm.2, para iniciar la destilación del tequila en forma continua (Fig. 1.15), manteniendo la temperatura del interior de la olla en 85 °C, manteniendo una rampa incremental en todo el tiempo de destilación hasta llegar a los 90 °C.

Cuando se empieza a recibir el primer destilado (cabezas) con una concentración aproximada de 70% Alc. Vol. Se envía al tanque de cabezas y colas, cuando la concentración baja a 65% Alc. Vol. el producto principal del destilado (cuerpo), es enviado al tanque de recepción, el proceso de destilación prosigue hasta que la concentración de alcohol en el producto alcanza 30 % Alc. Vol., momento en que se envía el producto al tanque de recepción de ordinario.

Finalmente el proceso de destilación termina enviando el restante producto del destilado cuando alcanza la concentración de 14 % Alc. Vol. Etapa en que se envía el producto al tanque de cabezas y colas hasta que la concentración alcanza 10 % Alc. Vol., cuando se alcanza esta concentración de alcohol se detiene la alimentación de vapor y termina la destilación.

Las vinazas son la concentración de todos los residuos tóxicos que deja tras de sí la destilación, del tequila así como de cualquier alcohol, las propiedades de estos residuos se explicaran con detalle posteriormente.

Las flemazas ó vinazas de segunda destilación son químicamente semejantes a las vinazas de primera destilación, su diferencia radica en la concentración de alcohol que contiene, generalmente las flemazas contienen en promedio el 45% de la concentración alcohólica de la mezcla en su segunda etapa de destilado.

Tanto las vinazas de la primera destilación, así como las flemazas ó vinazas de segunda destilación son enviados a un tanque de almacenaje en el cual se mezclan.

Una vez que se termina la destilación, se prepara el equipo para iniciar una nueva carga, iniciando el ciclo de limpieza.

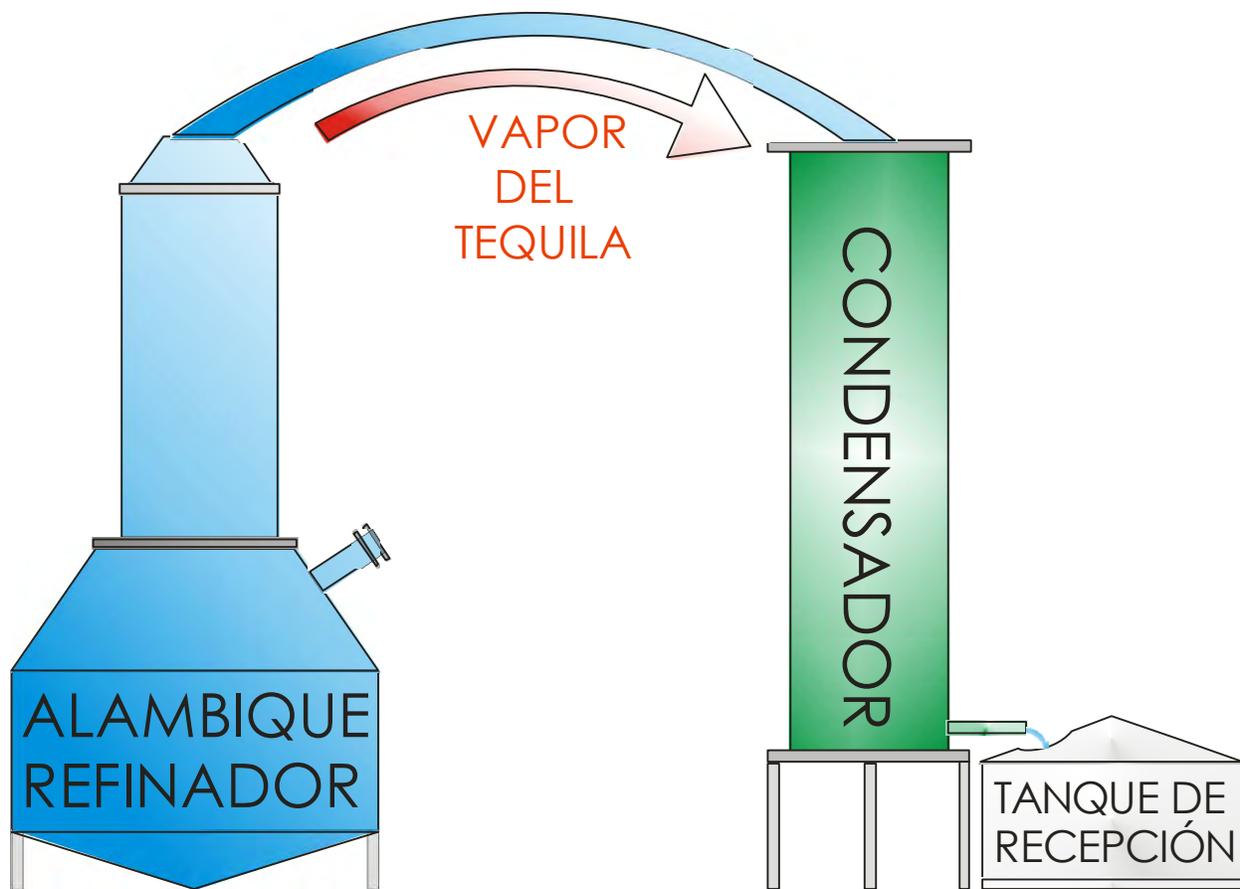


Fig. 1.15 Figura del proceso de destilación de refinación.

1.7 Dilución de Tequila

El tequila que se produce en los alambiques de destilación es un producto que se encuentra en una alta concentración alcohólica, por lo que es necesario diluirlo con agua desmineralizada para envasarlo directamente o almacenar en barricas.

La operación inicia cuando el tequila es enviado desde el tanque de almacén al tanque de dilución de la sección de destilación para iniciar la dilución, se envía agua desmineralizada desde el tanque de almacenamiento para la correspondiente dilución. Como el tequila sigue recirculando, al agregarse agua, se diluye y el medidor detecta una disminución de la concentración de alcohol, disminuyendo parcialmente la introducción de agua hasta que se homogenice la mezcla y vuelva a detectarse la concentración real del tequila.

Como se ve en la fig. 1.16 Cuando el tequila llega a la concentración correcta todo el producto del tanque se transfiere a un tanque de almacenamiento del cual se distenderá directamente al envasado,

como tequila blanco, o para su envío posterior a barricas donde estará en reposo, dependiendo del tiempo de maduración se obtendrá el tipo de tequila reposado (un año) o el añejo (de uno a cinco años).

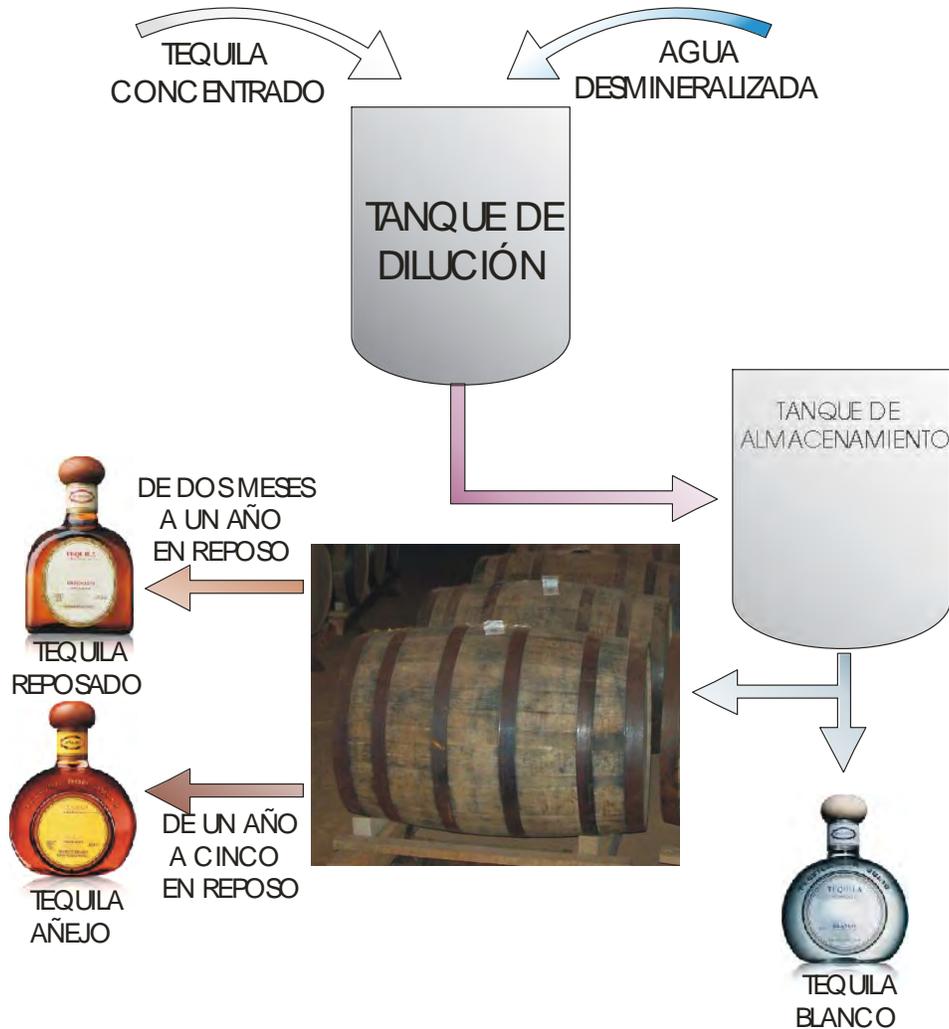


Fig. 1.16 Figura de dilución del tequila, envío del producto al tanque de almacenamiento y distribución a envasado o barricas de reposo para un posterior envasado.

1.8 Envasado del tequila.

Una vez que el tequila ha sido diluido se manda a los tanques de almacenamiento, el tequila reposado y el reposado es extraído de las barricas y enviados a sus tanques correspondientes existiendo, de esta manera, un tanque para cada tipo de producto: blanco, reposado y añejo. La operación inicia cuando de los tanques de almacenamiento se procede a enviar producto a los tanque de alimentación de la

envasadora, la alimentación a estos tanques se hace mediante una bomba para cada tipo de tequila según sea el caso y siendo controlado el nivel de llenado de estos tanques por medidores.

Posteriormente es envasado, embalado y enviado a almacenamiento para su posterior distribución como puede verse en la fig. 1.17.



Fig. 1.17 Foto de Tequila recién envasado y embalándose para ser almacenado o enviado.

1.9 Vinazas

Las vinazas son los residuos del proceso de destilación, que contienen materia orgánica microbiana proveniente de los residuos de la levadura, sales, restos de bagazo, residuos de alcohol, azúcares. Además, de acuerdo con algunos estudios realizados por Acosta (2009), las vinazas de las destilerías contienen sustancias del tipo fenol las cuales son tóxicas para las plantas. En general, las vinazas presentan una composición alta de demanda química de oxígeno (DQO), además de un pH ácido, menor a 3.9 y alta concentración de sale.

Las vinazas tequileras representan un problema de contaminación muy importante debido a la elevada carga orgánica de las vinazas tequileras, esto aunado a que por cada litro de tequila se generan de 7 a 10

litros de vinazas según revela Cedeño (1995). La calidad de las vinazas tequileras no cumple con las regulaciones ambientales para una descarga directa a cuerpos receptores, de acuerdo con la norma oficial mexicana, (NOM-064-ECOL-1994), la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de destilerías.



fig. 1.18 Foto de depósito de vinazas en Casa Tequilera Aranda.

Para las diferentes industrias del tequila el destino final de las vinazas difiere (ver fig. 1.18), en algunos casos las vinazas son almacenadas para posteriormente ser tratadas, “se descargan en los terrenos de cultivo adyacentes a la planta, al drenaje municipal o a los ríos después de pasar por un tiempo en una laguna de oxidación, con lo cual se disminuye la DQO (Acosta., 2009).

La secretaria de medio ambiente para el desarrollo sustentable indica que en el estado de Jalisco las vinazas son descargadas en promedio:

- 24% Drenaje.
- 29% Riego a cultivos.
- 47% Ríos o arroyos.

1.9.1 Parámetros de las vinazas

Con el fin de mostrar los niveles de contaminantes en las vinazas, se citarán extractos de las normas que definen a que se le considera un contaminante y los niveles permisibles.

La norma oficial mexicana NOM-064-ECOL-1994 define los siguientes puntos:

- “Aguas residuales de la industria de la destilería: Las que provienen de la fabricación de: alcohol etílico, aguardientes y bebidas alcohólicas destiladas como: brandy, ron, vodka, ginebra, whisky, tequila, mezcal, charanda entre otras. Todos estos productos son obtenidos por fermentación y posterior destilación de mostos elaborados a partir de materias primas naturales que contienen azúcares o también polisacáridos. Las aguas de esta industria contienen: residuos de la destilación (vinazas), que son características de las materias primas de las que se origina cada uno de los productos destilados así como aguas del lavado del equipo y limpieza de la planta.”
- “Límite máximo permisible promedio diario: Son los valores, rangos y concentraciones de los parámetros que debe cumplir el responsable de la descarga, en función del análisis de una muestra compuesta de las aguas residuales provenientes de esta industria.”
- “Límite máximo permisible instantáneo: Son los valores, rangos y concentraciones de los parámetros que debe cumplir el responsable de la descarga, en función del análisis de muestras instantáneas de las aguas residuales provenientes de esta industria.”
- “Muestra compuesta: La que resulta de mezclar varias muestras simples.”
- “Muestra simple o instantánea: La que se tome ininterrumpidamente durante el período necesario para completar un volumen proporcional al caudal, de manera que éste resulte representativo de la descarga de aguas residuales, medido en el sitio y en el momento del muestreo.”
- “Parámetro: Unidad de medición, que al tener un valor determinado, sirve para mostrar de una manera simple las características principales de un contaminante.”

La NOM-064-ECOL-1994, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería, estos límites se pueden ver en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Límites máximos permisibles de contaminantes según se establece en la norma oficial mexicana NOM-064-ECOL-1994.

PARÁMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	PROMEDIO DIARIO	INSTANTANEO
pH (unidades de pH)	6-9	6-9
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	200	240
Demanda química de oxígeno (mg/L)	260	360
Grasas y aceites (mg/L)	10	20
Sólidos sedimentables (ml/L)	1.0	2.0
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	200	240
Fósforo total (mg/L)	5	6
Nitrógeno total (mg/L)	10	12

Los principales compuestos orgánicos que contienen las vinazas son (Frank) (Microsoft ® Encarta ® 2009):

- Alcoholes: “Compuesto químico del carbono que contiene el grupo hidroxilo (OH)”.
- Terpenos: “Terpenos es la denominación genérica utilizada para los polímeros del isopreno (el caucho más simple) que es un carburo doblemente insaturado (C₅H₈) que se encuentra en los aceites volátiles.”
- Aldehídos: “Los aldehídos son cada uno de los compuestos orgánicos ternarios (compuesto de tres elementos) que contiene el grupo carbonilo (CO) y que responden a la formula general
$$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{H} \end{array}$$
, donde R es un átomo de hidrogeno o un radical hidrocarbonado, cada unos de estos compuestos se forman como primeros productos de la oxidación de ciertos alcoholes.”
- Aminoácido: “Sustancia química orgánica en cuya composición molecular entran un grupo amino y otro carboxilo. 20 de tales sustancias son los componentes fundamentales de las proteínas”.
- Proteínas: “Es un biopolímero formado por una o varias cadenas de aminoácidos unidos por enlaces pépticos”.
- Aceite de Fusel: Mezcla volátil de los alcoholes isoamilico, butílico, propílico y heptílico obtenidos como subproductos en la fermentación alcohólica y se genera en la 2ª destilación (Torres)

Otras de las características que presentan las vinazas y que son medidas en la NOM-064-ECOL-1994 son:

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): “Es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua; mientras mayor sea la DBO mayor será el grado de contaminación.”
- Demanda química de oxígeno (DQO): “Es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua.”

La norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, estos límites se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal según se establece en la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y Aceites	50	75	100
Sólidos Sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

La tabla 1.4 y la tabla 1.5 muestran, correspondientemente, los resultados del análisis de vinazas de primera y segunda destilación de tequila, las muestras fueron tomadas en Atotonilco; El alto Jalisco conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-064-ECOL-1994. Las tablas 1.4 y 1.5 son muestras analizadas y representativas del común general de las vinazas procedentes de la destilación del tequila.

En las tablas 1.4 y 1.5 se mencionan las diferentes normas mexicanas que fueron formuladas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que de forma individual, indican la metodología correcta y aceptada para la determinación de los metros de las vinazas.

Tabla 1.4 Análisis de vinazas de primera destilación.

DETERMINACIÓN	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	RESULTADO	UNIDADES	METODOLOGÍA	FECHA DE ANÁLISIS
Grasas y Aceites	15.00	80.95	mg/L	NMX-AA-005-2000	15-11-05
Material flotante	Ausente	Ausente	-	NMX-AA-006-2000	07-08-11-05
Sólidos Suspendedos Totales	30.00	17150.00	mg/L	NMX-AA-034-2001	09-11-05
Demanda Bioquímica de Oxígeno	30.00	32300.00	mg/L	NMX-AA-028-2001	14-11-05
Arsénico total	0.20	≤ 0.004	mg/L	NMX-AA-051-2001	15-11-05
Cadmio total	0.20	0.042	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Cianuro total	2.00	≤ 0.0247	mg/L	NMX-AA-058-2001	09-11-05
Cobre total	4.00	0.0694	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Cromo hexavalente	1.00	≤ 0.048	mg/L	NMX-AA-051-2001	10-10-05
Mercurio total	0.01	≤ 0.004	mg/L	NMX-AA-051-2001	11-11-05
Níquel total	2.00	0.245	mg/L	NMX-AA-051-2001	10-11-05
Plomo total	0.5	0.387	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Zinc total	10.00	1.097	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Huevos del helminto	5	0.000	No. Huevos/L	NMX-AA-113-1999	12-11-05
Coliformes Fecales	1000	≤ 2	NMP/100 ml	NMX-AA-042-1987	10-11-05
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NA	19,500.00	mg/L	NMX-AA-030-2001	14-11-05
Demanda Química de Oxígeno	NA	78,592	mg/L	NMX-AA-030-2001	12-11-05
Demanda Química de Oxígeno Soluble	NA	53,049.6	mg/L	NMX-AA-030-2001	10-11-05

Tabla 1.5 Análisis de vinazas de segunda destilación.

DETERMINACIÓN	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	RESULTADO	UNIDADES	METODOLOGÍA	FECHA DE ANÁLISIS
Grasas y Aceites	15.00	4.29	mg/L	NMX-AA-005-2000	15-11-05
Material flotante	Ausente	Ausente	-	NMX-AA-006-2000	07-08-11-05
Sólidos Suspendidos Totales	30.00	12.00	mg/L	NMX-AA-034-2001	09-11-05
Demanda Bioquímica de Oxígeno	30.00	5,909.09	mg/L	NMX-AA-028-2001	14-11-05
Arsénico total	0.20	≤ 0.004	mg/L	NMX-AA-051-2001	15-11-05
Cadmio total	0.20	≤ 0.008	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Cianuro total	2.00	≤ 0.0247	mg/L	NMX-AA-058-2001	09-11-05
Cobre total	4.00	28.762	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Cromo hexavalente	1.00	≤ 0.048	mg/L	NMX-AA-051-2001	10-10-05
Mercurio total	0.01	≤ 0.004	mg/L	NMX-AA-051-2001	11-11-05
Níquel total	2.00	≤ 0.053	mg/L	NMX-AA-051-2001	10-11-05
Plomo total	0.5	≤ 0.052	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Zinc total	10.00	0.213	mg/L	NMX-AA-051-2001	09-11-05
Huevos del helminto	5	0.000	No. Huevos/L	NMX-AA-113-1999	12-11-05
Coliformes Fecales	1000	≤ 2	NMP/100 ml	NMX-AA-042-1987	10-11-05
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NA	5,100.00	mg/L	NMX-AA-030-2001	14-11-05
Demanda Química de Oxígeno	NA	9,136.32	mg/L	NMX-AA-030-2001	12-11-05
Demanda Química de Oxígeno Soluble	NA	6,925.92	mg/L	NMX-AA-030-2001	10-11-05

En la tabla 1.6 se muestra la diferencia entre el nivel de contaminación en DQO, DBO y SST en las aguas residuales con el fin de mostrar más claramente porque las vinazas provenientes de la industria del tequila son consideradas más contaminantes que otros tipos de descargas de aguas residuales. Los datos de la industria tequilera fueron proporcionados por La secretaria de medio ambiente para el desarrollo sustentable.

Tabla 1.6 Nivel de contaminación de DQO, DBO y SST en diferentes tipos de agua residuales según los análisis de Conil (1996).

FUENTE DE AGUAS RESIDUALES	DQO Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	SST sólidos suspendidos totales (mg/l)
Aguas domésticas	350	200	200
Industria cervecera	1,600	1,000	ND
Industria papelera	5,000	1,800	4,000
Matadero ganado	22,000	7,000	3,000
Industria tequilera	40,000 – 60,000	20,000 – 40,000	36,000
NOM-001-ECOL-1996	350	200	200

Tras observar con detenimiento los parámetros de las vinazas se puede destacar que, salvo el cobre, ninguno de los valores de los metales pesados sobre pasan los límites permitidos, es por esta razón por lo que muchos en muchos casos difícilmente se les puede catalogar como residuos tóxicos, sin embargo son un gran problema ambiental debido sus muy elevados niveles de DQO, DBO y SST.

Los factores problemáticos presentes en las vinazas son la DQO, DBO y SST, la cuales son también características que deben ser tratadas en aguas residuales de otras índoles. Razón por la cual en el siguiente capítulo se presentan las tecnologías dedicadas a remover todas las características de las aguas residuales que son potencialmente nocivas para el medio ambiente, también se denotaran los pros y contras de las tecnologías y se describe su verdadero potencial para el tratamiento de vinazas procedentes de la destilación de tequila.

CAPITULO II

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la actualidad existen problemas medioambientales provocados por las vinazas provenientes de la destilación del tequila, como tal y como se menciona en el capítulo anterior, ya que son en su mayoría, simplemente desechadas sin tratamiento alguno.

Las aguas residuales en general y las vinazas tequileras comparten factores a tratar, como los son la DQO, DBO y SST, es por esta razón que las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales ya conocidas en otras industrias y procesos tienen el potencial de detener o minimizar su impacto en el medio ambiente.

En este capítulo se hizo una recopilación de los principales tipos de tratamientos de aguas residuales que hoy en día están disponibles, se mencionan los pros y contras con lo que se describe la efectividad que podrían tener las diversas tecnologías en el tratamiento de la vinazas tequileras.

2.1. Tipos de tratamientos de aguas residuales.

La dificultad que encierra el tratamiento de los residuos líquidos está relacionada, por un lado, con los aspectos económicos y por otro con los aspectos tecnológicos.

Aunque los aspectos tecnológicos están prácticamente resueltos debido a la gran cantidad de posibles soluciones disponibles, la operación de dichos sistemas y en sí su aplicación, se ha retardado en México, provocando un problema de contaminación severo.

Un elemento importante en la implantación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales es el aspecto económico, ya que en la mayoría de los casos no se contemplan estos sistemas de tratamiento como parte de los costos de un proyecto, por lo que al requerirse un sistema de tratamiento se constituye este como un proyecto independiente y generalmente con una evaluación separada (Espinoza).

Tabla 2.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales.

Físico	Químico	Biológico
Cribado	Coagulación y floculación	Aeróbico
Desarenador	Adsorción	Anaeróbico
Sedimentador	Oxidación	Facultativo
Filtración	Intercambio iónico	Naturales-Humedales
Membranas	Inhibición	Bacterias-Levaduras
Evaporación (Térmico)	Quelación	Virus
		Hongos
		Algas

En general son tres tipos diferentes de tratamiento que pueden aplicarse a las aguas residuales: el físico, el químico y el biológico (tabla 2.1). La selección del más adecuado en cada caso depende entre otros factores de la eficiencia y la efectividad.

Adicional a la clasificación anterior los tratamientos de aguas residuales pueden ser clasificados dependiendo de en que parte del proceso de purificación se encuentran, de tal manera que se pueden tener los tipos de tratamiento primario, secundario y terciario, tal y como se puede observar en la fig. 2.1

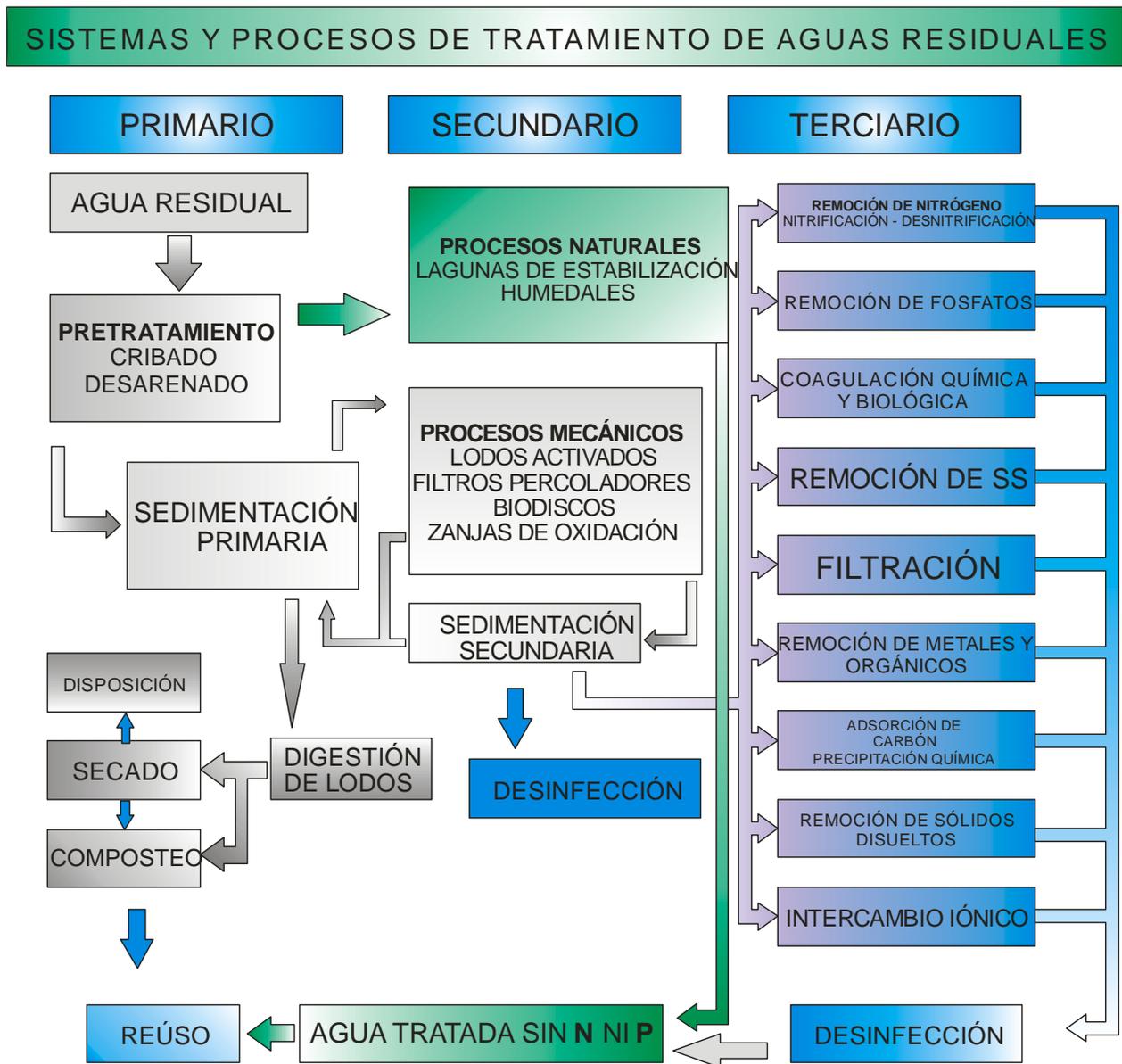


Fig. 2.1

2.2 Tratamientos físicos de aguas residuales.

El propósito fundamental del tratamiento físico es el de eliminar materiales, tales como arenas, sólidos suspendidos y compuestos químicos. Logrando de esta manera eliminar la turbiedad, sólidos solubles e insolubles, color, olor, sabor y lograr el equilibrio adecuado en temperatura y pH.

2.2.1 Cribado.

El cribado es un proceso mecánico para la remoción de sólidos suspendidos de varios tipos. El rango de separación de la malla o rejilla depende del propósito.

Con el objeto de proteger de taponamientos o daños a las bombas y otros equipos debido a los sólidos mayores que se encuentran en las aguas residuales, se debe de instalar antes de las estaciones de bombeo para detener estos sólidos. Típicamente las cribas o rejillas metálicas con tamices van de 4-6 cm, para el cribado grueso, y de 0.2 a 0.5 cm para el cribado fino.



Fig. 2.2 La figura muestra una criba en su parte posterior eliminando los sólidos separados de las aguas residuales.

2.2.2 Desarenadores.

El objeto de los desarenadores es separar arenas, término que engloba a cualquier sólido o materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior al de los sólidos orgánicos putrescibles en el agua residual. La remoción de arenas protege las bombas y otros equipos del excesivo desgaste debido a la abrasión y no permite que este material se acumule y pueda causar obstrucciones y taponamientos. Generalmente, se instalan los dispositivos de remoción de arenas a continuación de las cribas y antes del equipo de bombeo.

Existen varios tipos de cámaras desarenadoras: cámaras de flujo horizontal, cámaras aireadas y de vórtice. La tabla 2.2 muestra las ventajas y desventajas que presentan los diferentes tipos de desarenadores.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de los distintos tipos de desarenadores (WEF, 1992).

