

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MICRO-ASPERSIÓN  
O EVAPORACIÓN MECÁNICA DE AGUA COMO MÉTODO DE DISPOSICIÓN  
DE AGUA DE PRODUCCIÓN**

**LILIANA RODRÍGUEZ PLAZAS  
ANDREA JOHANNA RUIZ TIBACUY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2015**

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MICRO-ASPERSIÓN  
O EVAPORACIÓN MECÁNICA DE AGUA COMO MÉTODO DE DISPOSICIÓN  
DE AGUA DE PRODUCCIÓN**

**LILIANA RODRÍGUEZ PLAZAS  
ANDREA JOHANNA RUIZ TIBACUY**

**Trabajo de monografía para optar el título de  
Especialistas en Producción de Hidrocarburos**

**DIRECTOR  
ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ  
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme continuar con todos mis proyectos, a mi esposo Diego con toda mi admiración, a mis hijos Santiago y Laura por todo su apoyo y tiempo para poder culminar mis estudios y a mi madre Lucrecia por su enseñanza de vida.

*Liliana Rodríguez*

A Dios porque me permite, hacer de cada día una experiencia nueva y de cada experiencia una vida. Y a todas las personas que me acompañaron en este proceso.

*Andrea Ruiz*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	19
1. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS .....	21
1.1. GENERALIDADES .....	21
1.2. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA .....	26
2. REGLAMENTACIÓN EN TÉRMINOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA EN COLOMBIA.....	31
3. EVAPORACIÓN MECÁNICA COMO MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE AGUA.....	37
3.1. TEORÍA DE EVAPORACIÓN .....	38
4.1. DISEÑO DE EVAPORACIÓN MECÁNICA PARA UN CAMPO PETROLERO COLOMBIANO. ....	58
4.2. EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....	61
4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	70
4.3.1 Análisis Económico Con Flujo de Caja. Este análisis se dividirá en: .....	73
5. CONCLUSIONES .....	81
6. RECOMENDACIONES .....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de medición al agua de producción. ....	23
Tabla 2. Parámetros mínimos de vertimiento. ....	28
Tabla 3. Rangos de aplicabilidad de los parámetros involucrado en el proceso de inyección de agua .....	29
Tabla 4. Concentración de aceite máximo permisible en agua de producción .....	31
Tabla 5. Reglamentación Colombiana en términos de dispersión de agua .....	34
Tabla 6. Relación Velocidad de sedimentación y Diámetro de la gota .....	41
Tabla 7. Distancia de frenado en función del tamaño de gota. ....	45
Tabla 8. Cálculos intermedios tasa de evaporación. ....	49
Tabla 9. Valores de “ $\alpha$ ” según la diferencia de temperaturas. ....	50
Tabla 10. Relación Tasas de evaporación y diámetro de la gota. ....	50
Tabla 11. Tasa de evaporación a distintas temperaturas ambientes con Delta temperatura constante de 5 grados Centígrados.....	53
Tabla 12. Tiempo de vida y de vuelo de las gotas según su el tamaño de la gota. ....	55
Tabla 13. Consideraciones de diseño para evaporar 3000 barriles de agua por día .....	59
Tabla 14. Variables del proceso .....	64
Tabla 15. Otras Variables del proceso.....	65
Tabla 16. Tarifas de tratamiento de crudo por día dependiendo del corte de agua .....	70
Tabla 17. Datos de producción del campo promedio por día.....	70

Tabla 18. Costos antes de la evaporación mecánica .....	71
Tabla 19. Costos incluyendo la evaporación mecánica .....	72
Tabla 20. Costos incluyendo menos transporte de fluido .....	73
Tabla 21. Premisas económicas para el flujo de caja .....	75
Tabla 22. Volumen producido de fluidos y agua evaporada durante el proyecto...	76
Tabla 23. Análisis económico comparando diferentes escenarios de producción .	80

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura Colombiana del Derecho ambiental.....	32
Figura 2. Evaporadores mecánicos.....	37
Figura 3. Relación entre velocidad de sedimentación y tamaño de gota. ....	43
Figura 4. Distancia de frenado en función del tamaño de gota. ....	46
Figura 5. Tasa de evaporación vs diámetro de la gota.....	52
Figura 6. Tasa de evaporación a distintas temperaturas ambientes con Delta temperatura constante de 5 grados centígrados.....	52
Figura 7. Tiempo de vida y de vuelo de las gotas según su el tamaño de la gota.....	57
Figura 8. Distribución y Espaciamiento estimado para el sistema de evaporación mecánica .....	59
Figura 9. Distribución en Plataforma.....	60
Figura 10. Volúmenes evaporados en el piloto .....	61
Figura 11. Comportamiento Humedad Relativa en el campo .....	63
Figura 12. Comportamiento tasa de evaporación vs Porcentaje de humedad relativa a diferentes temperaturas (grados Fahrenheit) .....	64
Figura 13. Horas del día más propensas a tener una velocidad del viento mayor a 4.5 metros por segundo.....	67
Figura 14. Volumen evaporado según periodo del día .....	68
Figura 15. Efecto de la ventilación forzada.....	69
Figura 16. Volumen producido de fluidos y agua evaporada durante el proyecto .....	76
Figura 17. Flujo de caja con volúmenes reales sin evaporación.....	77
Figura 18. Flujo de caja con volúmenes reales con evaporación .....	78

Figura 19. Flujo de caja con volúmenes mayores proyectados sin evaporación..... 78

Figura 20. Flujo de caja con volúmenes mayores proyectados con evaporación ..... 79

## GLOSARIO

**Calor Sensible:** es aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado.

**Calor Latente:** El calor latente es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización). Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.

**Recurso:** en el Decreto 1594 de 1984 se entenderá por tal las aguas superficiales, subterráneas, marinas y otras. Mientras que en el Decreto 3930 del 2010 se denominara Recurso hídrico.

**Recurso Hídrico:** Aguas superficiales, subterráneas, meteóricas y marinas

**Temperatura de bulbo Seco:** o temperatura seca es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.

**Usuario nuevo:** según Decreto 1594 de 1984 es aquel cuya actividad se inicie después de la fecha de entrada de vigencia del decreto

**Usuario existente:** según Decreto 1594 de 1984 es aquel cuya actividad ha venido realizándose con anterioridad a la fecha de entrada de vigencia del decreto

**Vertimiento.** Según Decreto 3930 de se refiere a la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.

## NOMENCLATURA

DQO:	Demanda química de oxígeno
DBQO:	Demanda bioquímica de oxígeno
TSS:	Sólidos suspendidos totales
Re:	Número de Reynolds
D:	diámetro de la gota (m)
V:	velocidad de la gota relativa al aire (m/s)
$\nu$ :	viscosidad cinemática al aire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$V_{s,st}$ :	velocidad de sedimentación según Stokes
$\rho_d$ :	densidad de la gota
g:	gravedad
Cd:	Coefficiente de arrastre
a:	constante para hallar coeficiente de arrastre (24)
b:	constante para hallar coeficiente de arrastre (0.32)
c:	constante para hallar coeficiente de arrastre (0.52)
$V_s$ :	velocidad de sedimentación incluyendo coeficiente de arrastre
$\rho_a$ :	densidad del aire.
Se:	distancia de frenado
$V_o$ :	velocidad inicial
T avg:	tiempo de relajación promedio de la gota
K:	tasa de evaporación
Ml:	Peso molecular del agua (0,018Kg/mol)
$D_{v,f}$ :	coeficiente de difusividad
$\Delta p$ :	Diferencia entre la presión de vapor cerca a la gota y la presión de vapor en la atmósfera
R:	Constante de los gases (8,1344 J/mol K)
Tf:	Temperatura de referencia
$\rho_a$ :	Densidad del aire

uatf:	Viscosidad del aire a la temperatura $T_f$
Psat:	presión de saturación
Td:	temperatura seca
Tw:	temperatura húmeda
Tlife:	tiempo de vida de la gota
°C:	Temperatura en grados Celsius

## **RESUMEN**

**TÍTULO:** EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL SISTEMA DE MICRO-ASPERSIÓN O EVAPORACIÓN MECÁNICA DE AGUA

## COMO MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN.<sup>1</sup>

**AUTORES:** LILIANA RODRÍGUEZ PLAZAS  
ANDREA JOHANNA RUIZ TIBACUY\*\*

**PALABRAS CLAVES:** MÉTODO DE CONTROL DE AGUA DE PRODUCCIÓN, EVAPORACIÓN MECÁNICA, MICRO-ASPERSIÓN.

### DESCRIPCIÓN:

Durante la vida productiva de un campo petrolero se obtienen fluidos no siempre deseables como el agua de producción, muchas han sido las técnicas para controlar, reducir, reutilizar el agua asociada a la producción de petróleo. Una de las técnicas más usadas comúnmente es la inyección del agua para sostenimiento de presión, pero en ocasiones cuando no hay pozos inyectoros, se debe evaluar qué hacer con el agua producida.

Es por esto que la evaporación mecánica es una opción cuando no se dispone de pozos inyectoros. A través de este documento se podrán observar las diferentes variables que interfieren en este proceso y la eficiencia del mismo en un caso de campo Colombiano.

Aunque el proceso en sus inicios no evaporo el volumen que se estaba esperando se pudo identificar las variables que afectan el desempeño del proceso y estas son la velocidad del viento, y la distancia entre los evaporadores. Por lo tanto se sugiere utilizar la ventilación forzada y aunque la distancia entre los evaporadores no fue la inicialmente diseñada, una forma de aumentar la distancia entre los mismos es trabajar con los evaporadores en forma de zigzag.

En términos económicos esta técnica es apropiada para este campo.

### ABSTRACT

**TITLE:** TECHNICAL- ECONOMICAL EVALUATION OF MICRO ASPERSION OR MECHANICAL EVAPORATION AS METHOD OF WATER PRODUCTION DISPOSAL.\*

---

<sup>1</sup> Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director: Erik Giovanly Montes Páez, Ingeniero de Petróleos.

**AUTHORS:** LILIANA RODRIGUEZ PLAZAS  
ANDREA JOHANNA RUIZ TIBACUY\*\*

**KEYWORDS:** METHOD TO WATER CONTROL, MECHANICAL EVAPORATION, MICRO-ASPERSION

**DESCRIPTION:**

During the productive life of an Oil field other kind of fluid are obtained, this fluids are not always desirables as water production, a lot of techniques have been used to control, reuse and control this water. The main technique more used in a world has been water injection, but in many cases when the injector well does not exist in field is mandatory evaluate the best way to manage this kind of fluids.

It is the principal reason because mechanical evaporation is an option when in the field does not exist an injector well. Through this document you can find the variables that affect the process and the effect in the results of the pilot carried out in a Colombian Oil Field.

At the very beginning the process could not evaporate the amount of water that had been proposed, but the variables that affect the process were identified. These variables are wind velocity and distance between evaporators, to improve wind rate the solution was include the forced ventilation, and to improve the distance between evaporators was operate these in a zig-zag way to increase the distance.

In economic terms this technique is appropriate to this field.

---

\* Monograph

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director: Erik Giovany Montes Páez, Ingeniero de Petróleos.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento y disposición de agua, ha sido un cuello de botella para el desarrollo y explotación de campos de producción de petróleo. Este problema ha llevado a que la industria evalúe diferentes técnicas para su disposición final; una de ellas es la posibilidad de evaporar el agua de producción con el fin de eliminar los problemas relacionados con los métodos tradicionales de disposición como son el Vertimiento a Cuerpos de Agua y la Re-inyección al Subsuelo.

Una de las alternativas para disposición implica la evaporación térmica, sin embargo en la práctica, esta alternativa no ha tenido validez por los altos costos que implica el método típico de evaporación que se conoce como la “Evaporación Térmica Forzada”. Este método requiere de la utilización de grandes cantidades de energía para calentar el agua hasta evaporarla, además de la utilización de equipos que requieren inversiones importantes de capital y que generan emisiones al medio ambiente.

La evaporación mecánica de agua, surge como una alternativa de evaporación más eficiente energéticamente, ya que esta tecnología se concentra en disminuir el tamaño de la partícula de agua para que esta sea absorbida por el medio ambiente. Adicionalmente, dado que el proceso de evaporación mecánica ocurre a bajas temperaturas, la evaporación de los contaminantes líquidos que se asocian al agua industrial no ocurre, es por ello que el proceso de decantación y concentración de los contaminantes se recogen dentro del área de tratamiento. Esto permite reducir los costos del manejo y tratamiento de los contaminantes

concentrados, recuperar los hidrocarburos decantados e incluso aprovechar las sales y otros minerales para otros procesos industriales.

La técnica de evaporación mecánica es hoy en día una opción que hay para purificar aguas industriales y retornarles al medio ambiente. El uso de esta técnica se ha intensificado principalmente en minería, y está creciendo en el sector de los hidrocarburos.

En el desarrollo de este documento se encontrarán las diferentes técnicas para la disposición de agua de producción, la descripción de la evaporación mecánica, la aplicación de esta técnica en un caso de campo Colombiano y así mismo la justificación del uso de esta técnica.