Tipo de desarenador	Ventajas	desventajas
Desarenadores de Flujo Horizontal.	<p>No necesita un diseño complejo que dificulte su construcción.</p> <p>Con un control adecuado del flujo, no se necesita hacer una clasificación posterior de los residuos.</p>	<p>Es difícil mantener la velocidad del flujo óptima</p> <p>Si no se controla el flujo, el tanque remueve grandes cantidades de materia orgánica, requiriendo lavar los residuos y clasificarlos.</p>
Desarenador aireado	<p>Misma eficiencia para una variación amplia en el flujo</p> <p>Pérdidas de cargas mínimas al pasar por el desarenador.</p> <p>Controlar la tasa de aireación permite remover una baja cantidad de materia orgánica putrefacta.</p> <p>Puede ser utilizado para mezcla química, preaeración y floculación después del tratamiento primario.</p> <p>Es sencillo controlar la tasa de aireación una vez que se haya instalado el sistema.</p>	<p>Puede generar malos olores.</p> <p>Se requiere mantenimiento en el sistema de aireación.</p> <p>Consumo de energía elevado</p>

Continuación de la tabla 2.2

Desarenadores de Vórtice	<p>Efectivo con variaciones de flujo.</p> <p>No hay equipos sumergidos que necesiten mantenimiento.</p> <p>Espacio reducido Remoción de un alto porcentaje de partículas finas.</p>	<p>Diseño patentado.</p> <p>Costos de adquisición del equipo.</p> <p>Las paletas pueden recoger trapos y basura que destruyan el mecanismo de funcionamiento.</p> <p>Se puede saturar el colector de arena e impedir el correcto funcionamiento.</p> <p>Necesita limpieza y supervisión continua.</p>
--------------------------	---	---

2.2.3 Sedimentadores ó Decantación primaria.

El objeto de la decantación (<http://www.virtual.unal.edu.co>) es el de conseguir que se depositen las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, tanto si se trata de partículas presentes en el agua bruta como si se deben a la acción de un reactivo químico añadido durante una etapa anterior de tratamiento e incluso de las que resultan de una floculación física ligada a una acción biológica. El mecanismo de sedimentación descrito para partículas granulares estaba basado en una total independencia de cada partícula; este esquema, sin embargo, no es válido en general para la sedimentación de partículas floculadas, puesto que en él se producen dos fenómenos de acción opuesta:

- Por una parte, un flóculo en su sedimentación atraparà nuevas partículas coloidales o incluso otros flóculos más pequeños, aumentando su volumen y por tanto su velocidad de caída.
- Por otra parte, si la concentración de estos es alta, los flóculos comenzarán a establecer contactos entre sí, dificultándose mutuamente la caída.

Si bien en el caso de sedimentación de partículas floculentas, la velocidad de caída dependerá en gran medida de la concentración de estas, también depende de muchas otras variables tales como: carga superficial, gradientes de velocidad en el sistema y gama de tamaños; no obstante el efecto de estas variables solo puede determinarse mediante ensayos de sedimentación, a este tipo de sedimentación se le conoce como sedimentación difusa; pero cuando predomina la tendencia entre las partículas a estorbarse, se le denomina sedimentación frenada.

2.2.4 Filtración

La filtración (Maldonado) consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad.

La eficiencia de la filtración está relacionada con las características de la suspensión, del medio filtrante, de la hidráulica de la filtración y la calidad del efluente. Por ejemplo, la filtración de agua cruda en filtros lentos de arena, y la de agua coagulada en filtros rápidos de arena resultan de interacciones distintas entre los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas, pues un factor importante en la filtración lenta puede, muchas veces, no ser importante para la filtración rápida.

De modo general, la eficiencia de remoción de partículas suspendidas en un medio filtrante está relacionada con las siguientes características de la suspensión:

- Tipo de partículas suspendidas.
- Tamaño de partículas suspendidas.
- Densidad de partículas suspendidas.
- Resistencia o dureza de las partículas suspendidas (flóculos).
- Temperatura del agua por filtrar.
- pH del afluente.

Entre las características del medio filtrante que influyen en la filtración, destacan:

- Tipo del medio filtrante.
- Características granulométricas del material filtrante.
- Peso específico del material filtrante.
- Espesor de la capa filtrante.

Dentro de los diferentes tipos de filtración, la filtración directa se destaca por sus ventajas. La tabla 2.3 muestra las ventajas y desventajas de la filtración directa.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de la filtración directa.

Filtración directa.	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ El costo de construcción de la planta de tratamiento puede disminuir hasta en 50% con respecto al de una planta convencional. ➤ Menor costo de operación y mantenimiento. ➤ Reducción sustancial del consumo de coagulante. ➤ Menor volumen de lodo producido en la planta. ➤ Facilidad en el tratamiento de agua cruda con baja turbiedad. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dificultad en el tratamiento de agua con alto contenido de color o turbiedad. ➤ Necesidad de monitoreo continuo o control riguroso de los principales parámetros de calidad del agua cruda y tratada. ➤ El tiempo de retención total para el tratamiento es relativamente corto, lo que implica que debe reaccionarse rápidamente ante las modificaciones de calidad del agua cruda. ➤ Posibilidad de paralización temporal de la planta, debido a errores en la dosificación de coagulante.

2.2.5 Evaporación

“El proceso de evaporación consiste en la eliminación de un líquido de una solución, por tratamientos térmicos. Los factores y criterios que se toman en cuenta ante un proceso de evaporación son los siguientes” (Barría., 2006):

- Concentración.
- Formación de espuma.
- Sensibilidad a la temperatura.
- Incrustaciones.
- Materiales de construcción.
- Solubilidad.
- Presión y temperatura.

Los evaporadores pueden ser de dos tipos de efectos, de “efecto simple” ó de “efecto múltiple”.

La evaporación de “efecto simple” (fig.2.3) es la evaporación en la que se emplea una sola etapa. Generalmente este modo de operación se emplea cuando la cantidad de disolución a tratar es pequeña y/o el coste del vapor es barato comparado con la inversión necesaria para un evaporador más complejo.

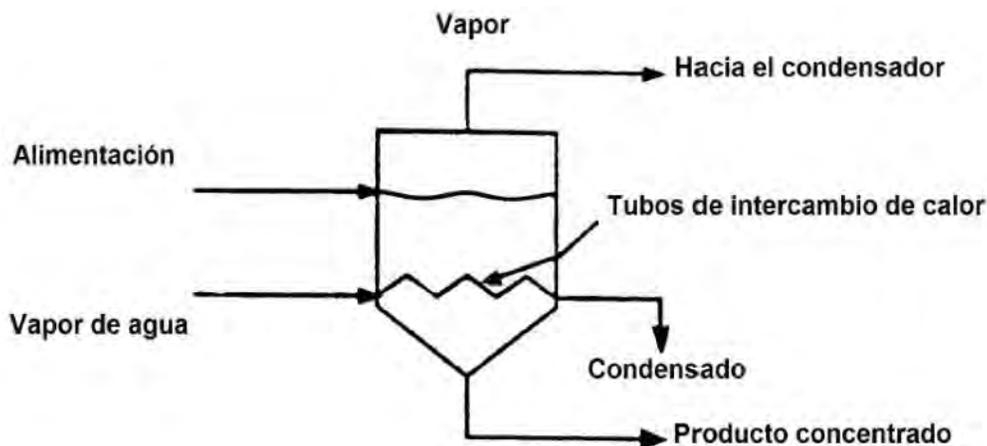


Fig. 2.3 Evaporador de efecto simple.

La evaporación de “efecto múltiple” utiliza a varias unidades de evaporación intentando aprovechar tanto como sea posible la energía térmica del vapor suministrado, el ejemplo presentado en la figura 2.4 consta de un evaporador de múltiple efecto de tres unidades del cual se explica en pasos de la operación por unidad:

1. El líquido a evaporar ingresa a la primera unidad así como el vapor suministrado para la evaporación, después se desecha el condensado, sin embargo el vapor producido en la primera unidad por el efecto de la evaporación no es desechado sino que es enviado a la segunda unidad de evaporación así como el concentrado del primer efecto.
2. El vapor y el concentrado producidos entran a la unidad dos ocurre la evaporación, el vapor y el concentrado resultantes del proceso en la unidad dos son enviados a la unidad tres.
3. ocurre el mismo proceso de la unidad uno y dos, pero el vapor y el producto concentrado son desechados o enviados a un tratamiento posterior.

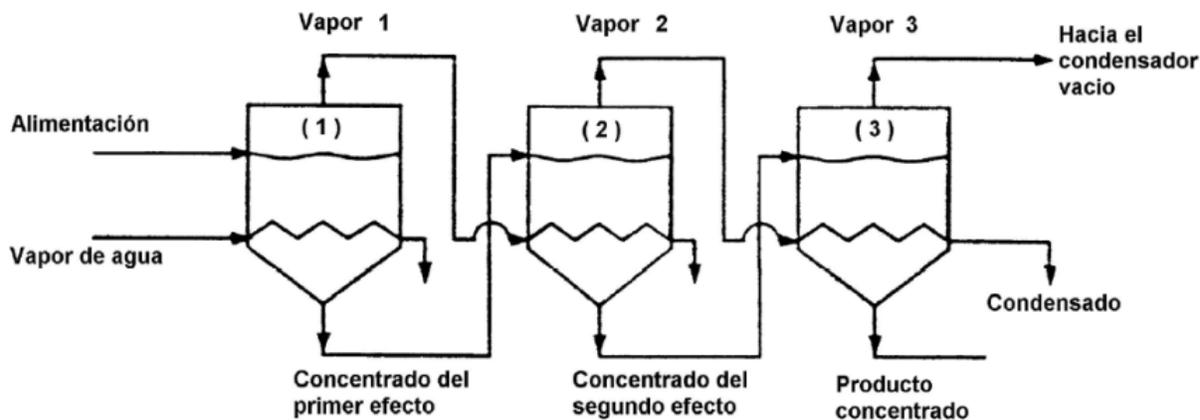


Fig. 2.4 Evaporador de efecto múltiple.

Existen diferentes tipos de evaporadores, dentro de los cuales se pueden mencionar, atendiendo a sus características constructivas los siguientes:

- Evaporador de tubo horizontal.
- Evaporador de tubo vertical.
- Evaporador vertical de tubos largos.
- Evaporador de película ascendente.
- Evaporador de película descendente.
- Evaporador de circulación forzada.

Dentro de los evaporadores antes mencionados cabe destacar las ventajas y desventajas de los evaporadores de tubo horizontal.

Ventajas de evaporadores de tubo horizontal:

- Son relativamente baratos.
- Requieren poca altura disponible.
- Fácil instalación.
- Proporcionan una buena transmisión de calor.

Desventajas de evaporadores de tubo horizontal:

- Pequeña circulación de líquido.
- No adecuados para líquidos viscosos.
- No adecuados para líquidos que se cristalicen.

2.2.6 Evaporador de tubo vertical.

La figura 2.5 muestra las entradas y salidas de un evaporador estándar de tubos verticales. De estos tipos de evaporadores los hay de tubos cortos y tubos largos, hay una enorme variedad de modelos pero todos tienen un intercambiador tubular con el líquido que se concentra en los tubos y el vapor por fuera, un espacio o salida de vapor para separar el vapor formado del líquido y en el caso de tener un recirculador también tienen tubería para recircular el líquido. Los evaporadores de tubo vertical son los apropiados cuando se manejan líquidos viscosos pues el coeficiente de intercambio de calor es mayor con este tipo de líquidos, en su contraparte no trabajan bien con sustancias diluidas y los costos de operación con líquidos diluidos aumenta.

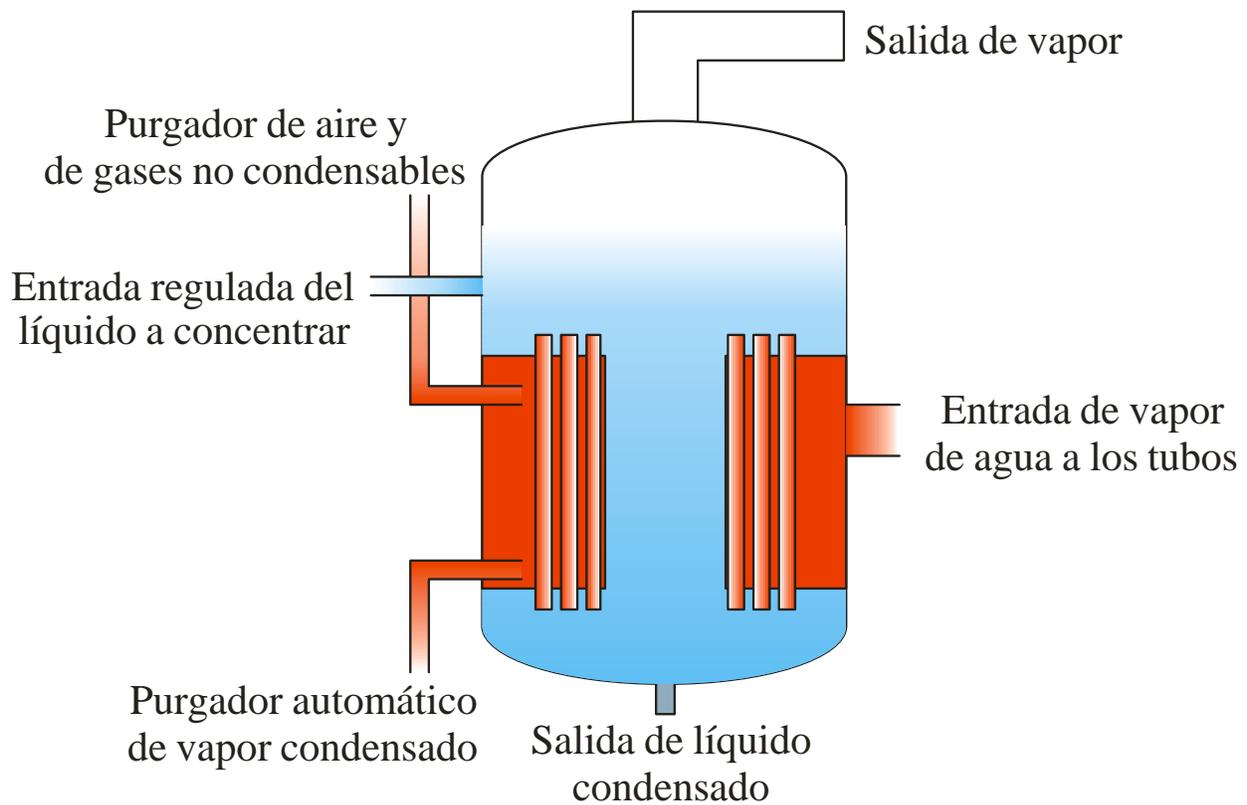


Fig. 2.5 Evaporador estándar de tubos verticales.

2.3 Tratamiento Químico de aguas residuales.

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los tratamientos químicos y los más importantes son:

- Coagulación
- Floculación
- Adsorción
- Oxidación
- Intercambio iónico
- Inhibición
- Quelación

2.3.1 Coagulación

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos (Barrenechea):

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

2.3.2 Floculación

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia (Vargas).

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son:

- La naturaleza del agua.
- Las variaciones de caudal.
- La intensidad de agitación.
- El tiempo de floculación.
- El número de compartimentos de la unidad.

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad.

La presencia de iones SO_4 , por ejemplo, tiene marcada influencia en el tiempo de formación de los flóculos, en función del pH.