# 1. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS

La producción de petróleo generalmente está asociada a la producción de otro tipo de fluidos como lo es el agua, el agua de producción debe ser tratada y dispuesta según reglamentaciones de cada país, es por esto que a continuación se mostrara las diferentes técnicas de disposición de agua existentes en la industria de los hidrocarburos.

## 1.1. GENERALIDADES

El agua presente en el yacimiento se denomina agua de formación, mientras que el agua asociada a la producción de hidrocarburo se denomina “agua de producción”, en términos generales como indica Khatib<sup>2</sup> se producen 3 barriles de agua por cada barril de petróleo producido (3:1) .Sin embargo esta relación no es exacta y depende de cada región, así por ejemplo como lo indica la revista e+<sup>3</sup> de Ecopetrol en Canadá por cada barril de crudo se producen 15 barriles de agua y para Colombia es de 12de agua por 1 de crudo.

La cantidad de agua que acompaña al petróleo producido de los pozos puede ser de características sencillas, cuya separación por asentamiento en tanques se logra fácilmente ya que la emulsión se rompe relativamente en forma sencilla, sin embargo puede suceder que la estabilidad de la emulsión se tal que el tratamiento para separar el agua requiera de procesos adicionales.

---

<sup>2</sup> Khatib, Z. Verbeek P. Water to value-Produced Water Management for Sustainable Field development of Mature and Green Fields. SPE 73853. 2002

<sup>3</sup> Qué hacer con el agua de Producción? (anónimo). Revista e+. Ecopetrol. Edición 4 Julio-Septiembre 2014

En ocasiones, el manejo, tratamiento y disposición del agua no requieren de instalaciones especiales, el agua producida siempre tiene alguna forma de atención primaria antes de su eliminación, este sistema podría adoptar la forma de un tanque de desnate, un separador de flujo cruzado, una unidad de flotación (skim tank, skim vessel, crossflow separator, or gas flotation unit.). La mayor parte de estos dispositivos emplean técnicas de separación por gravedad. Dependiendo de la eficiencia, es probable que se requiera un tratamiento secundario.

Las características del agua y del petróleo pueden facilitar el procedimiento de romper las emulsiones, pero en términos generales se requieren de tratamientos mecánico, químico, térmico o eléctrico para lograr la adecuada separación de los dos fluidos y obtener un crudo que corresponda a las especificaciones de calidad requeridas. La presencia de sal en asociación con el agua y el petróleo es de ocurrencia natural en muchos estratos geológicos. De la concentración de sal en solución dependerá la selección del tratamiento que deba emplearse para despojar el petróleo de la sal que contiene. La sal es indeseable en el crudo por sus propiedades corrosivas y las implicaciones operacionales y económicas que ello significa para las refinerías.

El agua producida contiene una serie de sustancias que deben ser medidas, en términos generales la concentración de esos componentes se reportan en miligramos por litro (mg/l) y generalmente los parámetros que se miden al agua se reportan la tabla (1), que se presenta a continuación.

Una breve descripción de estos parámetros se encuentra a continuación:

- **Sólidos Disueltos (SDT):** está relacionada con la salinidad del agua. Las aguas producidas contienen sólidos disueltos, en gran variedad de concentraciones, las cuales pueden variar de menos de 100 mg/l a más de 300.000 mg/l, este valor depende de factores como: la ubicación geográfica, la profundidad, así

como también la edad y tipo de depósito, según la cantidad de los mismos se puede clasificar el agua, así por ejemplo:

- a) Agua dulce: es aquella que tiene un valor menor de 1000 mg/l, puede llegar a ser potable.
- b) Agua salubre: su valor varía entre 1000 y 20000 mg/l, muy salina para ser potable, pero no tan salada como para ser agua de mar.
- c) Agua salina: similar al agua de mar, aproximadamente 35000 mg/l y
- d) Salmuera: más salada que el agua de mar.

Tabla 1. Parámetros de medición al agua de producción.

Cationes	Aniones	Otras propiedades
<p>Sodio (Na<sup>+</sup>)                      Calcio (Ca<sup>++</sup>)                      Magnesio (Mg<sup>++</sup>)                      Hierro (Fe<sup>+++</sup> &amp; Fe<sup>++</sup>)                      Bario (Ba<sup>++</sup>)                      Estroncio (Sr<sup>++</sup>)</p>	<p>Cloruro (Cl<sup>-</sup>)                      Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>)                      Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)                      Carbonato (CO<sub>3</sub><sup>=</sup>)</p>	<p>pH                      Bacterias                      Turbiedad                      Oxígeno disuelto                      Dióxido de Carbono disuelto                      Sulfuros(Sulfuro de Hidrógeno)                      Contenido de aceite                      Temperatura                      Sólidos disueltos totales (SDT)                      Gravedad específica                      Resistividad (Conductividad)                      Sílice                      Sólidos precipitados</p>

Fuente SPE 26703. Maureen Produced Water Injection<sup>4</sup>

<sup>4</sup> R.E, King. Maureen Produced Water Injection. SPE 26703. 1983

- Sólidos Precipitados (Escamas): Los iones más problemáticos en las aguas de producción son aquellos que reaccionan para formar precipitados cuando hay cambios de presión, de temperatura o composición. Estas son los conocidos depósitos que se forman en las tuberías de producción, en las líneas de flujo, en los recipientes y en los equipos de tratamiento de agua producida. Estas escamas pueden ser: carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), y de sulfuro de hierro ( $\text{FeS}_2$ ).
- Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ): puede formarse por la mezcla de aguas de producción diferentes, pero la causa más común es la reducción en la presión, que genera la liberación de dióxido de carbono disuelto del agua producida. Este fenómeno incrementa el pH de las aguas, lo cual genera reducción de la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  y se produce la precipitación de las escamas. Los efectos de temperatura son igualmente importantes ya que el  $\text{CaCO}_3$  es menos soluble a temperaturas altas, por lo cual es normal encontrar depósitos de este compuesto en intercambiadores de calor, calentadores y tratadores. Su solubilidad en agua dulce es aproximadamente 1000 mg/l a 60°F (15°C) y disminuye a 230 mg/l, cuando la temperatura se incrementa a 200°F (93°C), afortunadamente, a mayor salinidad la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  es mayor que en el agua fresca.
- Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ): El sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) es una de las muchas clases de escamas de los sulfatos y es más comúnmente conocida como yeso. Al igual que  $\text{CaCO}_3$ , puede formarse, ya sea como resultado de mezclar diferentes aguas o como resultado de cambios en temperatura y presión mientras el agua viaja desde el subsuelo a la superficie. La solubilidad del  $\text{CaSO}_4$  es máxima (2150 mg/l) a 100°F (38°C) y disminuye a 2000 mg/l, cuando la temperatura alcanza 60°F (15°C). La solubilidad del  $\text{CaSO}_4$  también disminuye al aumentar la temperatura por encima de 100° F, alcanzando un

valor de 1600 mg/l a 200°F (93°C), esta solubilidad también aumenta cuando aumenta la salinidad del agua.

- Sulfuro de hierro (FeS<sub>2</sub>): El sulfuro de hierro (FeS<sub>2</sub>) es un producto de la corrosión causada por aguas que contienen sulfuro de hidrógeno disuelto, en contacto con equipo construido de acero al carbono o de otros materiales de hierro. En caso de mezclar el agua que contiene cationes de hierro (Fe<sup>2+</sup>) con otra agua que contiene sulfuro de hidrógeno, en general presentará precipitados, de FeS.
- Sulfato de Bario y Sulfato de estroncio (BaSO<sub>4</sub> y SrSO<sub>4</sub>): Los sulfatos de bario y de estroncio (BaSO<sub>4</sub> y SrSO<sub>4</sub>) son compuestos mucho menos solubles que el sulfato de calcio, pero afortunadamente estos compuestos no son muy comunes en aguas de producción. La solubilidad del BaSO<sub>4</sub> es bastante baja, con valores de aproximadamente 3 mg/l en el rango de 100°F (38°C) a 200°F (93 °C). En cuanto a la solubilidad del SrSO<sub>4</sub> es de 129 mg/l a 77°F (25°C) y disminuye a 68 mg/l, si la temperatura de la solución aumenta a 257°F (125°C). Si una corriente de agua producida que contiene cantidades apreciables de iones de bario o estroncio se mezcla con un agua rica en sulfatos, es muy probable que se generen escamas de sales de bario y / o de estroncio.
- Arena y Otros Sólidos en Suspensión: Además de las partículas de escamas, el agua de producción a menudo contiene otros sólidos suspendidos. Estos incluyen arena y arcilla de formación, sólidos de estimulación y fracturamiento o productos de corrosión. La cantidad de sólidos en suspensión es generalmente pequeña a menos que el pozo produzca de una formación no consolidada, en cuyo caso se pueden generar grandes volúmenes de arena.
- Gases Disueltos: A medida que el agua producida fluye del yacimiento la mayoría de estos gases se despoja a la fase de vapor y se retiran en los

separadores primarios y tanques de almacenamiento. La presión y temperatura a las que el agua de producción se separa del aceite, del condensado y / o del gas natural, son determinantes en las características y calidad de los gases disueltos que estarán contenidos en el agua producida que alimentará las plantas de tratamiento. Si el sulfuro de hidrógeno está presente en el fluido del yacimiento o si existen las bacterias sulfato reductoras es muy posible que se presenten problemas de formación de depósitos debido a que el sulfuro de hidrógeno es corrosivo, y normalmente provoca un aumento de sulfuro de hierro. Además el sulfuro de hidrógeno es sumamente tóxico si es inhalado, lo que dificulta de gran manera la operación y mantenimiento de equipos, sobre todo cuando los recipientes se deben abrir para realizar ajustes, por lo que se requiere que el personal use el equipo de protección respiratoria apropiada. También se debe considerar que el sulfuro de hierro (producto de la corrosión del sulfuro de hidrógeno) presenta un riesgo potencial de incendio ya que es propenso a auto-ignición cuando se expone al aire o a otras fuentes de oxígeno. Si el dióxido de carbono está presente en el fluido del yacimiento, también lo estará en el agua producida. El dióxido de carbono es corrosivo y puede provocar un aumento de  $\text{CaCO}_3$  con las consecuencias ya conocidas. Por otro lado la eliminación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  resulta en un aumento del pH, lo cual es una condición favorable para formación de depósitos.

## **1.2. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA**

Los métodos más comunes de disposición de agua son:

- Vertimiento y aspersión
- Confinación
- Reinyección

- Disposal
- Entrega del agua tratada a áreas de sostenibilidad energética
- Evaporación y
- Evaporación Mecánica

Una breve descripción de cada técnica se encuentra a continuación:

- a) Vertimiento y aspersión: consiste en llevar el agua extraída del subsuelo previamente tratada a alguna fuente hídrica, sea esta río y/o cuerpos de agua naturales. Según el decreto 3930 del 2010<sup>5</sup> la calidad del agua debe ser monitoreada, así mismo serán las autoridades ambientales competentes en el ámbito nacional quienes determinen punto de vertimiento y cantidad de fluido a verter. En términos generales los parámetros a medir son metales pesados, sustancias peligrosas, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBQO) y sólidos suspendidos totales (TSS).

En la Resolución 0631 del 2015<sup>6</sup> se establecen los valores límites máximos permisibles de vertimientos de las actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados), estos parámetros se describen en la tabla (2). Se incluirán los parámetros upstream y midstream. Ya que esta resolución diferencia lo que es perforación, producción y transporte de hidrocarburos. Como el caso de estudio es producción de agua y ya que esta agua se está tratando en una estación, para luego ser transportada a continuación se reportaran las cantidades máximas permisibles para estos casos.

---

<sup>5</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE , VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, DECRETO 3930 de Octubre 25 2010

<sup>6</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE , RESOLUCIÓN 0631, Marzo 15 de 2015

Tabla 2. Parámetros mínimos de vertimiento.

Referencia	Producción	Almacenamiento y Transporte
pH	6-9	
DBO5	60 mg/l O2	
DBQO	180 mg/l O2	
SST	50 mg/l	
SSED	1 mg/l	
Grasas y Aceites	15 mg/l	
Fenoles	0.2 mg/lt	
SAAM		
Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)	10 mg/lt	
Cloruros (Cl- )	1200 mg/lt	250 mg/lt
Sulfatos (SO4 2-	300 mg/lt	250 mg/lt
Sulfuros (S2- )	1 mg/lt	
Nitrógeno Total	10 mg/l	Análisis y Reporte
Cianuro Total	1 mg/l	
Arsénico (As	0.1 mg/lt	
Bario (Ba)		
Cadmio (Cd)	0.1 mg/lt	
Cromo (Cr)	0.5 mg/lt	
Plomo (Pb)	0.2 mg/lt	

Fuente Resolución 0631 de 2015

- b) Confinación: es reducir la producción de agua mediante separadores de fondo que pueden retener hasta la mitad del agua que se encuentra en el yacimiento.