En todos los modelos matemáticos de floculación, la velocidad de formación de flóculos es proporcional a la concentración de partículas. La velocidad de floculación depende también del tamaño inicial de las partículas. Es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y que presenten una amplia distribución de tamaños de partículas. En tanto, las partículas de mayor tamaño, que podrían ser removidas en tanques

de sedimentación simple, tales como arena fina acarreada durante picos de elevada turbiedad, interfieren con la floculación porque inhiben o impiden el proceso.

Bajo determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores, tanto más acentuados cuanto más se aleje este del tiempo óptimo de floculación.

2.3.3 Adsorción

La adsorción, es la transferencia selectiva de uno o más solutos (adsorbato) de una fase fluida a una de partículas sólidas (adsorbente). La selectividad común de un adsorbente entre el soluto y el fluido portador o entre varios solutos, hace posible la separación de ciertos componentes presentes en el fluido (Vergara., 1984).

Los procesos de adsorción en fase líquida se utilizan con buena eficiencia en la purificación de aguas residuales de industrias que pueden contener colorantes, fragancias y en general contaminantes orgánicos o inorgánicos (Moreno-Pirajá)

2.3.4 Oxidación

“La oxidación es un cambio químico en el que un átomo o grupo de átomos pierden electrones o bien es la reacción en la que un átomo aumenta su número de oxidación. Es un método útil únicamente cuando se trata de pequeñas cantidades de aguas con una concentración elevada de contaminantes oxidables. En caso contrario, los costes de operación asociados a la necesidad de utilizar un combustible auxiliar, se vuelven excesivos. Aunque los costes de inmovilizado son elevados, la tecnología está bien establecida. Puede ser una buena elección tecnológica cuando se utiliza en combinación con una operación de separación previa que concentre el contaminante, por ejemplo una ultrafiltración. Aún así, en el tratamiento de efluentes líquidos resulta una técnica costosa además de impopular” (Fernández-Alba)

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de los procesos avanzados de oxidación.

Proceso de oxidación	Ventajas	Desventajas
Ozonización en medio alcalino	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tecnología de reactores gas-líquido bien conocida. ➤ Flexibilidad para tratar distintos caudales y concentraciones. ➤ Fácilmente automatizable. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baja solubilidad del ozono en agua. ➤ Posible formación de bromatos. ➤ Coste de generación de ozono. ➤ Presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros neutralizantes de radicales.

2.3.5 Intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales (Hines., 1985). La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas sintéticas.



Fig. 2.6 Intercambiador iónico.

Una resina de intercambio iónico puede considerarse como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida grupos iónicos libres. Estas cadenas se encuentran unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y

donde el grado de entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones (tabla 2.6, www.tmimedioambiente.com) deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede limitar la movilidad de los iones participantes.

Las cargas de los grupos iónicos inmóviles se equilibran con las de otros iones, de signo opuesto, denominados contraiones, que están libres y que son los que se intercambian realmente con los del electrolito disuelto. Cuando dichos iones son cationes, los cambiadores iónicos se denominan catiónicos y cuando son aniones se denominan aniónicos.

El intercambio iónico puede explicarse como una reacción reversible implicando cantidades químicamente equivalentes.

Tabla 2.6 Cationes y aniones comúnmente encontrados en aguas crudas.

Cationes	Aniones
Calcio (Ca_2^+)	Cloruro (Cl^-)
Magnesio (Mg_2^+)	Bicarbonato (HCO_3^-)
Sodio (Na^+)	Nitrato (NO_3^-)
Potasio (K^+)	Carbonato (CO_3^{2-})
Hierro (Fe_2^+)	Sulfato (SO_4^{2-})

En esencia existen dos tipos de resinas utilizadas en el intercambio iónico. Las resinas de intercambio de cationes como Hidrógeno (H^+) los cuales son intercambiados por impurezas presentes en el agua (cationes). También están las resinas que intercambian aniones los cuales despiden iones de carga negativa como los hidroxilos (OH^-), los cuales son intercambiados por impurezas contenidas en el agua (<http://www.excelwater.com>).

“Las resinas de Intercambio de iones son preparadas de polímeros sintéticos tales como estireno y divinilbenzeno (DVB) que han sido sulfatadas para formar unos intercambios de cationes fuertemente ácidos para formar intercambios de aniones fuertemente básicos o débilmente básicos.”

2.3.6 Inhibición

“El pre-tratamiento de sistemas de osmosis inversa a gran escala casi siempre incluye dosificación química para la inhibición de incrustaciones. La formación de incrustaciones ocurre en la corriente salobre cuando las sales solubles exceden sus límites de saturación y se precipitan en la superficie de las membranas. Las sales más comunes son carbonato de calcio, fluoruro de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y varios complejos de sílice. Hierro y manganeso también pueden precipitarse en la corriente salobre, pero estos se consideran incrustadores.

Los químicos utilizados para el control de estas incrustaciones normalmente consisten en una combinación de ácido sulfúrico y un antiincrustante. El ácido sulfúrico es usado para reducir el pH a

través del sistema y así mantener la solubilidad del carbonato de calcio, el fosfato de calcio, el hierro y el manganeso.

Hay una gran variedad de antiincrustantes en el mercado, muchos con limitaciones debido a sus estructuras químicas. Por ejemplo, los antiincrustantes basados en poliacrilatos y polimaleicos usados por muchos fabricantes frecuentemente se desactivan ante la presencia desde cantidades como 0.5 ppm de hierro, perdiendo sus características para la inhibición de la incrustación y se precipitan sobre la membrana como ensuciamiento orgánico gelatinoso. Los antiincrustantes con base en fosfino-carboxilatos tienen la misma debilidad a menos que sean usados en combinación con una dosis suficientemente altas de ácido para convertir todo el hierro en su forma soluble” (Knoell., 2006).

2.3.7 Quelación o Quelatación

“La quelatación es la habilidad de un compuesto químico para formar una estructura en anillo con un ion metálico resultando en un compuesto con propiedades químicas diferentes a las del metal original. (El quelante impide que el metal siga sus reacciones químicas normales).

Los iones metálicos existen en solución en una forma altamente hidratada; esto es rodeados por moléculas de agua. Al reemplazo de estas moléculas de agua por una molécula de un agente quelante formando una estructura compleja en anillo se le llama quelatación. A la molécula que reemplaza el agua se la llama "Ligando". Se puede formar solo un anillo o se pueden formar varios anillos dependiendo del número de coordinación del metal. El número de coordinación corresponde al número de sitios del ligando que pueden formar uniones de coordinación. Un ligando con dos sitios se llama bidentado, un ligando con 4 sitios se llama tridentado y así sucesivamente. Los iones metálicos con valencia +1 no forman quelatos sino sales con el ligando como aniones sin estructura de anillo” (WALCO S.A.).

En el tratamiento de aguas la Quelación es usada para hacer que los metales de las aguas formen nuevas moléculas que resulten en compuestos no nocivos o para poder ser retirados en otros procesos.

2.4 Tratamiento biológico de aguas residuales.

Cuando las aguas residuales entran en una Estación Depuradora, sufren un pretratamiento en el que se retiran los sólidos y gruesos de gran tamaño, así como las arenas y grasas. A continuación, el agua pasa al denominado tratamiento primario, donde se eliminan sólidos en suspensión fácilmente sedimentables y algo de materia orgánica.

La materia orgánica que queda disuelta y en suspensión así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante procesos biológicos.

Los tratamientos biológicos constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la

eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes tales como N y P (nitrógeno y fósforo). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales.

En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P.

2.4.1 Biodigestores aerobios

En los biodigestores aerobios un grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos), en presencia de O_2 , actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua (Fernández-Alba).

Son muchas las posibilidades de tratamiento:

- Cultivos en suspensión: Proceso de fangos activados (lodos activados), y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).
- Cultivos fijos: Los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos).

2.4.1.1 Fangos activados: Proceso básico

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza una recirculación de parte de los fangos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos. Un esquema simplificado se muestra en la figura 2.7.

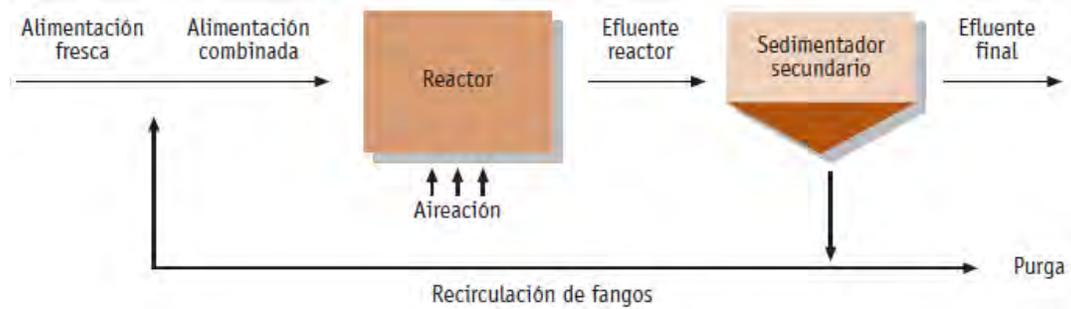


Fig. 2.7 Proceso de fangos activados.

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, un parámetro muy importante es el de la aireación. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (en torno a 8-9 mgO₂/l dependiendo de presión y temperatura) por lo que será necesario asegurar el suministro a los microorganismos, utilizando aireadores superficiales o bien difusores (fig. 2.8). El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto es de 2 mg/l. El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costes de operación del proceso.

Otro parámetro clave en el proceso se refiere al parámetro A/M se refiere a la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema, con unidades kgDBO₅(o DQO) / kgSSV·día. La denominada “edad celular” también es un parámetro importante. Se refiere al tiempo medio que permanecen los fangos (flóculos, microorganismos) en el interior del sistema. Esta magnitud suele tener un valor de 5-8 días en condiciones convencionales de operación (Fernández-Alba).

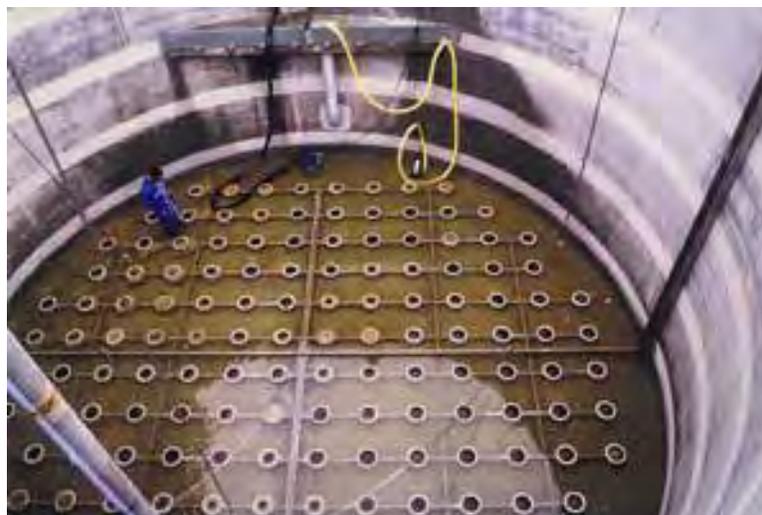


Fig. 2.8 Foto de difusores en un biodigestor.

Dentro de los procesos básicos de fangos activados hay modificaciones que se aplican en la forma de operar.

- Aireación prolongada. Se suele trabajar con relaciones A/M más pequeñas (mayores tiempos de residencia), consiguiendo mayores rendimientos en la degradación de materia orgánica. Otra ventaja añadida es la pequeña generación de fangos de depuradora. Es conveniente cuando se pretenden eliminar compuestos con nitrógeno simultáneamente con la materia orgánica.
- Contacto estabilización: En el reactor de aireación se suele trabajar con menores tiempos de residencia (sobre una hora) pretendiendo que se lleve a cabo solo la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. La verdadera degradación se realiza en una balsa de aireación insertada en la corriente de recirculación de fangos, tal y como muestra la figura 2.9, y donde la concentración de fangos es mucho más elevada que en el primer reactor. Esta opción es conveniente cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión.
- Reactores discontinuos secuenciales (SBR): Todas las operaciones (aireación y sedimentación) se llevan a cabo en el mismo equipo, incluyendo una etapa de llenado y terminando con la evacuación del agua tratada. Es una opción muy válida para situaciones en las que se dispone de poco espacio, como ocurre en muchas industrias. Son versátiles en cuanto a las condiciones de operación y habitualmente se utilizan columnas de burbujeo como reactores.

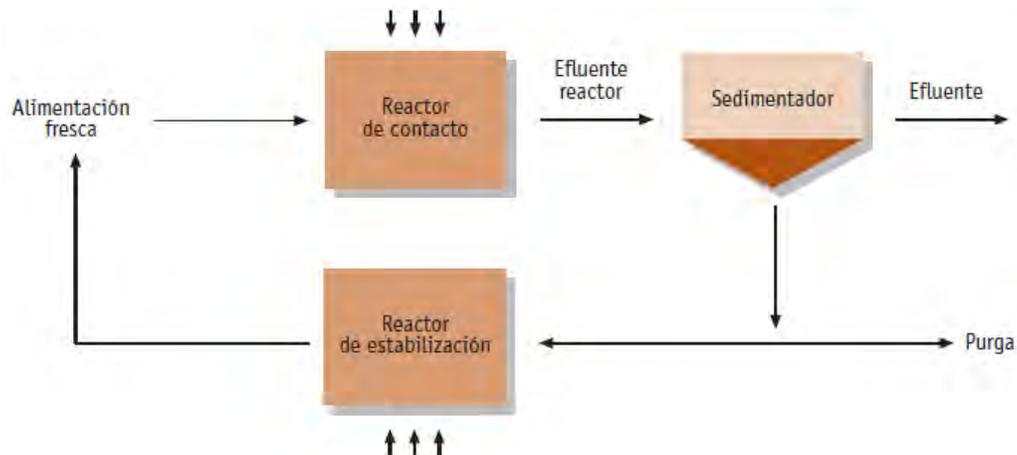


Fig. 2.9 Proceso biológico de contacto-estabilización.

2.4.1.2 Procesos aerobios con biomasa soportada

Otra de las formas para conseguir concentraciones suficientes de microorganismos, sin necesidad de recirculación, es favoreciendo su crecimiento en la superficie de sólidos. Se evitan de esta forma los posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, frecuente en los procesos clásicos de fangos activados. Sin embargo el aporte de oxígeno es de nuevo un factor importante, consiguiéndose en este caso en la distribución del líquido, bien por movimiento del sistema (Fernández-Alba).

- **Filtros percoladores:** También denominados filtros biológicos o lechos bacterianos. Son los sistemas aerobios de biomasa inmovilizada más extendidos en la industria. Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie. Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa, sobre la que se dispersa el agua residual a tratar, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural. El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie, y por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente. En general también se realiza una recirculación de parte del efluente limpio, una vez producida la separación. Un esquema sencillo se muestra en la figura 2.10. En estos sistemas, la velocidad de carga orgánica es el parámetro más importante, teniendo rangos de aplicación en la industria desde 30 a 10.000 kgDBO5/día y 100m³ de reactor, siendo los tamaños muy variables (desde 2 hasta 10 m de altura).
- **Contactores Biológicos Rotatorios (RBC):** Los biodiscos (fig. 2.11) consisten en una serie de placas o discos, soportados en un eje y parcialmente sumergidos (40%) en una balsa que contiene el agua residual. El eje junto con los discos, gira lentamente. Sobre la superficie de los discos crece la biopelícula, que sucesivamente, se “moja” y entra en contacto con el aire, produciéndose la degradación de la materia orgánica. Son fáciles de manejar y convenientes cuando se trata de pequeños caudales. Normalmente el tamaño es de entre 1 y 3 m de diámetro, está separados unos 10-20 cm y con velocidades de giro de 0.5-3 rpm.”

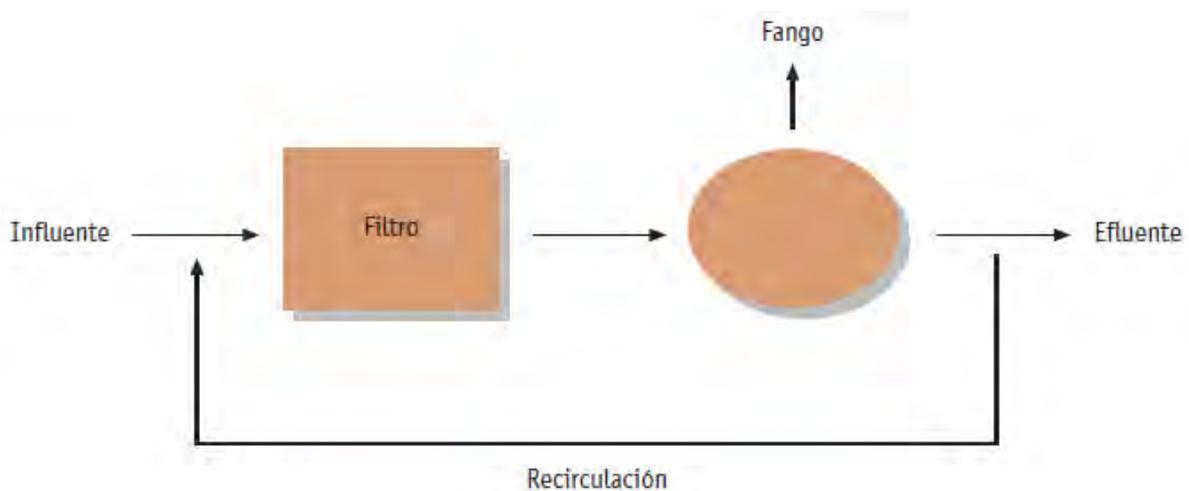


Fig. 2.10 Diagrama de operación típico de un filtro percolador.

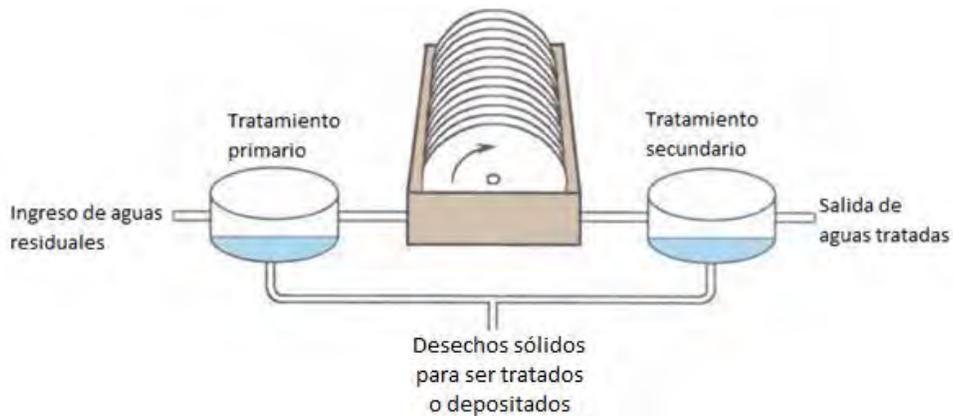


Fig. 2.11 Biodiscos.

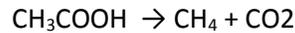
2.4.2 Procesos biológicos anaerobios

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aeróbico, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogas”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la demanda química de oxígeno tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que reactores o digestores son diseñados con una alta concentración de microorganismos. Realmente, es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del proceso, que se describen a continuación, la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio.

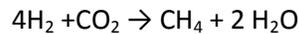
Hidrólisis: La hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano, y en la mayor parte de los casos supone una etapa que se desarrolla lentamente.

Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis): Los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae (Fernández-Alba).

Matanogénesis: La formación de metano, siendo este el último producto de la digestión anaerobia, ocurre por dos grandes rutas: La primera de ellas, es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal producto de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas. La reacción, planteada de forma general, es la siguiente:



Algunas bacterias metanogénicas son también capaces de usar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas) según la reacción:



La matanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. En buena medida, la digestión anaerobia se ha de llevar a cabo en las condiciones óptimas para el buen funcionamiento de estas bacterias metanogénicas.

Actualmente está ampliamente aceptado que la degradación de la materia orgánica sigue una distribución como la detallada, y que se muestra resumida en la figura 2.12.

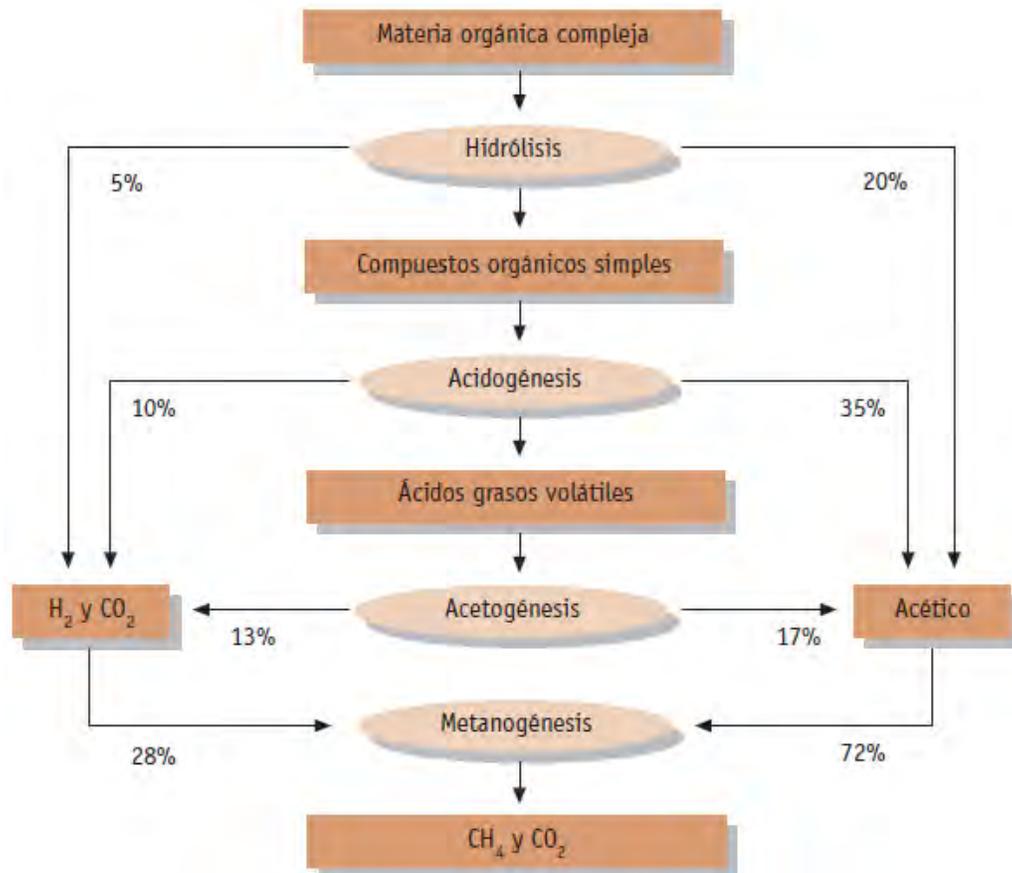


Fig. 2.12 Esquema de la ruta de degradación anaerobia.

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio cabe destacar la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de parada sin alteración importante en la población bacteriana. Sin embargo, como desventajas caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de puesta en marcha.

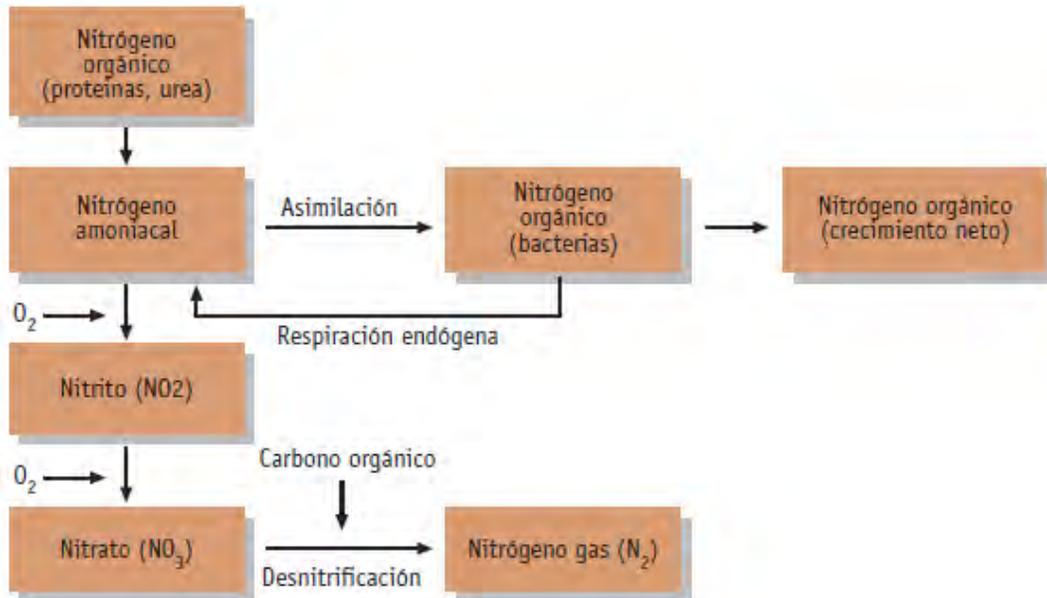
Tanto las variables físicas como las químicas influyen en el hábitat de los microorganismos. En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta la influencia de factores medioambientales. Las bacterias formadoras de metano son las más sensibles a estos factores, por lo que un funcionamiento inadecuado de las mismas puede causar una acumulación de productos intermedios (ácidos) y desestabilizar por completo el sistema. Entre las variables más importantes se encuentran la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes (Fernández-Alba).

2.4.3 Proceso biológico facultativo o compuesto.

Los sistemas biológicos facultativos son sistemas compuestos en los que se llevan a cabo reacciones aerobias y anaerobias. Las bacterias comúnmente usadas son aerobias, anaerobias y facultativa, estas últimas son capaces de vivir en medios con o sin oxígeno.

2.4.3.1 Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno

Los compuestos con nitrógeno sufren una serie de transformaciones como consecuencia de la acción de distintos organismos, como se muestra en la figura 2.13. En primer lugar, una serie de bacterias autótrofas (Nitrosomonas y Nitrobacter) son capaces de llevar a cabo una nitrificación, con demanda de oxígeno. A continuación, otra serie de bacterias desnitrificantes llevan a cabo la eliminación de NO_3^- , en un sistema anóxico (sin oxígeno), donde el propio nitrato actúa de aceptor de electrones, siendo en este caso bacterias heterótrofas, es decir su fuente de carbono es materia orgánica. Este proceso en su conjunto es conocido como nitrificación-desnitrificación. De esta forma y en dos reactores consecutivos se puede llevar a cabo la eliminación de compuestos con nitrógeno: primero en un reactor aerobio seguido de otro con condiciones anóxicas, pero en el que será necesario adicionar fuente de carbono para el desarrollo de las bacterias desnitrificantes (Fernández-Alba). El sistema en su conjunto suele ser semejante al proceso de fangos activados, pero utilizando los reactores en las condiciones mencionadas.



2.13 Esquema de transformaciones de los compuestos de nitrógeno.

Cuando la materia orgánica está presente en las aguas residuales no se puede seguir la secuencia mencionada: En el primer reactor de nitrificación la materia orgánica inactivaría las bacterias nitrificantes, y en el segundo se necesitaría materia orgánica. Para evitar estos problemas, es necesario iniciar el proceso con un reactor anóxico, donde la materia orgánica del agua residual actúa como fuente de carbono, pero sería necesario recircular parte del efluente del segundo reactor de nitrificación: en este reactor se producirán nitratos, y sería un reactor aerobio. Un esquema simplificado se muestra en la 2.14.



2.18 Esquema con tanque anóxico como receptor de aguas residuales.

Todas las tecnologías vistas a lo largo de este capítulo no son un tratamiento completo por si solo, es necesario tener un conjunto de estas tecnologías bien seleccionadas y en un orden específico para un máximo desempeño y de esta forma sea lo más factible para la industria tequilera.

La información proporcionada en este capítulo incluye la forma de operar así como las ventajas y desventajas propias de cada equipo. No obstante la información no refleja necesariamente su comportamiento real, razón por la cual en el siguiente capítulo se mencionan casos reales de plantas de tratamiento de vinazas tequileras así como de otras industrias alcoholeras.

CAPITULO III

TECNOLOGIAS ACTUALMENTE EN USO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS VINAZAS

En el capítulo anterior se han descrito los tratamientos de aguas residuales más importantes, con base a la descripción de estos tratamientos en este capítulo se describen algunos ejemplos de tecnologías de tratamiento de aguas residuales que tratan específicamente las vinazas producto de la destilación del tequila y de otras industrias alcoholeras, de esta manera se ilustra la situación actual de diversas industrias alcoholeras.

Se describen las experiencias obtenidas y los resultados reales de operación de las plantas de tratamiento haciendo especial énfasis en la descripción de cómo aun con la aplicación de tecnología especializada en el tratamiento de vinazas es ineficaz al tratarse de vinazas tequileras.

Se proporcionan datos de los avances en la construcción de más plantas de tratamiento para disminuir el impacto medioambiental, también se proporcionan datos que dejan ver las verdaderas dimensiones del problema que las vinazas representan y que este serio problema aun no es debidamente tratado.

3.1 Situación actual de la industria de la destilación azucarera.

En diferentes partes del mundo existen industrias que producen residuos semejantes a las vinazas de la industria tequilera y que de alguna forma ha implementado o están buscando diversas opciones para disminuir este problema que generan tales residuos.

Un ejemplo de esta búsqueda se da en el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) en donde se está estudiando el tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ó manto de lodos anaerobios de flujo ascendente) por parte de los investigadores Obaya., et al. En estos biodigestores o biorreactores se consigue una alta concentración de biomasa dentro del reactor que conlleva una elevada velocidad de eliminación de materia orgánica con rendimientos elevados de depuración. Estos tipos de reactores han conseguido una muy alta implantación en el mercado, mostrándose como los más fiables para todo tipo de aguas residuales de alta carga, especialmente las que tiene un bajo contenido de sólidos en suspensión.