- c) Disposal: la industria conoce esta alternativa con ese nombre en inglés. Consiste en reinyectar, pero no en los mismos campos de los que se extrae el agua, sino en otros, lo cual evita que las aguas de producción generen impacto en las superficiales.
- d) Reinyección: usar el agua producida en un campo para reinyectarla en ese mismo campo, pero a presión, para que suba la tasa diaria de recuperación del petróleo.

Según Paris de Ferrer <sup>7</sup> los parámetros involucrados en el proceso de inyección se describen en la tabla (3).

Tabla 3. Rangos de aplicabilidad de los parámetros involucrado en el proceso de inyección de agua

<b>Propiedad</b>	<b>Rango aplicable</b>
Saturación de agua (%)	0-75
Saturación de gas (%)	0-70
Saturación de aceite (%)	25-100
Gravedad API	>15
Viscosidad (cp)	0.2-200
Porosidad (%)	>7
Permeabilidad (md)	>10
Profundidad (pies)	200-10000
Presión (psi)	10000

Fuente Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos, 2001

<sup>7</sup> Paris de Ferrer, Magdalena. Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos. 2001

- e) Entrega del agua tratada a áreas de sostenibilidad energética: consiste en tratar el agua y enviarla a áreas especialmente dispuestas para recibirla y aprovechar hasta la última gota en cultivos, reforestación silvopastoril, ganadería e incluso estanques piscícolas. La clave está en la inversión en tratamiento que debe someterse el agua producida para que realmente el agua quede en condiciones de ser aprovechada.
  
- f) Evaporación: proceso en el cual se convierte de la forma líquida a vapor, depende de parámetros como: la humedad local, temperatura y viento. En términos generales climas secos favorecen este proceso.
  
- g) Evaporación mecánica consiste en atomizar el agua en partículas extremadamente pequeñas y luego la elevan durante cierto tiempo, la cual al entrar en contacto con una masa de aire cambia de fase y se evapora.

## 2. REGLAMENTACIÓN EN TÉRMINOS DE DISPOSICIÓN DE AGUA EN COLOMBIA

Las normas para la disposición de agua producida en zonas terrestres o marinas son emitidas por autoridades reguladoras gubernamentales. Estas reglamentaciones varían de país a país, así como las cantidades máximas permisibles del hidrocarburo en el agua, según lo indica K. Arnold<sup>8</sup>, en la tabla (4).

Tabla 4. Concentración de aceite máximo permisible en agua de producción

País	Máxima concentración de aceite (mg/l)
Ecuador, Colombia, Brasil	30 para todas las facilidades
Argentina, Venezuela	15 para nuevas facilidades
Malasia	30 para todas las facilidades
Nigeria, Angola, Camerún	50 para todas las facilidades
Mar del Norte, Australia	30 para todas las facilidades
Tailandia	50 para todas las facilidades

Fuente Surface Production Opeation.2008

Además de poner límites al contenido de aceite y a los demás componentes contaminantes, las agencias reguladoras generalmente especifican un método analítico para la determinación del contenido de éstos, ya que existen varios métodos analíticos para determinar estos contenidos, por lo tanto es necesario conocer los rangos de aplicación, la precisión y la exactitud de cada uno de estos métodos.

<sup>8</sup> K Arnold, M Stewart. Surface production Operations.2008

La disposición del agua producida en los arroyos y ríos de agua dulce en general está prohibida, salvo en casos muy limitados, como cuando el efluente es muy bajo en salinidad. Algunas salmueras de los campos de petróleo pueden matar a los peces y la vegetación de agua dulce. Las agencias reguladoras generalmente requieren que el agua producida en las operaciones en tierra, se disponga mediante inyección, aunque este proceso también tiene algunas limitadas excepciones. Además de regular la eliminación subterránea, las agencias gubernamentales también regulan el completamiento y la operación de la operación de los pozos de disposición.

En este capítulo se observará la reglamentación Colombiana en términos de agua, así como la estructura Colombiana del derecho ambiental. En la figura (1) se observa un resumen en forma gráfica de esta estructura según los sistemas integrados de gestión de Harving<sup>9</sup>:

Figura 1. Estructura Colombiana del Derecho ambiental



Fuente Sistemas Integrados de Gestión, 2014.

<sup>9</sup> Harving, Díaz Consuegra. Sistemas Integrados de Gestión, 2014, Bogotá. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Especialización en Producción de Hidrocarburos

Así mismo una breve descripción de cada parte de la estructura se encuentra a continuación:

De la constitución Nacional salen las leyes según indica Carolina Ortiz<sup>10</sup>, de tal forma que la LEY 23 de 1973<sup>11</sup> “concede facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de protección al medio ambiente”. De tal forma que en la constitución política Colombiana<sup>12</sup> aparecen los siguientes artículos:

Artículo 79: “es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”. Así mismo indica que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Adicionalmente la ley garantizara la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.

Artículo 80:”El Estado Deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones y exigir reparaciones de daños”.

Artículo 95: son deberes de la persona y del ciudadano proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.

La descripción de cada decreto y/o ley se indicarán en forma cronológica en la tabla (5).

---

<sup>10</sup> Ortiz Carolina, Identificación y Definición de la metodología de cálculo de los índices y variables involucrados en el cálculo de las tasas por uso del agua. 2006. Universidad Nacional de Colombia.

<sup>11</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Ley 23 de 1973. Diciembre 12 de 1973.

<sup>12</sup> PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Constitución Política de Colombia. 1991. Artículos 79, 80 y 95.

Tabla 5. Reglamentación Colombiana en términos de dispersión de agua

Fuente	Resumen
<p>DECRETO 2811 de 1974<sup>13</sup></p>	<p>Código Nacional de los recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente y disposiciones reglamentarias y complementarias. En el artículo 28 indica que para la ejecución de obras y dependiendo de sus características pueda generar un deterioro a los recursos naturales renovables o modificaciones notorias al paisaje debe obtener una licencia</p>
<p>DECRETO 1449 de 1977<sup>14</sup></p>	<p>Indica que los propietarios de predios están obligados a:</p> <p>No incorporar en las aguas cuerpos o sustancias sólidas, líquidos o gaseosas, tales como basuras, desechos, desperdicios o cualquier sustancia toxica, o lavar en ellas utensilios, empaques o envases que los contenga o hayan contenido.</p> <p>Aprovechar las agua con eficiencia y economía y</p> <p>Conservar en buen estado de limpieza los cauces y depósitos de aguas naturales o artificiales que existan en sus predios, controlar los residuos de fertilizantes, con el fin de mantener el flujo normal de las aguas y evitar el crecimiento excesivo de la flora acuática entre otros.</p>
<p>DECRETO 1541 de 1978<sup>15</sup></p>	<p>Reglamenta las normas relacionadas con el recurso de agua en todos sus estados. Determina que el agua de uso público son: los ríos y todas las aguas que corren por cauces naturales, lagos, lagunas, ciénagas, pantanos, aguas que están en la atmosfera, lluvias, depósito de aguas subterráneas entre otros</p>

<sup>13</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, DECRETO 2811, Diciembre 18 de 1974, artículo 28.

<sup>14</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. DECRETO 1449 de Junio 27 de 1977, artículo 2.

<sup>15</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE AGRICULTURA, DECRETO 1541 de Julio 28 de 1978.

Tabla 5. (Continuación)

Fuente	Resumen
LEY 1979 <sup>16</sup>	Código sanitario Nacional y disposiciones reglamentarias y complementarias, en la cual se encuentran las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias. Así como establecer los procedimientos y medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que pueden afectar las condiciones sanitarias ambientales.
DECRETO 1594 de 1984 <sup>17</sup>	Establece las normas de vertimiento y criterios de calidad del recurso. Reglamenta la prevención y control de contaminación del agua.
LEY 99 de 1993 <sup>18</sup>	El ministerio del medio ambiente (MMA), reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones.
DECRETO 3100 del 2003 <sup>19</sup>	Reglamenta la tasa retributiva (productiva) por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales. Es decir se cobra por cada kilogramo de sustancia contaminante vertida en el recurso

<sup>16</sup> CONGRESO DE COLOMBIA, LEY 9 de Enero 24 de 1979.

<sup>17</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, Op.cit.

<sup>18</sup> CONGRESO DE COLOMBIA, LEY 99 de Diciembre 22 de 1993.

<sup>19</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, DECRETO 3100 de Octubre 30 del 2003, CAPITULO II

Tabla 5. (Continuación)

Fuente	Resumen
DECRETO 155 de 2004 <sup>20</sup>	Se reglamentan las tasas por utilización de agua y se adoptan disposiciones. El recurso hídrico contempla aguas superficiales, desembocaduras del río en el mar, agua submarinas y acuíferos litorales.
DECRETO 3930 de 2010 <sup>21</sup>	Ajusta el proceso de otorgamiento previsto en el decreto 1594. Reglamenta respecto al recurso hídrico lo siguiente: usos, ordenamiento y vertimientos. Respecto al vertimiento especifica respecto al recurso hídrico, suelo y alcantarillado. Así mismo incluye dentro del uso industrial los hidrocarburos ya que anteriormente era minería

Fuente Decretos 2811 de 1974, 1449 de 1977, 1541 de 1978, 1594 de 1984, 3100 del 2003, 155 de 2004. Así como de las leyes: 9 de 1979 y 99 de 1993.

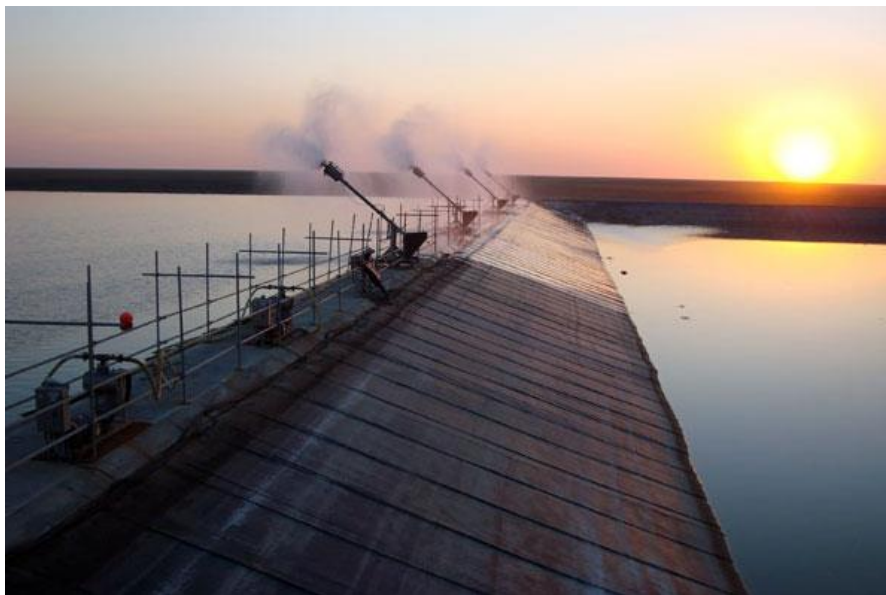
<sup>20</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, DECRETO 155 de Enero 26 de 2004, artículos 1 al 3.

<sup>21</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, Op.cit

### 3. EVAPORACIÓN MECÁNICA COMO MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE AGUA

Según Carlos Rojas en la revista Petroleum del 2013 <sup>22</sup> este método ha sido utilizado en Estados Unidos (Texas, California, Utah, Montana, Arizona, Alaska), Canadá, Kazakstán, Finlandia, Portugal España, Malasia, México, Egipto y Australia. La evaporación mecánica permite disponer del agua en el lugar de la generación, pero a diferencia de la evaporación térmica no requiere de generación de calor. La aplicación de esta tecnología, consiste en atomizar el agua en la atmósfera circundante, mediante el uso de equipos de última tecnología denominados Evaporadores Mecánicos<sup>23</sup> como se ilustran en la figura (2), logrando una eficiencia hasta 14 veces mayor que la eficiencia de la evaporación natural del agua a temperatura ambiente.

Figura 2. Evaporadores mecánicos



Fuente [www.telemet.com](http://www.telemet.com)

<sup>22</sup> Rojas Carlos, Borja Hubert. Evaporación Mecánica de Agua Producida. Una solución efectiva. Revista Petroleum 2013, paginas 32-33

<sup>23</sup> [www.telemet.com/es/evaporador-420b-de-sm/](http://www.telemet.com/es/evaporador-420b-de-sm/) . Telemet Efficiency Through Simplicity

El proceso de evaporación ocurre gracias a la capacidad del evaporador para atomizar el agua en millones gotas en tamaños pequeños del orden de micrómetros.