El ICIDCA ha construido una planta de tratamiento de aguas residuales con una capacidad de 3,000 m³ de capacidad, esta planta de tratamiento es única en su tipo en Cuba debido a que en ella se implementa una tecnología que además permitirá la producción de biogás a partir de las aguas residuales.

El objetivo de principal de esta planta de tratamiento por parte de ICIDCA es el de comprobar la factibilidad de producir energía, en forma de gas, como una fuente renovable con lo que se espera

demostrar que la sustentabilidad mediante el cumplimiento de las políticas medio ambientales es posible.

Hasta el momento la planta se encuentra en la fase de puesta en marcha, eso quiere decir que durante esta fase los reactores no están trabajando a toda su capacidad y que se realizan diferentes ajustes para que los microorganismos puedan, con el tiempo, tratar a las aguas de la forma más eficientemente posible.

Cabe señalar que la costa norte de Cuba es una zona turística en constante desarrollo y está siendo contaminada por vinazas, la planta de tratamiento fue diseñada para tratar 800 m³ de estas vinazas. Y se pretende que la planta produzca hasta 16,000 m³ de biogás. El gas obtenido por la planta está destinado a ser usado en las calderas de la destilería y para la cocción de los alimentos de aproximadamente 500 familias que trabajan en las instalaciones y también para aquellos que viven cerca del complejo industrial. Con este tipo de implementaciones del biogás se pretende contribuir a cubrir las necesidades de energía de la sociedad que habita cerca del complejo industrial, a la vez de solucionar un problema ambiental causado por los residuos líquidos de las industrias cercanas.

De hecho una fábrica de azúcar cercana a las instalaciones del ICIDCA, en donde se ubica la planta de tratamiento, produce cerca de 750 m³/día de aguas residuales que actualmente son desechadas al medio ambiente. Las muestras tomadas de la fábrica de azúcar se caracterizan por presentar una demanda química de oxígeno muy por debajo de la que poseen las vinazas alcoholeras, por lo que cabe la posibilidad de que puedan ser empleadas como aguas de dilución del proceso de producción de biogás. Los investigadores del ICIDCA consideran que la posible implementación de estas aguas con un menor índice de DQO puede ser un paso para la solución a los problemas medioambientales que estas mismas aguas originan, también al utilizar estas aguas residuales como un diluyente se reduce de forma considerable el consumo de agua correspondiendo de esta manera con los nuevos conceptos de producciones más limpias.

Aún cuando las aguas residuales de las dos industrias mencionadas son muy diferentes en su composición, son perfectamente tratables en conjunto por la planta de biogás anexa al complejo industrial.

Esta tecnología de reactores UASB, tienen la capacidad de regularse por sí mismos y pueden asimilar cargas orgánicas variables sin la afectación de su eficiencia, demostrando que son capaces de manejar los residuos azucareros producto de la zafra.

Aunque cabe hacer mención que los reactores UASB también presentan algunas desventajas, por ejemplo, para mantener una alta eficiencia es necesario que las aguas residuales a tratar tengan la menor cantidad de sólidos posible y por ello se vuelve imprescindible que las aguas residuales reciban un tratamiento previo, dentro de tales tratamiento se pueden incluir cribado, desarenado y sedimentado.

Otro de los problemas que se presenta con esta tecnología, se relaciona con mantener una buena operación de los biodigestores, ya que la mezcla debe ser homogénea, ya que la demanda química de

oxígeno puede ser mayor a la que los reactores son capaces de manejar, ya que para su correcto funcionamiento la DQO debe de estar en los rango de trabajo del digestor en este caso eso quiere decir que al mezclar dos o más líquidos con una diferencia en la demanda química de oxígeno al finalizar la mezcla ya no debe de haber diferencia en la DQO en ninguna de las muestras que se realicen y la DQO debe de estar dentro de los rangos de operación de los biodigestores aerobios, es por ello que se vuelve necesario un tratamiento previo para la mezcla adecuada antes de pasar a los reactores.

3.2 Situación de la industria tequilera.

Semejante al caso descrito anteriormente, hoy en día varias industrias son las que aplican la misma tecnología de los reactores UASB, en el tratamiento de las vinazas de la industria tequilera en México. Otros tratamientos como los biodigestores aerobios no se emplean debido principalmente a que el costo de operación puede ser muy elevado (Rodríguez), debido a la necesidad de un suministro constante de oxígeno.

Aun a pesar de las desventajas en cuestión de costos del tratamiento aerobio, cabe hacer mención que presenta ó tiene algunas ventajas sobre el anaerobio; tales como por ejemplo: el que uno de los productos finales de la digestión de las bacterias es la producción del biogás. Donde dicho biogás está formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%), por lo que es posible utilizarlo para la generación de energía térmica siempre y cuando sea recolectado para tales propósitos, de no ser así el gas expedito es quemado conforme se expulsa.

Por otra parte, el tratamiento anaerobio también presenta una desventaja cuando se habla de la DQO pues solo una pequeña parte de la demanda química de oxígeno tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, es decir, que el proceso de digestión de las aguas residuales lleva un mayor tiempo y esto ocasiona que los digestores sean diseñados con una alta concentración de microorganismos.

Sin embargo, el tratamiento anaerobio presenta ciertas ventajas significativas con respecto al aerobio, entre las que destaca la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de interrupción del proceso.

Aunque como desventajas de este proceso caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de puesta en marcha.

Ejemplos de la aplicación de la tecnología de plantas de tratamiento basadas en reactores anaerobios por la industria tequilera en México, se tienen en el estado de Jalisco, en donde se han instalado plantas que están diseñadas para manejar altas cargas de DBO y DQO.

Como ejemplo de las experiencias que se han obtenido con este tipo de plantas de tratamiento, se puede señalar a una empresa del estado de Jalisco, la cual contrato a una empresa europea especializada en plantas de tratamiento de vinazas y otros residuos de las diferentes ramas de las industrias alcohólicas, con el fin de que se les diseñara e instalara una planta de tratamiento de vinazas, misma que se terminó de construir en el año 2006.

Al término de la instalación se iniciaron los procesos de la puesta en marcha de los reactores anaerobios, para ello la empresa europea encargada de la instalación capacitó al personal de la industria tequilera y estuvo presente durante todo el proceso de arranque de los reactores.

Pese a todo lo anterior la planta de tratamiento no pudo entrar en operación sino hasta finales del año 2008. Los problemas que se presentaron durante la fase de arranque y que demoraron durante casi dos años la operación de la planta se debieron a que la DQO y DBO que presentan las vinazas del tequila, sobrepasaron la capacidad de operación de la planta de tratamiento diseñada.

Para que la planta de tratamiento operara con normalidad se debieron hacer muchos ajustes en los tiempos de estadía (Fig. 4.2), velocidad y dirección del flujo (Fig. 4.3) y también se tuvo que agregar un tratamiento previo para diluir las vinazas. Esto ha servido para demostrar que los procesos biológicos anaerobios al tratarse de las vinazas provenientes del tequila son, hasta el momento, ineficientes.

Es aquí donde se refleja que la necesidad de modificar la tecnología existente y adoptar la que está en surgimiento en esta y otras áreas de investigación para poder dar un tratamiento adecuado y bien calculado a las vinazas provenientes del tequila.



Fig. 4.2 Biodigestor anaerobia.



Fig. 4.3 Sistema de recirculación del digestor.



Fig. 4.4 Tanques de reposo de lodos para el biodigestor.

En cuestión de tratar de resolver los problemas que actualmente enfrenta la industria tequilera, en donde un buen porcentaje de las mismas no cuenta con un sistema de tratamiento de las vinazas, el gobierno del estado de Jalisco, inauguró el 22 de junio del 2010 una planta de tratamiento de aguas residuales para la industria tequilera (<http://www.jalisco.gob.mx>), con lo cual pretende eliminar el ocho por ciento de las vinazas que genera esta tequilera.

Se informó que la empresa que está desarrollando dicha planta, ha invertido cerca 83 millones de pesos para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales, con lo que se convierte en la única compañía tequilera en tener una planta que cumple al 100 por ciento la NOM-001- SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La planta de tratamiento de aguas residuales tendrá capacidad para limpiar un millón 225 mil litros de agua por día y producir aproximadamente el 12 por ciento del biogás que se utiliza en la planta tequilera. Con esta infraestructura se pretende limpiar 142 millones de litros de agua al año y se espera generar energía verde.

Al respecto, el actual gobernador del estado de Jalisco, ha señalado que las industrias de México y en particular de Jalisco han tomado conciencia sobre el respeto al medio ambiente. Sin embargo el 33 por ciento de las vinazas generadas en la industria tequilera aún se descarga en ríos y afluentes, 49 por ciento se destina para riego agrícola y 18 por ciento para composta.

Aunque la inauguración de la planta de tratamiento con su gran capacidad parece un gran avance, en realidad, palidece con las necesidades reales de la industria tequilera pues anualmente se producen 3 billones de litros de vinazas, otro aspecto que se ve disminuido es la inversión de 83 millones de pesos la cual no parece tan grande cuando se toma en cuenta que una planta de tratamiento para estos propósitos cuesta un aproximado de 12 millones de dólares (Rev. "La gaceta" 2010).

3.3 Situación del tratamiento de aguas residuales de la industria cervecera.

Según lo expresado por Carceller (1998 y 2003) la industria cervecera al igual que la tequilera y otros similares genera durante el proceso de elaboración de la cerveza, corrientes de agua residual, cargadas con un alto contenido orgánico semejante a las vinazas.

Existen casos de experiencias con el uso de reactores anaerobios tal y como es el caso de una empresa española, la planta del Grupo Damm, en el Prat de Llobregat, en donde se tuvo la experiencia de la implantación de un sistema de digestión aerobia para eliminar la materia orgánica, como tratamiento biológico de las aguas depuradas.

Sin embargo, los resultados no fueron los esperados, ya que el sistema genero un gran problema con los fangos producidos, esto debido a la formación y crecimiento de microorganismos filamentosos o algas que competían por espacio y nutrientes con el resto de los microorganismos, además se vio afectada la correcta operación de la recirculación. Esto último se debió al cambio de viscosidad de las sustancias a recircular.

Con el objetivo de mejorar el sistema instalado en esta planta se realizaron estudios para comparar la efectividad tanto de los sistemas de tratamiento aerobio y anaerobio. Mediante la información adquirida del estudio, actualmente, la planta dispone de dos reactores UASB trabajando en serie. El reactor anaerobio se dispone en la parte inferior de la configuración de la instalación y trabaja a alta carga, y la parte superior el reactor aerobio trabaja a baja carga.

Después de la instalación del reactor anaerobio en conjunto con el aerobio la planta obtuvo buenos resultados. El tratamiento anaerobio por si solo podía manejar un caudal de 8000 m³/día con una DQO inicial de 4000 y terminando con una DQO de 700. Los mejores resultados fueron los obtenidos por el tratamiento anaerobio y aerobio de forma conjunta, ya que fueron capaces de manejar 8000 m³/día con una DQO inicial de 4000 y al término del tratamiento obtuvieron 50 de DQO.

El resultado obtenido por la empresa fue que al aplicar los dos tratamientos de forma conjunta, lograron superar con creces los niveles de la normatividad española la cual señala que la máxima DQO debe estar como máximo en un valor no mayor a 150 y actualmente la planta opera plenamente de forma satisfactorio.

Finalmente, cabe señalar que en este capítulo se han presentado algunos ejemplos que ilustran las soluciones tecnológicas que se han venido empleado en las industrias de destilación de azúcar, tequilera y cervecera, las cuales tienen como característica común el tratamiento hacia los residuos del tipo

vinazas. La revisión de estos casos es reflejo del estado actual de los tratamientos más comunes y exitosos que se han logrado en este campo.

Los tratamientos mencionados en este capítulo son los denominados “tratamientos tradicionales”, los cuales ya se han probado y comprobado su efectividad en el campo, sin embargo todas estas tecnologías dependen completamente de la energías no renovables y en algunos casos también de los derivados del petróleo, un recurso no renovable. Es por estas razones que se han desarrollado tecnologías que dependen de energías renovables, de las cuales las más prometedoras son descritas en el siguiente capítulo.

CAPITULO IV

NUEVAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE VINAZAS

La humanidad se enfrenta a un deterioro gradual pero constante de sus fuentes de energía no renovables. En capítulos anteriores se han descrito las tecnologías y procesos que dependen de energía no renovable por lo cual estas tecnologías podrían, en el futuro, perder su factibilidad debido al encarecimiento de los energéticos y/o materias primas necesarias para su operación.

En este capítulo se describen algunas alternativas tecnológicas que dependen de energías renovables, de estas tecnologías se destaca la fotocatalisis, también se destaca el hecho que puede ser utilizada para el tratamiento de aguas residuales en general y en lo particular en la industria tequilera. Para mostrar esta factibilidad se han plasmado algunos aspectos de operación, sin omitir mencionar sus respectivas ventajas y desventajas.

4.1 La fotocatalisis como complemento o alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por las industrias, en los últimos años se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa o complemento tecnológicamente viable y novedoso para el tratamiento de los efluentes de dichas empresas (Garcés). Los POA básicamente constituyen un sistema que opera ayudando en la formación de radicales hidroxilos los cuales son altamente oxidantes, y que contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los afluentes industriales.

Existen varias alternativas de este proceso básico, entre los que se pueden señalar: la fotólisis y la fotooxidación. Uno de los procesos más utilizados es la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador. A continuación, se presenta una revisión de los POA, concentrándose sobre todo en los procesos de fotooxidación.

Los POA se pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo (OH) los cuales son altamente reactivos ya que presentan un elevado potencial de oxidación, característica que los hace de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno; es decir, se generan radicales orgánicos libres, los cuales pueden reaccionar con oxígeno para formar peroxirradicales tal y como se observa en la Tabla 1. Incluso pueden iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir a la mineralización completa de los compuestos orgánicos.

Tabla 1. Formación de radicales orgánicos libres y peroxirradicales.

$\text{OH}^\bullet + \text{RH} \rightarrow \text{R}^\bullet + \text{H}_2\text{O}$	Formación de radicales orgánicos libres.
$\text{R}^\bullet + \text{O}_2 \rightarrow \text{RO}_2^\bullet \rightarrow \text{productos} + \text{CO}_2$	Formación peroxirradicales.

Las ventajas de los POA son:

- Capacidad potencial para llevar a cabo una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de los compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono e iones (cloruros, nitratos).
- Reactividad con la mayoría de compuestos orgánicos, hecho importante para evitar compuestos potencialmente tóxicos presentes en los contaminantes originales que pueden crearse mediante otros métodos.
- Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.

El tratamiento de las aguas residuales de una industria, como la del tequila puede ser un problema muy complejo debido a la gran variedad de químicos y sus niveles de concentración, pero gracias a investigaciones realizadas en este tema, se han generado nuevas alternativas tecnológicas entre las cuales destaca el tratamiento de oxidación fotocatalítico, el cual presenta una ventaja sobre las técnicas comúnmente utilizadas como el tratamiento primario y secundario. Ya que estos tratamientos, en especial los secundarios, permiten disminuir la alta carga orgánica bajando la DQO y la DBO de los afluentes, pero son ineficaces en la eliminación del color y toxicidad debido a la presencia de estructuras polifenólicas, además de que, estos tratamientos son muy sensibles a parámetros tales como pH, temperatura y presencia de tóxicos que pueden inhibir la actividad microbiológica.

Se espera que en corto plazo los procesos de oxidación avanzada (POA) se constituyan como una de las tecnologías más utilizadas en el tratamiento de las aguas contaminadas con productos orgánicos difíciles de tratar provenientes de industrias (químicas, agroquímicas, textiles, de pinturas, etc.). Por lo cual se están desarrollando procesos más prometedores como los de la fotooxidación en sus dos variantes: fotólisis y fotocátalisis.

La oxidación fotocatalítica permite la destrucción de ciertos tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales mediante el empleo de radiación solar ultravioleta y catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilo (OH), los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. En este proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula que se utiliza como catalizador o semiconductor (TiO_2 , entre otros), este proceso tiene la ventaja adicional de requerir básicamente como fuente de energía el sol.

4.2 Dispositivos de Captación Solar Usados en la Fotocatálisis.

Para llevar a cabo la fotocatalisis se pueden utilizar sistemas que captan eficientemente la radiación solar y la concentran en reactores adecuados para promover las reacciones químicas de degradación de los contaminantes presentes en el agua (Alvarez., 2006). Los dispositivos que captan la radiación solar se conocen como concentradores solares y pueden clasificarse de acuerdo al factor de concentración geométrica (C_g).

El factor de concentración geométrica se define como la razón entre el área de abertura del captador y el área del receptor. El área de abertura es el área del concentrador que intercepta la radiación solar incidente y el área del receptor es la que recibe la radiación solar concentrada. Tradicionalmente se clasifican en tres grandes grupos, que son:

- Sistemas de nula o baja concentración (menor o igual a 10 soles).
- Sistemas de media concentración (de 11 a 35 soles).
- Sistemas de alta concentración (mayor a 35 soles).

En aplicaciones fotocatalíticas, la cantidad de radiación útil captada es muy importante. Esto se debe a que mientras mayor sea la radiación solar mayor será el número de fotones que impactaran a las moléculas que se desea hacer reaccionar.

El equipamiento específico necesario para aplicaciones fotocatalíticas tiene mucho en común con el utilizado en aplicaciones térmicas. Como resultado los sistemas fotocatalíticos han seguido diseños convencionales de captación solar térmica tal como el canal parabólico y los sistemas sin concentración. A partir de este punto, los diseños empiezan a ser diferentes, puesto que el fluido debe estar expuesto a radiación solar ultravioleta y, por lo tanto, el receptor debe ser transparente al ultravioleta, sin que exista un incremento significativo en la temperatura de la reacción.

El Nacional Renewable Energy Laboratory (NREL, USA), desarrolló el primer sistema solar para llevar a cabo experimentos de tratamiento de agua. Posteriormente se instaló otro sistema en los Laboratorios Livermore (California). En 1990, el CIEMAT (España) inició también un programa de investigación en la Plataforma Solar de Almería (PSA). Sus primeros sistemas experimentales estaban basados, fundamentalmente, en concentradores cilindro-parabólicos, que era la tecnología más desarrollada. En tanto que en México fue el CIE - UNAM en donde se iniciaron también algunos estudios de fotocatalisis con concentradores cilindro-parabólicos en el año de 1995.

A continuación, se describen brevemente los equipos de captación solar, como una referencia para comprender mejor el funcionamiento de esta tecnología.

4.2.1 Captadores Solares Sin Concentración.

Los captadores solares sin concentración son sistemas estáticos sin mecanismos de seguimiento solar. Estos sistemas se orientan en dirección norte-sur con una inclinación igual a la latitud del lugar.

En los últimos años se han desarrollado y ensayado un gran número de reactores solares sin concentración para aplicaciones de fotoquímica en general y en especial para procesos fotocatalíticos solares. Estos se clasifican en:

- Sistemas de placa plana o cascada.
- Sistema tubular.

4.2.1.1 Sistemas de placa plana o cascada.

Los sistemas de placa plana o cascada están formados por una superficie inclinada hacia el sol por la que fluye el agua a tratar.

En el caso del sistema de placa plana el catalizador que se empleara no se introduce a las aguas residuales a tratar, en su lugar el catalizador se fija a la superficie de la placa. El agua a tratar es bombeada a la parte superior de la placa inclinada en donde el agua es derramada a forma de cascada, esto forma una película de agua residual por sobre la superficie de la placa, la radiación solar impacta el agua pasando por ella hasta llegar a la placa con el catalizador iniciando la fotocatalisis y con ello generando la limpieza de las aguas residuales.

Las ventajas de los sistemas de placa plana son:

- Son de construcción sencilla y económica.
- Son fáciles de operar.
- Mantenimiento simple y de bajo costo.

La principal desventaja de los sistemas de placa palana:

Los sistemas de placa plana suelen estar abiertos a la atmósfera, siendo esto una desventaja porque no pueden ser utilizados para tratar aguas residuales con componentes volátiles, esto se debe a que dichos compuestos se pueden evaporar y al hacerlo pueden dañar a la población cercana y/o al medio ambiente, en la Figura 4.1 se ilustra un caso de un sistema de placa plana.



Fig. 4.1 Instalación experimental de un sistema de placa plana (PSA).

4.2.1.2 Sistema tubular.

El sistema tubular consiste en un número determinado de pequeños tubos conectados en serie sobre una superficie orientada en dirección norte-sur, ver Figura 4.2. Las aguas residuales son mezcladas con uno o más catalizadores, según se presenten las condiciones del agua a tratar, antes de ser bombeadas a través de los tubos.

A este tipo de sistema también se les llama fotorreactores o reactores ya que es en el interior de los tubos donde se lleva a cabo fotocatalisis, a diferencia de los sistemas de concentración los tubos deben ser transparentes y sin aislamiento a fin de permitir el ingreso de la mayor cantidad de radiación solar y es por esto que la velocidad del flujo del agua en tratamiento es baja.

Otra diferencia con respecto a los sistemas de concentración es que en el sistema tubular la prioridad es la cantidad de radiación solar y no la temperatura, por lo que no es necesario que los sistemas cuenten con aislamiento térmico lo cual hace más barato la construcción y operación de estos equipos.

Las ventajas de los sistemas tubulares:

La principal ventaja de este tipo de sistemas es su simplicidad y menor costo de fabricación dado que sus componentes son más sencillos, lo que se traduce en una reducción en el costo de mantenimiento. Además, las estructuras que soportan a los sistemas sin concentración solar son más fáciles y baratas de instalar que los sistemas con concentración y la superficie necesaria para su instalación es menor debido a que la proyección de sombras es menor.



Fig. 4.2 Sistema tubular (CIE-UNAM).

Las desventajas de los sistemas tubulares:

Por otro lado, aunque los reactores sin concentración poseen importantes ventajas, su diseño necesita de grandes áreas de reactores, de material resistente al agua y químicamente inerte a la radiación ultravioleta. Entonces, estos sistemas requieren una superficie de fotorreactores mucho más significativa que los sistemas con concentración y, como consecuencia, los sistemas a escala real deben ser diseñados para soportar elevadas presiones de operación para bombear el fluido a través del campo de fotorreactores.

4.3 La fotólisis

Los métodos fotolíticos para la degradación de contaminantes disueltos en el agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación ultravioleta, que es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar un estado de excitación durante el tiempo necesario para experimentar reacciones.

En presencia de radiación ultravioleta se produce la fotólisis de un gran número de compuestos orgánicos. El proceso tiene lugar en el dominio del UV-C que está entre los 210 y los 230 nanómetros (nm) y se basa en la formación de radicales libre del tipo C-centrados.

La formula $A + h\nu \rightarrow A^{\circ}$ describe la formación de radicales C-centrados, en la ecuación A representa a la molécula sin excitar, $h\nu$ es el fotón absorbido y A° la molécula en estado excitado.

La eficiencia del proceso depende principalmente de la capacidad de absorción de radiación y de la presencia de otros compuestos que absorben la misma longitud de onda. Dentro de los procesos de oxidación fotolíticos normalmente se utilizan lámparas de mercurio de baja presión (254nm, 471 KJ/mol)

empleadas tanto en la desinfección como en la depuración de las aguas. Sin embargo es necesario llevarlas a longitudes de onda más bajas (170-200nm), ya que llevan asociada una mayor energía (704-598 KJ/mol) y son más eficientes en la ruptura de los enlaces de los compuestos orgánicos.

La eficiencia de degradación de los compuestos a partir de la luz absorbida se puede cuantificar mediante la relación entre el número de moléculas que reaccionan y el número de fotones absorbido, con esto se entiende que mientras más moléculas reaccionen a un mismo número de fotones entonces será mayor la eficiencia de la degradación.

Un aspecto a tener en cuenta para este tipo de reacciones es la presencia de oxígeno en el proceso de oxidación. Se ha probado en la fotólisis la existencia de diferentes reacciones en función de la distancia a la fuente de radiación, debido a la diferente concentración de oxígeno presente. Durante el proceso de fotólisis de la materia orgánica se presentan las reacciones mostradas en la tabla 2 conforme los datos mostrados por Gómez, L. et al., (2000).

Tabla 2. Reacciones de la materia orgánica durante el proceso de fotólisis.

$H_2O + hv \rightarrow H^\bullet + OH^\bullet$
$HO^\bullet + RH \rightarrow H_2O + R^\bullet$
$R^\bullet + O_2 \rightarrow ROO^\bullet$
$R^\bullet + R^\bullet \rightarrow R-R$
$ROO^\bullet + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + ..$
$H^\bullet + O_2 \rightarrow HO_2^\bullet$

Si los radicales libres (R^\bullet) reaccionan con el oxígeno, forman radicales peroxilo (ROO^\bullet) los cuales son bastante estables. Si el oxígeno disuelto es ausente o insuficiente, estos radicales libres pueden reaccionar bien por recombinación o dismutación; esta última consiste en que un mismo elemento o compuesto se oxide y al mismo tiempo sea reducido.

Como alternativa al uso de lámpara ultravioletas en algunas instalaciones se utilizan concentradores solares para aprovechar el sol como fuente de luz ultravioleta, debido a que la eficiencia del proceso depende de la capacidad de absorción de radiación solar, solo los equipos de la gama media que comprende sistemas de concentración de 11 a 35 soles y la gama alta los cuales tienen una concentración mayor a 35 soles son capaces de lograr la mayor concentración de luz UV para que la fotólisis sea eficiente. Los equipos más usados y difundidos de la gama media y alta son:

- Concentrador Cilindro-Parabólico Compuesto (CPC).
- Concentrador Cilindro-Parabólico (CCP)

A continuación, se describen los equipos antes mencionados.

4.3.1 Concentrador Cilindro-Parabólico (CCP).

Los concentradores de canal parabólico (CCP) tienen la geometría más representativa de los sistemas de concentración solar media. Éstos tienen un mecanismo que puede realizar el seguimiento del Sol en ángulo azimutal (movimiento de este a oeste) o en elevación (movimiento norte- sur), dependiendo de la configuración y orientación de los concentradores. Estos se basan en una parábola que refleja y concentra la luz solar sobre su foco. Dicho foco contiene el receptor ó fotorreactor tubular transparente de vidrio. El objetivo de los sistemas de seguimiento es poder concentrar la radiación solar directa.

En la Figura 4.3 muestra uno de los primeros concentradores CCP desarrollado en la Plataforma Solar de Almería (España, 1990). Éste ha sido operado en grandes plantas piloto y puede considerarse una de las primeras etapas en la industrialización de los procesos fotocatalíticos.

Para la operación de este CCP, las aguas residuales a tratar son mezcladas previamente con el o los catalizadores. El agua es bombeada a través de los tubos receptores conectados en serie, en donde se concentra la mayor cantidad de radiación solar como sea posible, la combinación de aguas residuales, los catalizadores y la luz ultravioleta dan lugar a la fotólisis en los fotorreactores.



Fig. 4.3 Concentrador cilindro-parabólico Helioman con seguimiento en dos ejes para aplicaciones de fotocatalísis (PSA-CIEMAT).

En la Figura 4.4 se muestra el DICEF, desarrollado en la Coordinación de Concentración Solar del CIE-UNAM (México, 1995), éste también ha resultado ser un instrumento valioso en la investigación de los procesos de la degradación fotocatalítica con energía solar. Actualmente se encuentra en operación en

las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, donde se llevan a cabo experimentos con procesos fotocatalíticos de compuestos orgánicos contaminantes.



Fig. 4.4 DICEF con seguimiento, instalado en la plataforma de concentración solar (CIE-UNAM).

Una vez más la prioridad de estos equipos es aumentar la eficiencia del proceso fotocatalítico con la mayor concentración de luz solar y no el de aumentar la temperatura por lo que no cuenta con aislantes.

Ventajas de los equipos CCP:

Tienen una alta eficiencia debido a alta capacidad de concentración y por esta razón también los tiempos requeridos para tratar las aguas residuales son menores que en otros procesos.

Desventajas de los equipos CCP:

Estos equipos presentan varios problemas técnicos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de captadores utilizan únicamente la energía solar directa. Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades reflectivas por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por factores del medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos.

Los constantes ajustes que requiere el equipo, los problemas que presenta su operación y los elevados costos de los materiales utilizados en este tipo de concentradores, han dado la preferencia de trabajar con captadores fijos tipo CPC aun y cuando los CCP son más eficaces al tratar las aguas residuales.

4.3.2 Concentrador Cilindro-Parabólico Compuesto (CPC).

Los CPC's surgieron en los años 70 para conseguir concentración solar mediante dispositivos estáticos, ya que consiguen concentrar sobre el receptor toda aquella radiación que llega dentro de un intervalo de horas del día, a esto se le denomina "ángulo de aceptación" del concentrador.

Los reactores tipo CPC son sistemas estáticos con una superficie reflectante enfocada hacia un fotorreactor cilíndrico siguiendo una involuta, la que se puede describir como una curva generada desde un punto fijo y cuyo radio va creciendo conforme se desarrolla la curva. Estos dispositivos proporcionan una de las mejores ópticas para los sistemas de baja concentración.

Gracias a la geometría de la superficie reflectante de los CPC, casi toda la radiación que llega al área de abertura del concentrador (incluyendo la difusa) puede ser captada y estar disponible para el proceso fotocatalítico en el fotorreactor. La radiación UV reflejada por el CPC es además distribuida alrededor de la parte posterior del tubo fotorreactor y, como resultado, la mayor parte de la circunferencia del tubo fotorreactor se encuentra iluminada. Otra ventaja es que el agua a tratar es más fácilmente conducida y distribuida que en los diseños de los sistemas sin concentración, esto se debe a que el conjunto de las partes es estático y no requiere de piezas que se deban mover con el tiempo por lo que la estructura es mas solida y por ende menos probable que ocurran modificaciones en el flujo de las aguas residuales.

Como resultado, la radiación UV incidente en el receptor es muy similar a la de los fotorreactores basados en sistemas de placa plana. La eficiencia máxima de captación anual, para captadores estáticos sin seguimiento, se consigue con un ángulo de inclinación del concentrador sobre la horizontal equivalente a la latitud del lugar. Todos estos factores contribuyen a un excelente comportamiento de los concentradores CPCs en las aplicaciones fotocatalíticas solares. En la figura 4.5 se muestra un esquema de la configuración de un concentrador CPC.