Dentro de los casos históricos solo hay uno documentado públicamente que corresponde a una planta de gas “Gamil” ubicada en la costa este de Egipto<sup>24</sup>. Esta planta está ubicada en tierra pero su objetivo es tratar la producción de los pozos de gas y condensado costa afuera. La producción promedio del área eran 500 metros cúbicos de agua, pero la [producción de agua se incrementó de 500 que era la capacidad de la planta hasta 3000 metros cúbicos por día. Debido a que esta planta está en tierra este exceso de agua debía ser transportado en carrotanques para ser tratada en otro lugar, lo que incrementaba los riesgos de accidentes, costos número de tractomulas, etc. Desafortunadamente este documento no muestra los resultados del piloto, pero sugiere que parámetros fueron los que más afectaron el proceso en sí. Parámetros que serán descritos y explicados en la teoría de la evaporación que se describirá a continuación.

### **3.1. TEORÍA DE EVAPORACIÓN**

A continuación se llevará a cabo el modelo matemático del proceso de evaporación<sup>25</sup>.

El proceso de caída de una gota de agua atomizada, se puede entender como un proceso de sedimentación de una partícula a través de un medio viscoso y por lo tanto se puede evaluar con el número de Reynolds (Re). Para números de

---

<sup>24</sup> Hamed Wael, Ibrahim Shaban. Moving Towards Innovative Waste Water Treatment and Disposal technologies: Field Study for In Situ Waste Water Treatment and Evaporation Technology. SPE 164672. 2013. Cairo

<sup>25</sup> H.J, Holterman. Kinetics and evaporation of water drops in air.2003. Wageningen UR,

Reynolds bajos (flujos de baja velocidad relativa), el flujo del fluido alrededor del objeto es laminar: consiste en láminas imaginarias de fluido que fluyen suavemente alrededor del objeto a distintas velocidades. Una perturbación accidental en el campo de flujo disminuirá y desaparecerá en el flujo laminar. La resistencia o “fuerza de arrastre” está determinada por la fricción entre estas capas de fluido.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que permite caracterizar la naturaleza de un fluido, es decir si este es laminar o turbulento y se expresa matemáticamente mediante la siguiente relación:

$$R_e = \frac{DV}{\nu} \quad (1)$$

En donde:

- $D$ : Diámetro de la gota (m)
- $V$ : velocidad de la gota relativa al aire (m/s)
- $\nu$ : viscosidad cinemática al aire (m<sup>2</sup>/s)

Ya que esta técnica se basa en diámetros de partículas, se está hablando entonces de objetos esféricos, y para describir su fuerza de arrastre se utiliza la ley de Stokes, esta depende de la viscosidad del aire, el tamaño de la gota y la velocidad relativa del aire con respecto a la gota. Para un régimen laminar se cumple la siguiente relación:

$$V_{s,St} = \frac{\rho_d * g * D^2}{18 * \nu^2} \quad (2)$$

En donde:

$\rho_d$ : densidad de la gota

$g$ : gravedad

A medida que la velocidad de la gota aumenta por la ecuación de Reynolds este número también aumenta y llegara un momento en donde el flujo ya no será laminar sino turbulento y en este momento no se podrá aplicar la ley de Stokes, por lo tanto se hace necesario introducir lo que se denominara el coeficiente de arrastre:

$$C_d = \left( \left( \frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad (3)$$

En donde:

$a$ : tiene un valor de 24,

$b$ : tiene un valor de 0.32

$c$ : tiene un valor de 0.52

Esta relación es válida cuando Reynolds varía entre 0.25 y 1000. Para lo cual la velocidad de sedimentación es:

$$V_S = \sqrt{\frac{4 * \rho_d * g * D}{3 * \rho_a * C_d}} \quad (4)$$

En donde:

$\rho_a$ : Densidad del aire.

Estos valores se pueden encontrar en la tabla (6) y figura (3)

Tabla 6. Relación Velocidad de sedimentación y Diámetro de la gota

<b>Diámetro de la gota (D)</b>	<b>Velocidad de sedimentación según Stokes (vs,St)</b>	<b>Velocidad de sedimentación (vs)</b>
[ $\mu\text{m}$ ]	[m/s]	[m/s]
0	0	0
10	0.00302	0.003
20	0.0121	0.0118
30	0.0272	0.026
40	0.0483	0.0452
50	0.0755	0.0689
60	0.109	0.0965
70	0.148	0.128
75	0.17	0.144
80	0.193	0.162
90	0.245	0.198
100	0.302	0.237
150	0.68	0.455
200	1.21	0.692
250	1.89	0.935
300	2.72	1.18
400	4.83	1.64

Tabla 6. (Continuación)

<b>Diámetro de la gota (D)</b>	<b>Velocidad de sedimentación según Stokes (vs,St)</b>	<b>Velocidad de sedimentación (vs)</b>
[ $\mu\text{m}$ ]	[m/s]	[m/s]
500	7.55	2.07
750	17	3.05
1000	30.2	3.89

Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Los datos de la tabla anterior son graficados en los cuales las velocidades de sedimentación según Stokes se representan con la línea roja y con color verde las velocidades de sedimentación incluyendo el coeficiente de arrastre. Como se indica en la figura (3)

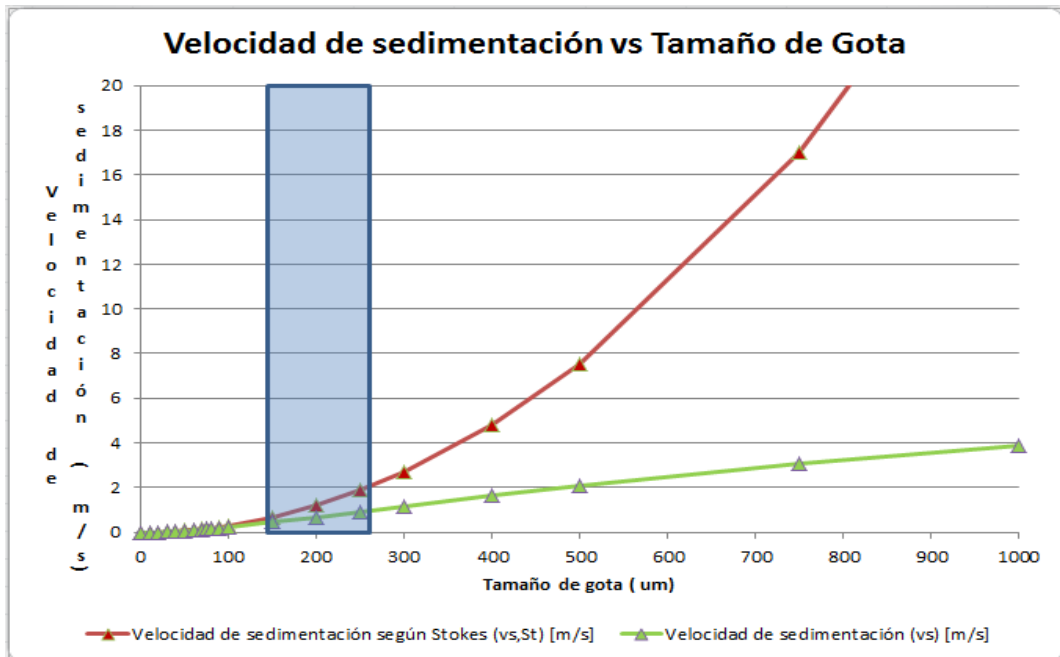
Los puntos a resaltar de esta grafica son:

- Diámetros mayores a 50  $\mu\text{m}$  no es aplicable la ley de Stokes
- Rango de trabajo de la evaporación mecánica (150  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$ , cuadro azul),
- La velocidad de sedimentación de las gotas está entre 0,68 y 1,89 m/s aproximadamente, de acuerdo al modelo empírico ajustado a un flujo turbulento.

Usualmente se considera como regla general, que las gotas que tienen una velocidad de sedimentación menor al 10% de la velocidad promedio del viento en la zona son propensas a sufrir el fenómeno de deriva (consideración que servirá para evaluar el impacto ambiental del proceso más adelante). De acuerdo a la

figura anterior se puede inferir que la velocidad máxima del viento a la que se puede realizar el proceso de aspersión mecánica sin que se presente una deriva significativa es de aproximadamente 8 m/s, pues un 10% serán 0,8 m/s, la cual es la velocidad de sedimentación límite que el proceso puede considerar, teniendo en cuenta que el tamaño de partícula máximo promedio es de aproximadamente 250  $\mu\text{m}$ .

Figura 3. Relación entre velocidad de sedimentación y tamaño de gota.



Fuente Elaboración propia tomada de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Cuando el agua impulsada impacta con el alabe del rotor, la energía generada en el choque inelástico proyecta la gota atomizada permitiéndole viajar cierta distancia horizontal con una velocidad determinada, hasta su detención inminente debido a la fricción ejercida por el aire. Esta distancia se conoce como la distancia de frenado. Para evaluar la distancia horizontal máxima que podría viajar una gota

de agua atomizada (sin la acción ejercida por el viento en la zona), se considera que la gota sale impulsada horizontalmente del alabe con una velocidad inicial  $v_0$  y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_e = V_0 * \tau_{avg} \quad (5)$$

En donde:

$V_0$ : Velocidad inicial

$\tau_{avg}$ : Tiempo de relajación promedio de la gota

Expresando este tiempo en términos de la velocidad de sedimentación se obtiene la siguiente relación:

$$\tau_{avg} = \frac{V_s}{g} \quad (6)$$

Con la relación anterior se puede determinar que teniendo un tamaño de gota de 500  $\mu\text{m}$  la distancia de frenado y una velocidad del alabe de 20 m/s la distancia de frenado será de 4.22 metros, como se indica en la siguiente tabla (7) y figura (4), esta distancia indica el radio del área de evaporación.

Tabla 7. Distancia de frenado en función del tamaño de gota.

Diámetro de la gota (D)	Tiempo promedio de la gota (Tavg)	Velocidad de frenado (m)		
		Se (ft/s)	Se (ft/s)	Se (ft/s)
[ $\mu\text{m}$ ]	S	5	10	20
0				
10	0.0003	0.0015	0.0031	0.0061
20	0.0012	0.0060	0.0120	0.0241
30	0.0027	0.0133	0.0265	0.0530
40	0.0046	0.0230	0.0461	0.0922
50	0.0070	0.0351	0.0702	0.1405
60	0.0098	0.0492	0.0984	0.1967
70	0.0130	0.0652	0.1305	0.2610
75	0.0147	0.0734	0.1468	0.2936
80	0.0165	0.0826	0.1651	0.3303
90	0.0202	0.1009	0.2018	0.4037
100	0.0242	0.1208	0.2416	0.4832
150	0.0464	0.2319	0.4638	0.9276
200	0.0705	0.3527	0.7054	1.4108
250	0.0953	0.4766	0.9531	1.9062
300	0.1203	0.6014	1.2029	2.4057
400	0.1672	0.8359	1.6718	3.3435
500	0.2110	1.0550	2.1101	4.2202
750	0.3109	1.5545	3.1091	6.2181
1000	0.3965	1.9827	3.9653	7.9307

Fuente: Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

La tasa de evaporación se calcula mediante la siguiente relación:

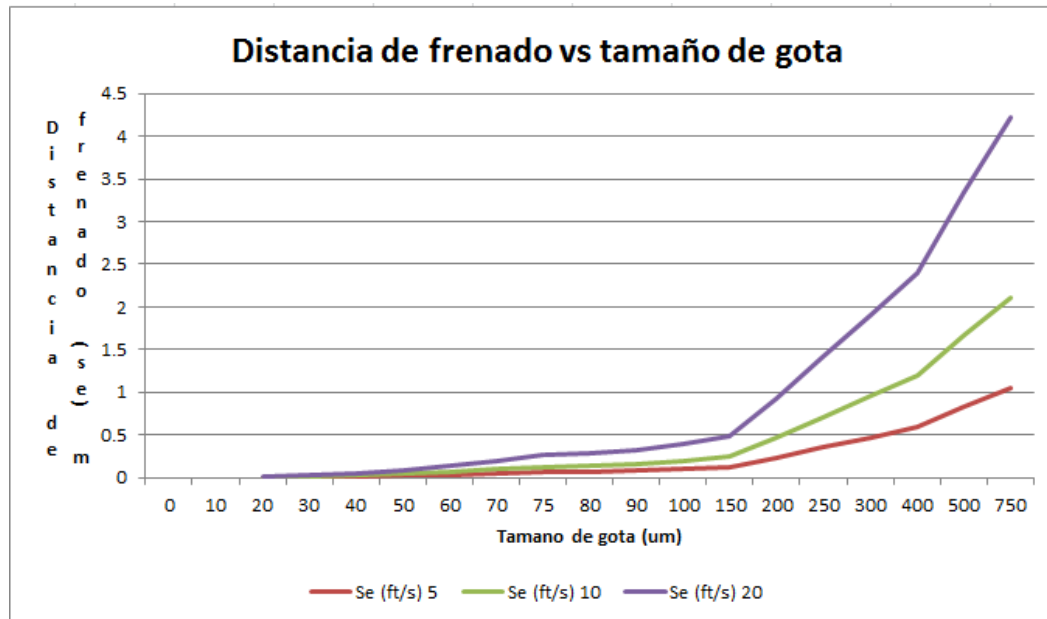
$$K = 2 * a * (1 + (b * \sqrt{D * v})) \quad (7)$$

En donde  $a$  y  $b$  se expresan de la siguiente forma:

$$a = \frac{4 * M_l * D_{v,f} * \Delta P}{\rho_d * R * T_f} \quad (8)$$

$$b = 0.276 \left( \frac{\rho_a}{\mu_{a,f} * D^2} \right)^{1/6} \quad (9)$$

Figura 4. Distancia de frenado en función del tamaño de gota.



Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

En donde:

$M_l$  : Peso molecular del agua (0,018Kg/mol)

$D_{v,f}$  : Coeficiente de difusividad: Coeficiente de difusión promedio de las moléculas de vapor en la película saturada alrededor de la gota

$\Delta P$ : Diferencia entre la presión de vapor cerca a la gota y la presión de vapor en la atmósfera

$R$ : Constante de los gases (8,1344 J/mol K)

$T_f$ : Temperatura absoluta en la película saturada que recubre la gota

$\rho_a$ : Densidad del aire a la temperatura  $T_f$

$\mu_{a,f}$ : Viscosidad del aire a la temperatura  $T_f$

Determinando la tasa de evaporación, su efecto con la humedad relativa y el delta de temperatura se obtiene la siguiente relación, que básicamente se traduce en que a mayor tamaño de gota, más delta de temperatura luego más tasa de evaporación.

Los valores intermedios para calcular la tasa de evaporación se describen a continuación:

La variable depende de la difusividad la cual se puede hallar por medio de la siguiente relación:

$$D_v = 21.2 \times 10^{-6} * (1 + 0.0071 * T) \quad (10)$$

La densidad del agua se puede expresar con la siguiente relación:

$$\rho_d = 1000 - 0.0067 * (T - 3.98)^2 + 0.00000052 * (T - 3.98)^4 \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la diferencia de presión es la presión de saturación menos la presión, la presión de saturación se puede hallar por medio de la siguiente relación:

$$P_{sat} = 610.7 * 10^{\left(7.5 * \frac{T}{T+237.3}\right)} \quad (12)$$

La presión se determina de la siguiente relación:

$$P = P_{sat} - v(T_d - T_w) \quad (13)$$

En donde la constante ( $v$ ) depende de la presión atmosférica y la temperatura bulbo.

En estudios realizados se ha encontrado que la temperatura húmeda bulbo a varias humedades relativas esta dado generalmente por:

$$T_w = T - 5 \quad (14)$$

Estos cálculos intermedios se encuentran en la tabla (8).

Tabla 8. Cálculos intermedios tasa de evaporación.

Temperatura	Coeficiente de difusividad	Densidad del agua	Viscosidad del aire	Temperatura húmeda	Constante	Presión de saturación
$T$	$D_v$	$\rho_d$	$\mu_a$	$T_w$	$\nu$	$P_{sat}$
( °C )	( $10^6$ m <sup>2</sup> /s)	(kg/m <sup>3</sup> )	( $10^6$ Pa*s)	( °C )	Pa/k	(Pa)
0	21.20	999.89	17.70		66.87	610.70
5	21.95	999.99	18.03	0	66.87	872.16
10	22.71	999.76	18.33	5	67.25	1227.73
15	23.46	999.19	18.62	10	67.64	1705.01
20	24.21	998.31	18.88	15	68.02	2337.79
25	24.96	997.14	19.13	20	68.41	3167.07
30	25.72	995.70	19.35	25	68.79	4242.08
35	26.47	994.03	19.56	30	69.18	5621.32
40	27.22	992.18	19.74	35	69.56	7373.76
45	27.97	990.20	19.91	40	69.95	9579.98
50	28.73	988.14	20.05	45	70.33	12333.43

Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Los siguientes valores fueron tenidos en cuenta para poder completar el caudal de evaporación:

$T_d$  es  $15\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 288\text{ }^\circ\text{K}$

$b$  es una constante: que es  $6.798 \times 10^{-5}$

y el valor  $a$  depende de la diferencia de temperaturas como se indica en la tabla (9)

Tabla 9. Valores de “*a*” según la diferencia de temperaturas.

Valor de <i>a</i>	$\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = \Delta 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = \Delta 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
	48.8	244	488

Con los datos obtenidos se hallaran los cálculos para una temperatura ambiente de 15 grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), tal como se reporta en la tabla (10) como en la figura (5).

Tabla 10. Relación Tasas de evaporación y diámetro de la gota.

Diámetro de la gota (D)	Velocidad de sedimentación (vs)	Tasa de evaporación ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ )		
		$k(\Delta 1\text{ }^{\circ}\text{C})$	$k(\Delta 5\text{ }^{\circ}\text{C})$	$k(\Delta 10\text{ }^{\circ}\text{C})$
[ $\mu\text{m}$ ]	[m/s]			
0	0			
10	0.003	98.75	493.77	987.54
20	0.012	100.82	504.12	1008.24
30	0.026	103.46	517.28	1034.55
40	0.045	106.51	532.56	1065.11
50	0.069	109.90	549.49	1098.98
60	0.097	113.54	567.71	1135.42
70	0.128	117.43	587.15	1174.30
75	0.144	119.37	596.85	1193.70
80	0.162	121.45	607.24	1214.47
90	0.198	125.56	627.81	1255.62
100	0.237	129.85	649.23	1298.46
150	0.455	152.32	761.58	1523.16
200	0.692	175.51	877.57	1755.15

Tabla 10. (Continuación)

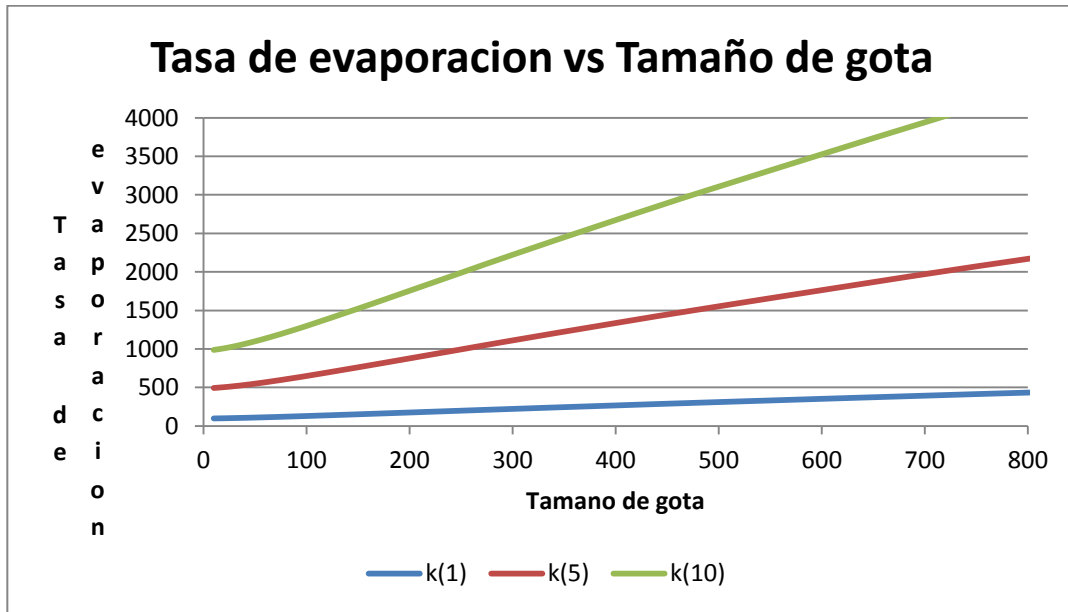
Diámetro de la gota (D)	Velocidad de sedimentación (vs)	Tasa de evaporación (um <sup>2</sup> /s)		
		k(Δ1 °C)	k(Δ5 °C)	k(Δ10 °C)
[μm]	[m/s]			
250	0.935	198.86	994.28	1988.55
300	1.180	222.21	1111.03	2222.06
400	1.640	267.22	1336.11	2672.22
500	2.070	310.66	1553.29	3106.58
750	3.050	414.34	2071.70	4143.41
1000	3.890	510.64	2553.22	5106.44

Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops. 2003

Según el IDEAM las temperaturas en Colombia varían entre 15 °C y 40 °C, así como las humedades relativas varían entre 65-85 % no están incluidas las zonas selváticas que varían entre 85-95%.

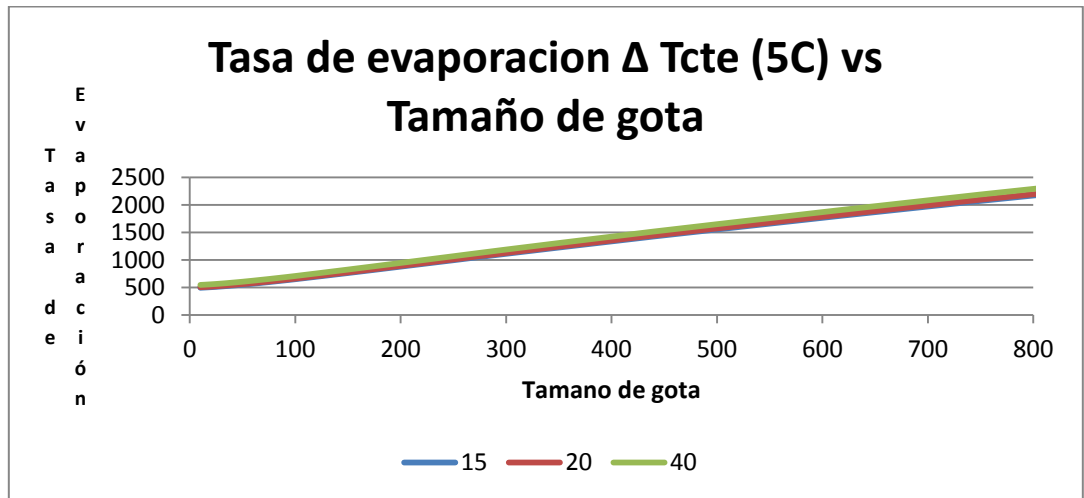
Por lo tanto se realizarán los cálculos a estos dos valores de referencia y un valor intermedio como 20 °C, en los cuales se podrá observar que la tasa de evaporación no depende de la temperatura ambiente, siempre y cuando la humedad relativa no sea del 100 % tal como se indica en la tabla (11) y figura (6).

Figura 5. Tasa de evaporación vs diámetro de la gota.



Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Figura 6. Tasa de evaporación a distintas temperaturas ambientes con Delta temperatura constante de 5 grados centígrados.



Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Tabla 11. Tasa de evaporación a distintas temperaturas ambientes con Delta temperatura constante de 5 grados Centígrados.

Temperatura ambiente ( C )		20			40		
Diámetro de la gota (D)	Velocidad de sedimentación (vs)	Tasa de evaporación ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ ) K			Tasa de evaporación ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ ) K		
[ $\mu\text{m}$ ]	[m/s]	$\Delta 1^\circ\text{C}$	$\Delta 5^\circ\text{C}$	$\Delta 10^\circ\text{C}$	$\Delta 1^\circ\text{C}$	$\Delta 5^\circ\text{C}$	$\Delta 10^\circ\text{C}$
0	0						
10	0.003	100.83	504.13	1008.26	109.13	545.66	1091.31
20	0.0118	102.91	514.56	1029.12	111.29	556.43	1112.86
30	0.026	105.56	527.82	1055.65	114.02	570.12	1140.25
40	0.0452	108.64	543.22	1086.45	117.21	586.03	1172.06
50	0.0689	112.06	560.29	1120.59	120.73	603.66	1207.31
60	0.0965	115.73	578.65	1157.31	124.52	622.62	1245.24
70	0.128	119.65	598.25	1196.50	128.57	642.85	1285.70
75	0.144	121.61	608.03	1216.05	130.59	652.95	1305.90
80	0.162	123.70	618.49	1236.99	132.75	663.76	1327.52
90	0.198	127.85	639.23	1278.47	137.04	685.18	1370.35
100	0.237	132.16	660.82	1321.64	141.49	707.47	1414.94
150	0.455	154.81	774.06	1548.13	164.88	824.42	1648.83
200	0.692	178.19	890.97	1781.95	189.03	945.15	1890.29
250	0.935	201.72	1008.60	2017.20	213.32	1066.62	2133.24
300	1.18	225.26	1126.28	2252.56	237.63	1188.15	2376.29
400	1.64	270.63	1353.14	2706.29	284.49	1422.43	2844.85
500	2.07	314.41	1572.04	3144.08	329.70	1648.48	3296.96
750	3.05	418.91	2094.56	4189.12	437.62	2188.08	4376.17
1000	3.89	515.98	2579.89	5159.77	537.86	2689.28	5378.56

Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Usualmente las gotas producidas por el sistema de evaporación mecánica, salen a una alta velocidad y esta se reduce debido a la fricción con el aire, llegando a su velocidad de sedimentación. En el proceso de evaporación de una gota se deben considerar dos etapas de tiempo:

- Primero, cuando una gota nueva se libera al aire, el proceso de evaporación comienza de inmediato, la gota se enfriará gradualmente hasta que alcance su temperatura de bulbo húmedo y
- Después, si la gota permanece en su temperatura de bulbo húmedo, esta continuará disminuyendo su tamaño mediante una evaporación estable, hasta desaparecer cuando toda el agua se haya evaporado, la evaporación no es un proceso estable, debido a que el tamaño y la tasa de evaporación cambian continuamente.