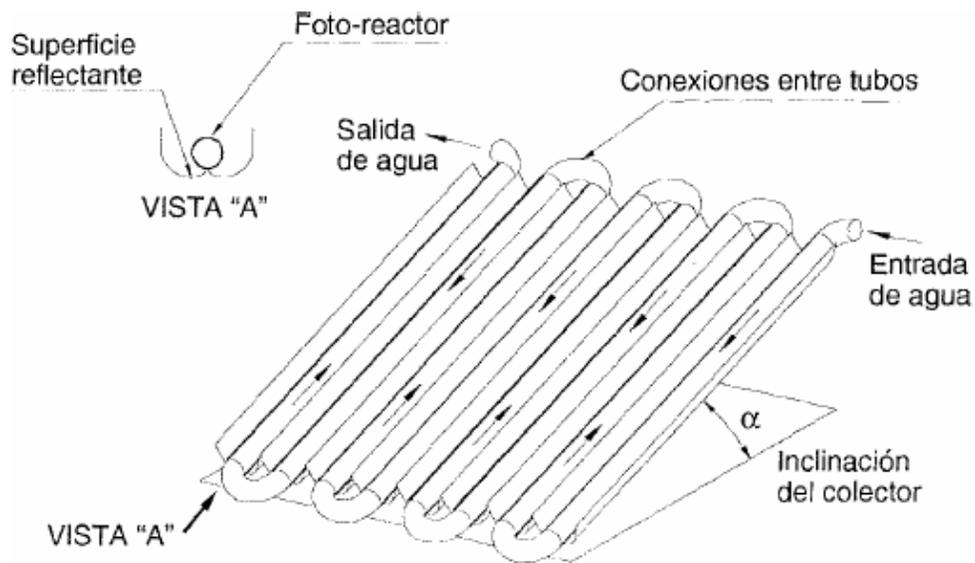


Fig. 4.5 Ejemplo de un concentrador CPC para aplicaciones fotocatalíticas, donde se puede observar la configuración de los fotorreactores.

Ventajas de los CPC:

- Son capaces de concentrar la radiación solar directa y difusa.
- Las instalaciones son estáticas por lo que no se requieren de partes móviles.
- El mantenimiento de los equipos CPC es menos frecuente y económico que los del CCP.
- Para los tratamientos fotocatalíticos tienen una alta eficiencia.
- Los costos de instalación, para una determinada área, de los CPC son más económicos que los CCP.

Desventajas de los CPC:

- El área necesaria requerida para las instalaciones para una determinada capacidad de aguas residuales a tratar es mayor que la requerida por los CCP.
- La superficie reflectiva debe mantener sus propiedades por largos periodos de tiempo y debe de ser resistente al medio ambiente expuesto.

4.4 La fotooxidación

La luz promueve reacciones de oxidación iniciadas por la presencia de radicales libres. Para que estos procesos se lleven a cabo es necesaria la presencia de agentes oxidantes, los que permiten la formación de dichos radicales, de los cuales los más reconocidos y utilizados son el peróxido de hidrógeno y el ozono entre otros. Entre los distintos procesos de aplicación para el tratamiento de aguas residuales, la combinación de radiación ultravioleta y el peróxido de hidrógeno son recomendables cuando se desea un agua con un alto grado de pureza. Este POA implica la formación de radicales hidroxilo. Como el peróxido de hidrógeno es un potente agente oxidante no selectivo y una excelente fuente de radicales libres; es además un aditivo deseable ecológicamente ya que durante su descomposición únicamente se genera agua y/o oxígeno. El éxito del proceso radica en la cantidad de radicales hidroxilo (OH^\bullet) obtenidos a partir de la descomposición fotocatalítica del H_2O_2 .

El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis de H_2O_2 es la ruptura del enlace O-O por la acción de la luz ultravioleta representada por la formula $\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{OH} + {}^\bullet\text{OH}$ (Rodríguez., 2001).

La eficiencia de este proceso es muy elevada y la eficiencia máxima se logra cuando se forma dos radicales hidroxilo y se hace invariable con la aplicación de luz ultravioleta. Al igual que en la fotólisis, a partir de los ${}^\bullet\text{OH}$ se forman los radicales C-centrados que en presencia de oxígeno forman radicales peroxilo intermedios, los cuales son claves en las reacciones de oxidación y la completa mineralización de los compuestos. Los radicales reaccionan con la materia orgánica según las reacciones de abstracción del hidrógeno, adición y por las reacciones de transferencia de electrones las cuales se pueden observar en la Tabla 3.

La reacción de abstracción del hidrógeno consiste en extraer el hidrógeno de un compuesto y este se adhiere a otro compuesto (el adsorutor).

La reacción de adición del hidrógeno, a diferencia de la abstracción, la molécula que está en reacción no adhiere únicamente el hidrógeno sino que adiciona el radical hidroxilo completo.

La reacción de transferencia de electrones consta simplemente de pasar los electrones de un radical hidroxilo a los radicales.

Tabla 3. Reacciones de abstracción, adición del hidrogeno y transferencia de electrones.

$\text{HO}^\bullet + \text{RH} \rightarrow \text{R}^\bullet + \text{H}_2\text{O}$	Reacción de abstracción del hidrógeno.
$\text{X}_2\text{C}=\text{CX}_2 + \text{HO}^\bullet \rightarrow \text{X}_2\text{C}(\text{HO})-\text{CX}_2$	Reacción de adición del hidrógeno.
$\text{HO}^\bullet + \text{RX} \rightarrow \text{OH} + \text{XR}$	Reacción de transferencia de electrones.

Cabe denotar que los radicales hidroxilo no reaccionan, o lo hacen lentamente, con alcanos poli, perclorados o fluorados ya que no pueden generarse radicales C-centrados por abstracción del hidrógeno.

La fotooxidación al igual que la fotólisis basan su eficiencia en la en el catalizador y la radiación UV por los que todas las tecnologías aplicadas para fotólisis, como los son CCP y los CPC, son utilizadas para la fotooxidación.

Finalmente, en este capítulo se han presentado algunas alternativas para el tratamiento de aguas residuales, la gran mayoría todavía están en una etapa experimental. En un futuro con la falta de combustibles tradicionales para generar energía para la operación de plantas tradicionales, los tratamientos alternativos podrían constituirse en una opción viable para disminuir de manera significativa la contaminación de las aguas residuales procedentes de las industrias tales como la del tequila.

CAPITULO V

COMENTARIOS FINALES

En la actualidad el tratamiento de las vinazas en muchas de las diferentes ramas industriales es un proceso común y deseado, pero ese no es el caso de la industria tequilera aun cuando estos desechos exceden las normas oficiales y tienen un impacto negativo para el medio ambiente. Las tecnologías existentes para el tratamiento de aguas residuales hoy han mostrado que son efectivas para las aguas residuales de las ciudades y algunas industrias alcoholeras, en donde se ha visto que cada uno de los diferentes tratamientos pueden tener diferentes resultados, unos mejores que otros, dependiendo de las condiciones de las aguas a tratar y de la tecnología empleada en su tratamiento.

Así en este trabajo monográfico, se ha presentado el caso de los procesos anaerobios los cuales figuran de manera muy positiva como la mejor opción para tratar las grandes cargas orgánicas de las industrias en las que manejan destilados de azúcar y las industrias cerveceras, sin embargo no obstante la gran mayoría de estos procesos presentan ineficiencia en el manejo de las vinazas provenientes de la destilación del tequila debido a los muy elevados niveles de demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno presentes en la vinazas por lo que se vuelve necesario un tratamiento adicional como la fotocatalisis con el fin de suplir las deficiencia presentadas por los tratamientos convencionales.

Cabe hacer mención que durante la elaboración de este documento se inauguró una planta de tratamiento de aguas residuales tendrá capacidad para limpiar un millón 225 mil litros de agua por día pero esto palidece con las necesidades reales de la industria tequilera pues anualmente se producen 3 billones de litros de vinazas, otro aspecto que se ve disminuido es la inversión de 83 millones de pesos la cual no parece tan grande cuando se toma en cuenta que una planta de tratamiento para estos propósitos cuesta un aproximado de 12 millones de dólares.

Por otra parte, entre los nuevos desarrollos tecnológicos la fotocatalisis se presenta como un tratamiento alternativo, es decir, es una tecnología combinada proveniente de los ya muy conocidos procesos tradicionales y las tecnologías emergentes de energías renovables. La oxidación fotocatalítica si bien no es un tratamiento completo por sí solo y se le puede considerar como un tratamiento terciario y/o alternativo, esto muestra que la combinación de métodos tradicionales y las nuevas tecnologías verdes pueden dar los mismos ó incluso mejores resultados y/o obtener mejores beneficios medioambientales.

La escasas de información documentada de plantas de tratamiento de vinazas en operación y plantas piloto se debe a la poca implementación de tecnologías y aunado a esto está el hermetismo que presentan gran parte de las compañías a nivel nacional e internacional, de hecho para obtener información de gran importancia para la elaboración de este documento fue necesario contactar e

ingresar directamente a las compañías que lo permitieron. En base a esto se puede dilucidar la magnitud del impacto medioambiental generado pero también se puede observar que es un campo fértil para la implementación de tecnologías ya conocidas, las que están en surgimiento y las que están por venir.

BIBLIOGRAFÍA

Direcciones de internet:

<http://crtnew.crt.org.mx>, última entrada en 23 de febrero de 2010

http://www.impi.gob.mx/wb/IMPI/declaracion_general_de_proteccion_de_la_denomina11, última entrada en 15 de abril de 2010

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Tratamiento_aguas_continuacion.htm, última entrada en 5 de abril de 2010

<http://www.lenntech.es/adsorcion.htm>, última entrada en 10 de marzo de 2010

www.tmimedioambiente.com, última entrada en 7 de abril de 2010

<http://www.excelwater.com>, última entrada en 7 de marzo de 2010

Libros y documentos:

Acosta, N., Iñiguez, G., 2009. *Fertilizante orgánico obtenido de las vinazas tequileras y estiércol de ganado*. Revista científica internacional indexada ISSN 1679-9844 año 2 – N ° 04

Alvarez, A., 2006. Tesis para obtener el título de Física. *Análisis de las distribuciones fotónicas horarias en receptores tubulares de concentradores solares*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Avilla, J., 1999. *Lo Esencial Acerca del Intercambio Iónico*. Artículo presentado en la XXV Conferencia Anual de la Water Quality Association (WQA).

Barrenechea, A. *Tratamiento – manual I – tomo II –Capitulo 4 – coagulación*. Organización Panoamericana de la salud.

Barría, J., Benavides, S., Fuentes, C. y Morales, C., 2006. *Evaporación*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TEMUCO. Temuco.

Beltrán, F. J., Encinar, J. M. y García – Araya, J. F. (1993). *Oxidation by ozone and chlorine dioxide of two distillery wastewater contaminants: gallic acid and epicatechin*. Wat. Res. Vol 27, No. 6. pp. 1023 – 1032

Carceller, J.M., 1998. *Identificación y control de los microorganismos filamentosos causantes del “bulking” y “foaming” en las EDAR*. Cerveza y malta, núm. 138.

Carceller, J.M., 1998. *Los fenómenos del “bulking” y “foaming” en las estaciones depuradoras de aguas residuales*. Tecnología del agua, núm. 179.

Carceller, J.M., 2003. *Experiencias prácticas en la optimización de un sistema de depuración biológico (anaerobio-aerobio) para una industria agroalimentaria*. GRUPO DAMM.

Cedeño C. M., 1995. *Tequila Production*. *Critical Reviews in Biotechnology*. 15(1): 1–11.

Conil, P., 1996 valorización de los subproductos de las plantas anaerobias de tratamiento de aguas residuales.

Espinoza, J., Herrera, S. *Opciones para el tratamiento primario de aguas residuales*. Universidad de Sonora.

Fernández-Alba, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S. y Sanz, J. *Tratamientos avanzados de aguas industriales. Informa de vigilancia tecnológica*. www.madrimasd.org

Frank, Z. *Tratamiento anaerobio de las vinazas*. Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda. Pp.2

Garcés, L., Mejía, E., y Santamaría, F. *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. *Revista Lasallista de investigación* – Vol. 1 No. 1

Gómez, L. et al., 2000. *Fotooxidación de vertidos químicos: Revisión y experiencias de procesos de oxidación avanzada*. En: *Ingeniería Química*. Madrid. No. 371; p. 211-216.

Hammeken, A. y García, E. *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Universidad de las Américas Puebla.

Iangovan K., Linerio J., Alvarez E, Briones M. y Noyola A. (1996). *Tratamiento Anaerobio de Vinazas Tequileras*. Biodegradación de compuestos orgánicos industriales 1, Instituto de ingeniería, UNAM, México, D. F. pp. 38 – 51.

Knoell, T. y Owens, E., 2006 *A New Method in the Procurement of R.O. Antiscalant Chemicals*, *Ultrapure Water*, Vol.23, No.6, Pg.20 – 28

Llagas, W., y Gómez, E., 2006. *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* Vol. 15, Nº 17, 85-96 UNMS MISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico).

Maldonado, V. *Tratamiento – manual I – tomo II –Capítulo 9 – Filtración*. Organización Panoamericana de la salud.

Mara, D.D. and Pearson, H.W., 1986. *Artificial freshwater environments: Waste stabilization ponds*. In: *Biotechnology*. Vol 8. (ed. W. Schoenborn), pp. 177-206. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft.

Microsoft® Encarta® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.

Moreno-Pirajá, J., Navarrete, L., Giraldo, L. y García, V. *Adsorción de Fenol y 3-cloro Fenol sobre carbones activados mediante calorimetría de inmersión*. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá –Colombia.

NOM-006-SCFI-2005., 06-01-06. *Bebidas alcohólicas-Tequileras especificaciones*. Norma Oficial Mexicana. Diario Oficial de la Federación.

NOM-064-ECOL 1994., 01-05-95. *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería*. Norma Oficial Mexicana. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. pp. 3 – 8

NOM-ECOL-002., 23-04-03. *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería*. Norma Oficial Mexicana. Diario Oficial de la Federación.

Obaya, M., Valdés, E., Valencia, R., León, O., Morales, M., Pérez, O., Díaz, S. y Valdivia, O. Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Revista informativa “La gaceta”, 22 de marzo del 2010.

Rodríguez, M., et al., 2001. *Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante Fotocatálisis solar*. Madrid: Ciemat; 189 p.

Soto A. *Pretratamientos y tratamientos Físicos*. Universidad de Santiago de Compostela.

Torres, A., González, R. *Comportamiento de tecnología para el tratamiento de vinazas*.

Trejo, R. *Investigación sobre eliminación de sales metálicas por procedimientos avanzados. Tesis doctoral*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid 2008. Pp. 70 -75 80-83

Vargas, L. *Tratamiento – manual I – tomo II –Capítulo 6 – Floculación*. Organización Panoamericana de la salud.

Vergara, Y., 1984. *“Tratamiento de Aguas Industriales”*, Kavin Editores S.A., Lima Perú.

WALCO S.A. Todo sobre los Quelatos.