Para conocer el tiempo de vida de una gota al evaporarse se asume que el periodo transitorio de enfriamiento puede ser obviado con respecto al tiempo de vida total de la gota. De esta manera, el tiempo de vida de una gota se puede inferir mediante la siguiente ecuación:

$$t_{life} = \frac{D_o^2}{q_o * \Delta T} \quad (15)$$

Donde:

$D_o$ : Diámetro inicial de la gota

$\Delta T$ : ( $T_{ambiente} - T_{bulbo\ húmedo}$ ) y

$q_o$ : es una variable que se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$q_o = \frac{2*a*(1+b*s_o)}{\Delta T} \quad (16)$$

Y so es una constante empírica con un valor de  $-1,117 \times 10^{-3} \text{ m}^* \text{ s}^{-0,5}$

El valor de tiempo de vida de una gota se utilizará posteriormente para definir el tamaño de partícula idóneo, para realizar el proceso de evaporación mecánica sin que se presente el fenómeno de la deriva.

Asumiendo que la gota recorrerá una distancia de 10 metros, y sabiendo que la velocidad es la distancia sobre el tiempo, siendo el tiempo promedio de la gota el hallado en la tabla 6. Reorganizando la data y calculando la vida promedio de la gota, se encuentran los datos reportados en la tabla (12) y figura (7):

Tabla 12. Tiempo de vida y de vuelo de las gotas según su el tamaño de la gota.

<b>Diámetro</b>	<b>Tiempo promedio de la gota (Tavg)</b>	<b>Tiempo vida (Tlife)</b>	<b>Tiempo promedio asumiendo un distancia de 10 metros</b>
[ $\mu\text{m}$ ]	[s]	[s]	
10	0.00031	0.22	3333.33
20	0.00120	0.89	847.46
30	0.00265	2.00	384.62
40	0.00461	3.55	221.24
50	0.00702	5.54	145.14
60	0.00984	7.98	103.63
70	0.01305	10.86	78.13
75	0.01468	12.47	69.44

Tabla 12. Continuación

<b>Diámetro</b>	<b>Tiempo promedio de la gota (Tavg)</b>	<b>Tiempo vida (Tlife)</b>	<b>Tiempo promedio asumiendo un distancia de 10 metros</b>
[ $\mu\text{m}$ ]	[s]	[s]	
80	0.01651	14.19	61.73
90	0.02018	17.96	50.51
100	0.02416	22.17	42.19
150	0.04638	49.88	21.98
200	0.07054	88.68	14.45
250	0.09531	138.57	10.70
300	0.12029	199.54	8.47
400	0.16718	354.73	6.10
500	0.21101	554.27	4.83
750	0.31091	1247.10	3.28
1000	0.39653	2217.06	2.57

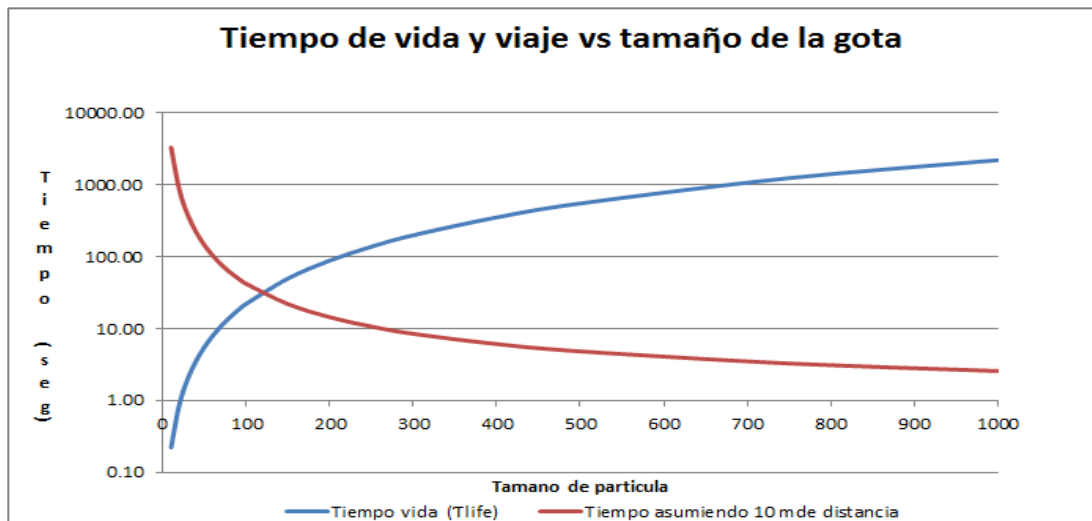
Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

Puntos a resaltar de la siguiente figura (7):

- Una gota pequeña (10-100  $\mu\text{m}$ ) tiene una corta distancia de frenado de la tabla 6 a una velocidad de 20 ft/s varía entre 0.006 y 0.48 ft y así mismo una velocidad de sedimentación pequeña (tabla 5) varía entre 0.003 y 0.237 m/s. Por lo tanto la trayectoria de una de estas gotas pasara rápidamente de la dirección vertical a horizontal en un proceso controlado por la velocidad y dirección del viento.

- Para una gota entre 200-500  $\mu\text{m}$  que tiene una distancia de frenado más grande (1.41-4.22 ft) y una velocidad de sedimentación relativamente alta (0.69-2.07 m/s), tendrá una trayectoria vertical ascendente y descendente sin mucho desplazamiento horizontal por la acción del viento.
- Para tamaños de gotas entre 150 y 250  $\mu\text{m}$ , los tiempos de evaporación oscilan entre 3 y 8 segundos, y los tiempos de vuelo varían entre 5 y 10 segundos. Por lo tanto los tamaños de partícula idóneos para realizar el proceso de evaporación mecánica están entre los 150 y 250  $\mu\text{m}$ .

Figura 7. Tiempo de vida y de vuelo de las gotas según su el tamaño de la gota.



Fuente Modificado de H.J. Holterman. Kinetics and evaporation of water drops.2003

## 4. EVAPORACIÓN MECÁNICA PARA UN CAMPO PETROLERO COLOMBIANO

### 4.1. DISEÑO DE EVAPORACIÓN MECÁNICA PARA UN CAMPO PETROLERO COLOMBIANO.

El proyecto piloto de Aspersión Mecánica usando la técnica de la Evaporación Mecánica, se diseña para disponer un volumen de 3000 barriles de agua asociada a la producción por día previamente tratada cumpliendo la norma establecida en el decreto 3930 de 2010.

El sistema consiste en seis unidades (evaporadores) dispuestas en piscinas de proceso, que permitan flotar para aspersar el agua. El promedio de evaporación por unidad fue estimado en un mínimo de 550 bbls por día incluyendo de esta forma una capacidad adicional para condiciones climáticas adversa como lluvia, bajas velocidades de viento y humedades relativas mayores al 80%, asumiendo un factor de diseño del 75%, así mismo se estima un consumo de energía, todos estos valores se expresan en la tabla (13).

Tabla 13. Consideraciones de diseño para evaporar 3000 barriles de agua por día

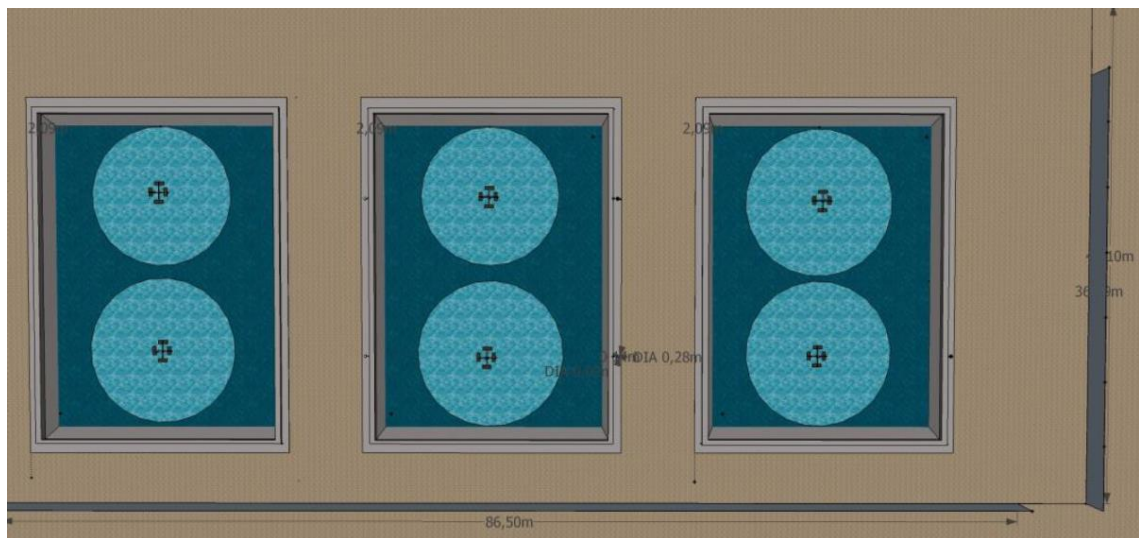
Mes	Caudal de evaporación por unidad (BWPD)	Número de Unidades	Consumo de Energía (KW/Día)
Enero	1197	3	51
Febrero	1329	3	56
Marzo	1126	3	48
Abril	768	4	44

Tabla 14. ( Continuacion)

Mes	Caudal de evaporación por unidad (BWPD)	Número de Unidades	Consumo de Energía (KW/Día)
Mayo	619	5	44
Junio	552	6	47
Julio	543	6	46
Agosto	661	5	47
Septiembre	755	4	43
Octubre	732	5	52
Noviembre	710	5	50
Diciembre	889	4	50

Fuente modificada de datos de campo

Figura 8. Distribución y Espaciamiento estimado para el sistema de evaporación mecánica



Fuente Piloto de Campo

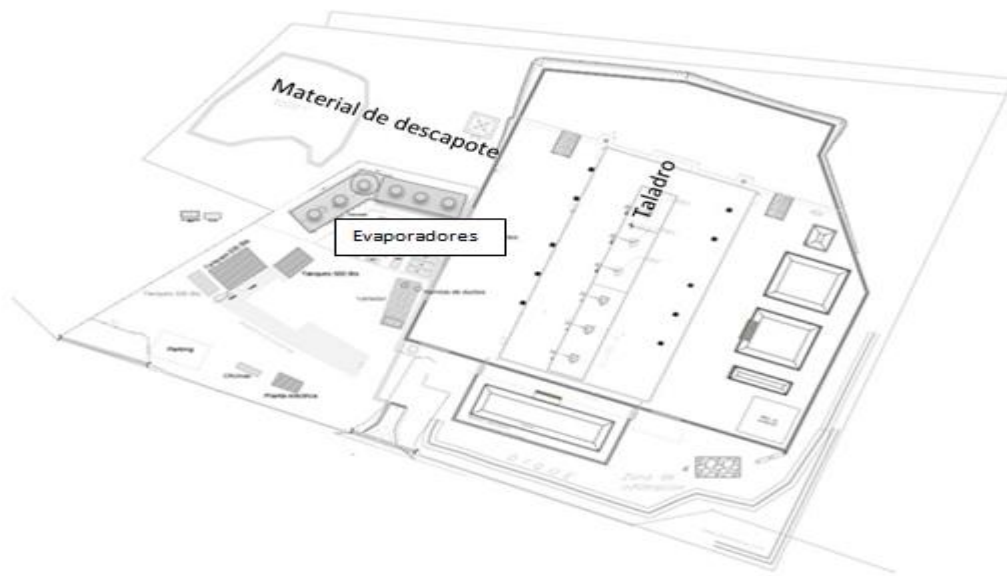
La piscina actual tiene una dimensión de 700 metros cuadrados, generando un espaciado de menos de 120 metros cuadrados entre evaporadores, ver distribución en la figura (9).

El proceso está completamente controlado y automatizado mediante una cabina de control dotada de una estación meteorológica que mide en tiempo real la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa del aire.

Los equipos instalados y el sistema de control de proceso operan mecánica y eléctricamente en forma correcta. Se empieza a aspersar agua modulando el caudal de los equipos de evaporación individualmente y en conjunto.

Así mismo las unidades suministradas generaran un tamaño de partícula de 150 micrones aproximadamente.

Figura 9. Distribución en Plataforma

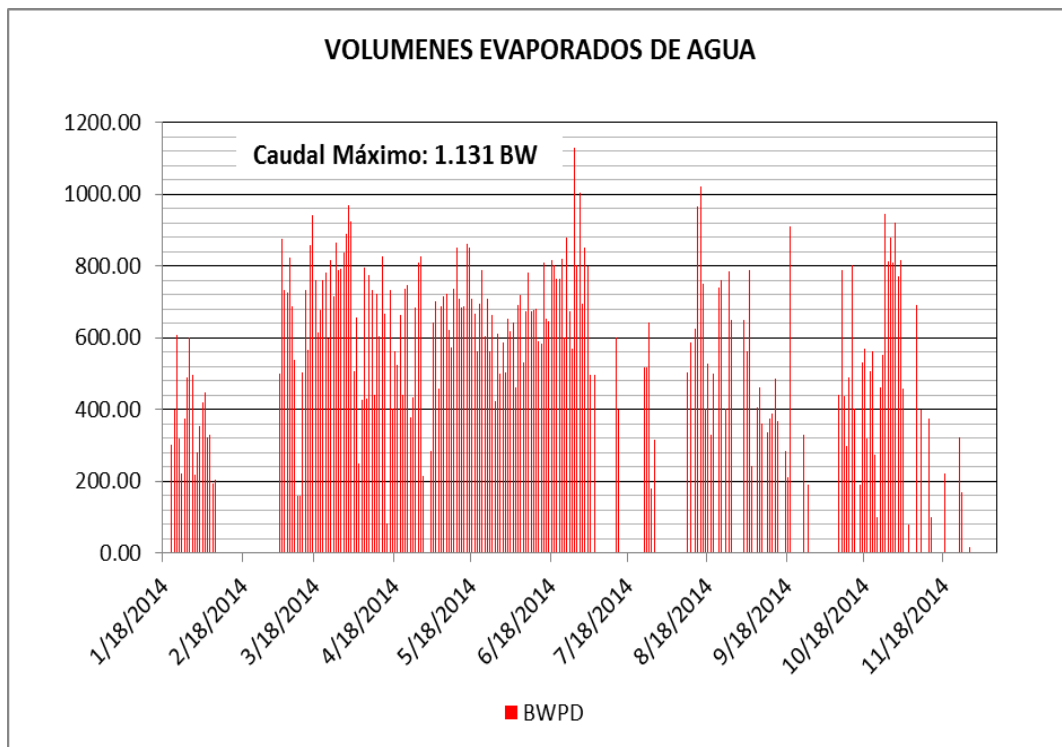


Fuente Piloto de Campo

## 4.2. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Una vez iniciado el proceso de comisionamiento y pruebas el 21 de enero de 2014, se procede con diferentes modos de operación de los evaporadores; finalizando el 28 de Noviembre de 2014, como se indica en la figura (10).

Figura 10. Volúmenes evaporados en el piloto



Fuente Modificada de data de Piloto de Campo

De acuerdo a estos volúmenes se lograron tasas máximas de hasta 1.131 Barriles de agua por día.

Durante el primer periodo comprendido entre el mes de Marzo y Abril, los desempeños obtenidos resultaron bajos teniendo en cuenta los volúmenes totales

evaporados en las 24 horas del día, oscilando entre 250 bbls por días hasta 600 bbls por día.

Del análisis de la información se deduce que el proceso de incremento de la humedad dentro del área afectó de forma directa la eficiencia de los evaporadores.

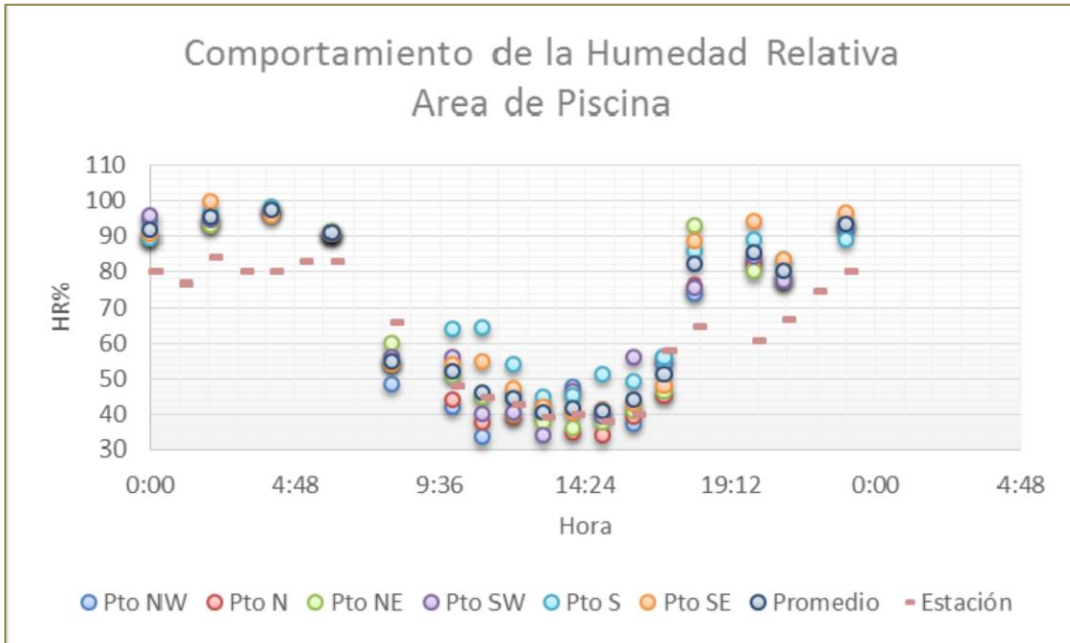
Así mismo en la figura 11 se muestra el comportamiento de la humedad relativa dentro del área de la piscina. De acuerdo con ésta, el número de horas en donde se presenta la saturación es elevado, representando un promedio de 10 horas, diarias que significa más del 40 % del tiempo disponible en donde la evaporación corresponde al valor mínimo logrado.

La humedad relativa es el factor que afecta de manera importante el proceso de la evaporación por aspersion. El factor de afectación es de una reducción del 7,5% por cada unidad de porcentaje de la humedad del aire

En la figura 11 se muestra el comportamiento de la tasa de evaporación versus la humedad relativa a diferentes temperaturas, las condiciones actuales del proceso teniendo en cuenta la tabla (14) indican que la humedad relativa promedio está en aproximadamente 80% con una temperatura promedio de 80 ° F, lo cual indica que la tasa de evaporación día está en el orden de 1160 bbl aproximadamente.

El comportamiento del sistema actualmente, está afectado principalmente por el proceso de saturación del aire dentro del área de proceso, sin embargo en mediciones de tasa instantánea se han logrado volúmenes proyectados de hasta 900 bbls por día, los cuales se ven afectados negativamente por el efecto de la saturación del aire disponible en la piscina de proceso.

Figura 11. Comportamiento Humedad Relativa en el campo



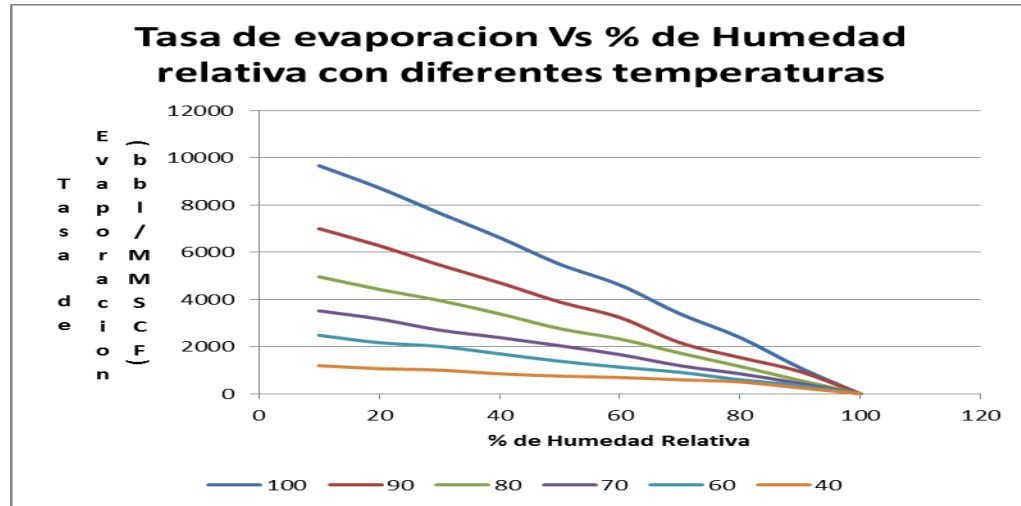
Fuente Modificada de Piloto de Campo

Dado las variables anteriores en la tabla (14) se resume el comportamiento del sistema y muestra en forma detallada el registro de las variables de humedad relativa, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire que son las variables más importantes que afectan el proceso.

Adicionalmente se midió la eficiencia de las bombas, así mismo se hicieron comentarios generales a cada día, tal como se registra en la tabla (15).

Teniendo en cuenta el desarrollo matemático llevado a cabo en capítulos anteriores con un tamaño de gota de 150 micrómetros, se espera tener una velocidad de sedimentación de 0.45 mt/seg y considerando que las gotas que tienen una velocidad de sedimentación menor al 10% de la velocidad promedio del viento en la zona son propensas a sufrir el fenómeno de deriva. Se desean velocidades de viento mayores a 4.5 metros por segundo.

Figura 12. Comportamiento tasa de evaporación vs Porcentaje de humedad relativa a diferentes temperaturas (grados Fahrenheit)



Fuente Elaboración Propia tomada de Piloto de Campo

Tabla 15. Variables del proceso

día	periodo	Humedad Promedio %	Humedad ambiente (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Temperatura ( °C)	Volumen Evaporado (bbbl)	Tasa Instantánea (bbbl/día)
Enero 27	00 a 6							
	6 a 12							
	12 a 18							
	18-00	88	76	0 a 3	Este	24	89.38	119.2
Enero 28	00 a 6	94	81	0 a 3	Este	22	60	240
	6 a 12	48	38	0 a 6	Sur-Este	29	108	432
	12 a 18	44	47	6 a 15	Oeste	32	248	992
	18-00	86	71	0 a 4	Este	24	185	740
Enero 29	00 a 6	88	73	0 a 6	Este	24	63	252
	6 a 12	51	55	0 a 6	Nor- Este	28	118	472
	12 a 18	61	52	3 a10	Nor-Oeste	30	188	752
	18-00	86	67	0 a 3	Sur	23	126	504
Enero 30	00 a 6	92	75	0 a 4	Este	24	57	228
	6 a 12	73	63	3 a 8	Nor-Este	30	65	259
	12 a 18	69	77	0 a 17	Oeste	32	62	250
	18-00	96	86	0 a 3	Este	23	32.8	131

Tabla 14. (Continuacion)

día	periodo	Humedad Promedio %	Humedad ambiente (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Temperatura ( °C)	Volumen Evaporado (bb)	Tasa Instantánea (bb/día)
Enero 31	00 a 6	95.9	82	0 a 17	Este	22	61	244
	6 a 12	76.9	59	0 a 3	Sur-Este	24	68	272
	12 a 18	81.4	62	7 a 14	Nor-Oeste	29	89	356
	18-00	92	83	0 a 3	Este	26	62	248
Febrero 1	00 a 6	92	80	0 a 2	Este	22	62	248
	6 a 12	72	6	1 a 8	Nor-Este	29	85	340
	12 a 18	68	55	5 a 10	Nor-Oeste	32	110	440
	18-00	88	75	0 a 2	Este	24	95	380
Febrero 2	00 a 6	93.2	77	0	Este	23	61	244
	6 a 12	70	55	3 a 7	Este	25	143	572
	12 a 18	64	56	6 a 14	Oeste	32	163	652
	18-00	90	84	2 a 5	Este	24	54	216
Febrero 3	00 a 6	94	82	1	Este	24	54	216
	6 a 12	78	65	4	Norte	26	70	280
	12 a 18	56	40	13	Oeste	32	200	800
	18-00	74	65	6	Este	24	123	492

Fuente Piloto de Campo

Tabla 16. Otras Variables del proceso

día	periodo	Eficiencia promedio de bombas (%)	Comentarios Adicionales
Enero 27	00 a 6		Deriva disminuye por reducción de eficiencia en la bomba al 22% en los evaporadores 2, 3, 5 y 6 durante las horas de la noche. En el día los evaporadores permanecen en el 30%
	6 a 12		
	12 a 18		
	18-00	22	

Tabla 15. (Continuacion)

día	periodo	Eficiencia promedio de bombas (%)	Comentarios Adicionales
Enero 28	00 a 6	30	Todos los Evaporadores quedan con 30% de válvula manifold, se varían configuraciones de los equipos dejando evaporador intermedio para mayor separación.
	6 a 12	40	
	12 a 18	60	
	18-00	30	
Enero 29	00 a 6	30	Varían configuraciones de cierre de válvula manifold y variación de evaporadores activos. Se cierran en dos evaporadores 5 orificios de distribución de flujo hacia la turbina.
	6 a 12	40	
	12 a 18	40	
	18-00	30	
Enero 30	00 a 6	30	Se termina de limitar los 5 huecos de distribución de flujo en los 4 evaporadores faltantes y monitorea cambios.
	6 a 12	35	
	12 a 18	40	
	18-00	30	
Enero 31	00 a 6	40	Ubican evaporadores de forma zigzagueada para una mayor distancia entre ellos y disminuir la saturación de aire.
	6 a 12	45	
	12 a 18	60	
	18-00	40	
Febrero 1	00 a 6	30	Válvulas fijas con configuración de evaporador 1:100% abierta, evap 2:45% abierta, evap 3: 100% abierta evap 4: 45% abierta Evaporador 5: al 45% y evaporador 6 al 100%
	6 a 12	35	
	12 a 18	60	
	18-00	35	
Febrero 2	00 a 6	30	Se realizan cálculos de eficiencia de volumen evaporado ajustando curvas de volumen dependiente a las áreas de flujo de los orificios de distribución de flujo y válvula manifold notando un grado de acertación alto.
	6 a 12	60	
	12 a 18	60	
	18-00	25	

Tabla 15. (Continuacion)

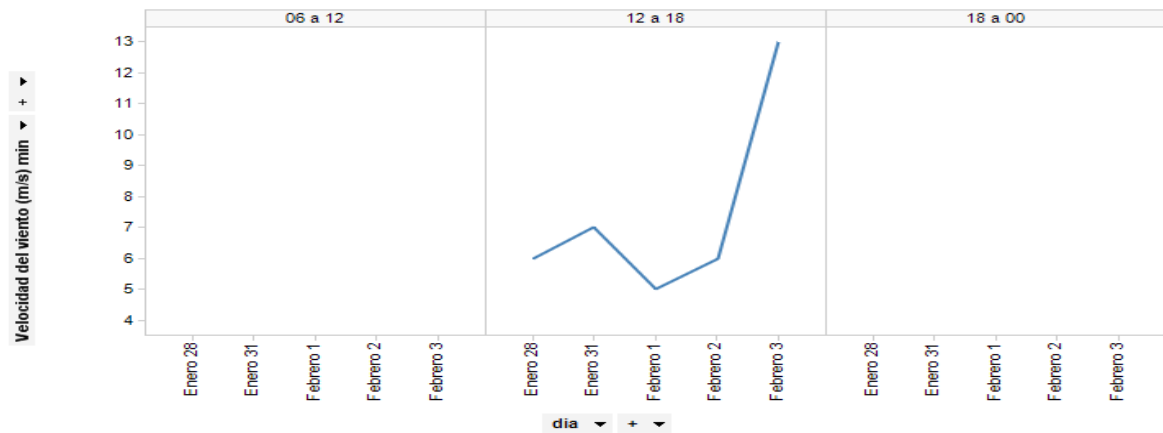
día	periodo	Eficiencia promedio de bombas (%)	Comentarios Adicionales
Febrero 3	00 a 6	25	Monitorean eficiencias con baja frecuencia y cierres mínimos alcanzando disminuir deriva y alcanzar un volumen mayor.
	6 a 12	30	
	12 a 18	60	
	18-00	45	

Fuente Piloto de Campo

Con esta premisa y los datos anteriores se observara que las horas del día más propensas a tener una velocidad mayor de 4.5 metros por segundo equivalen al periodo comprendido entre de las 12 del mediodía a las 6 de la tarde, como se ilustra en la figura (13).

Figura 13. Horas del día más propensas a tener una velocidad del viento mayor a 4.5 metros por segundo

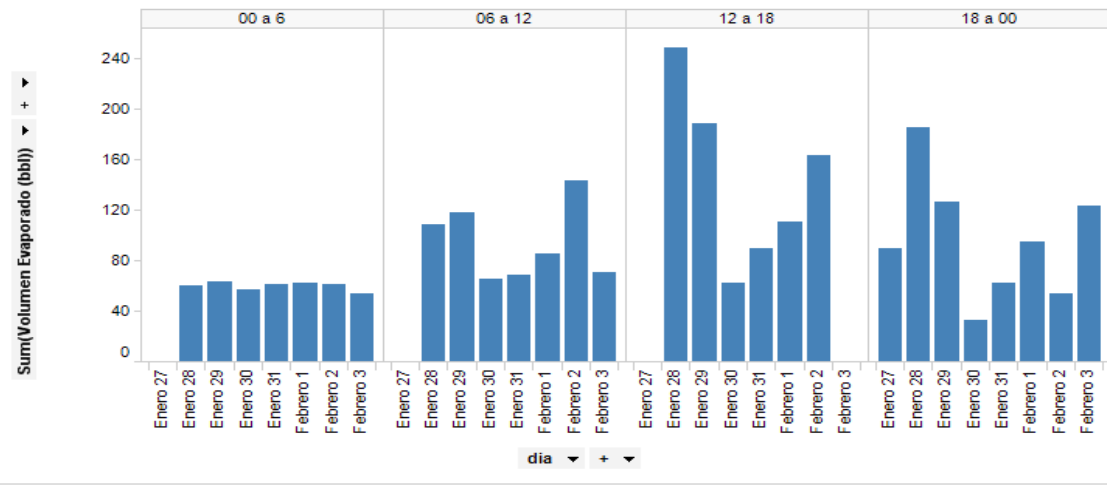
**Velocidad del viento mayor a 4.5 metros por segundo**



Fuente Elaboración Propia tomada de data de campo

Figura 14. Volumen evaporado según periodo del día

**Volumen evaporado por periodo en el día**



Fuente Elaboración Propia tomada de data de campo

En la figura (14) se relaciona el periodo del día contra el volumen evaporado a todas las velocidades del viento y se obtiene nuevamente que el periodo del día que más volumen se evapora es entre el medio día y las 6 de la tarde.

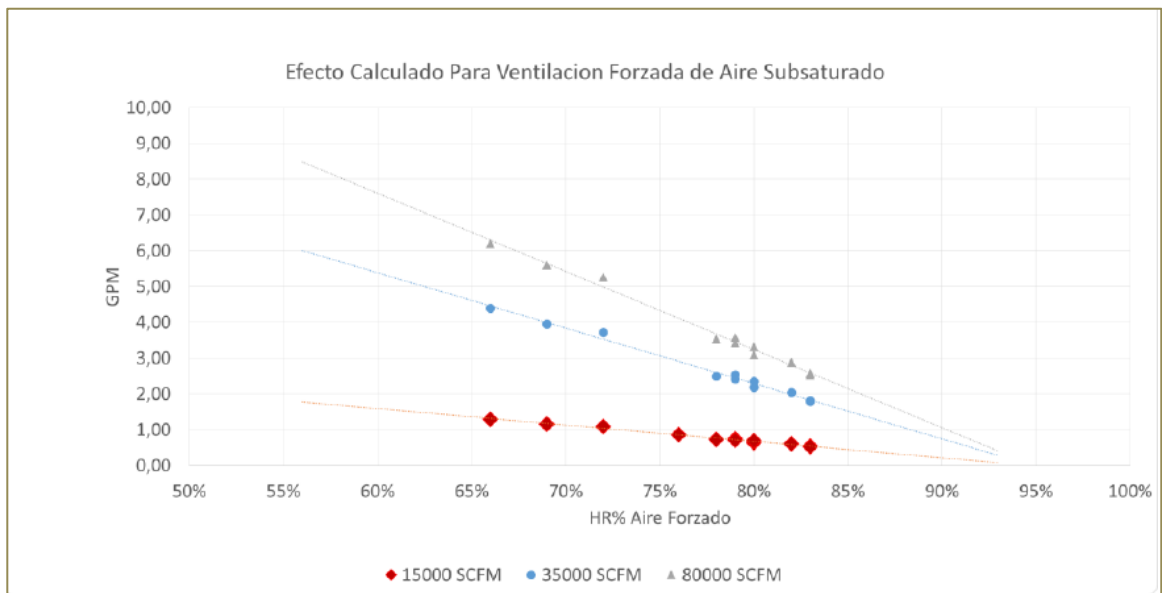
Otra variable de comparación es la humedad relativa, en la cual se observa que con una humedad hasta del 85% se puede evaporar un volumen considerable de fluido, según la figura (15) esta humedad relativa se consigue entre las 6 de la mañana y las 6 de la tarde.

De las variables anteriormente descritas aquella que se puede modificar sería la velocidad del viento y el área de los evaporadores, para aumentar la velocidad del viento se requeriría de una ventilación forzada. La parte del área de los evaporadores se logró trabajando los evaporadores en forma de zigzag

El uso de ventilación forzada, que apenas inicia aprobarse, indica que es posible mejorar las condiciones de desempeño de la evaporación mecánica. En este sentido se espera que el proceso pueda mejorar.

La figura (16) muestra el efecto de la ventilación forzada para el área de proceso actual.

Figura 15. Efecto de la ventilación forzada



Fuente data de campo

En el siguiente capítulo se observara la evaluación técnico económico de la evaporación mecánica en este campo petrolero Colombiano

### 4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el siguiente capítulo se observará la evaluación económica de la evaporación mecánica en este campo petrolero Colombiano

Para el caso en revisión, los fluidos son transportados y tratados en estaciones de un campo vecino, con el cual se establecieron previamente acuerdos de servicio de Tratamiento de fluidos.

Este acuerdo incluye tarifas de tratamiento a todo costo, que dependen de la cantidad de agua que se esté entregando por día.

Para el caso concreto se establecieron las siguientes tarifas, adicionalmente cabe aclarar que este análisis fue realizado previo a iniciar el proyecto.

Tabla 17. Tarifas de tratamiento de crudo por día dependiendo del corte de agua

<b>Barriles de Crudo por día</b>					
BSW %	0-3000	3001-5000	5001-7000	7001-9000	9001-11000
0-15	3.32	3.72	4.12	4.52	4.92
15.1-25	4.12	4.52	4.92	5.32	5.71

Fuente piloto en campo

Tabla 18. Datos de producción del campo promedio por día

<b>Producción</b>	
Fluido Total BFPD	4918
Crudo BOPD	1331
Agua BWPD	3588
BSW	70%

Fuente piloto en campo

### **Costos antes de evaporación Mecánica**

Para el costo de deshidratación de crudo que incluye la química, medidores de flujo y volúmenes totales entre otros. Se tuvo en cuenta la tarifa de 4,52 USD\$/BBL, teniendo en cuenta que el BSW del campo es de 70% y un volumen de agua superior a los 3000 BWPD.

Tabla 19. Costos antes de la evaporación mecánica

<b>COSTOS OPERACIONALES</b>	<b>TARIFA</b>	<b>TOTAL USD\$</b>
Deshidratación Estación de Tratamiento	4,52	22.231
Costos facilidades recolección	161.709	14.554
Transporte	198.090	17.828
Personal	140.957	12.686
<b>SUBTOTAL</b>		<b>67.299</b>
<b>TOTAL</b>		<b>67.299</b>
<b>LIFTING COST</b>		<b>\$ 51</b>

Fuente Elaboración piloto en campo

### **Costos de operación incluyendo evaporación Mecánica**

Para estos costos de operación donde se incluye el sistema de evaporación mecánica, con el cual se realizaría la disposición total del agua de producción del campo. Es decir, que a las estaciones de tratamiento se enviaría solo 1355 Barriles de fluido con un 0,5% de BSW. El resto correspondería al agua que se trataría en sitio y se dispondría por medio de la evaporación mecánica. Teniendo en cuenta esto, para la tarifa de tratamiento en las estaciones, se aplica 3,72 USD\$, que corresponde a la tarifa de un BSW de 0 – 15 % y un volumen menor de 3.000 Barriles de agua.

Tabla 20. Costos incluyendo la evaporación mecánica

<b>COSTOS OPERACIONALES</b>	<b>TARIFA</b>	<b>TOTAL USD\$</b>
Deshidratación Estación de Tratamiento	3,72	5.041
Costos facilidades recolección	161.709	14.554
Transporte	198.090	17.828
Personal	140.957	12.686
<b>SUBTOTAL</b>		<b>50.109</b>
<b>COTO EVAPORACIÓN MECÁNICA</b>		
Costo Evaporación	0,350	1.256
Costo Adicional por Tratamiento Osmosis inversa	1,5	5.382
<b>SUBTOTAL</b>		<b>6.637</b>
<b>TOTAL</b>		<b>56.747</b>
<b>LIFTING COST USD \$</b>		<b>43</b>

Fuente Elaboración piloto en campo

De acuerdo a los resultados, es económicamente viable tener en cuenta la evaporación mecánica como un método de disposición, ya que estamos reduciendo el lifting Cost en 8 USD\$/Bl. Lo cual podría generar a la compañía ingresos por 10.645 UD\$ por día.

Adicionalmente si se tiene en cuenta que se reduce el volumen de fluido a transportar a 1.355 BFPD, aplicando la tarifa de 40 USD\$/Bbl, se tiene que:

Tabla 21. Costos incluyendo menos transporte de fluido

<b>COSTOS OPERACIONALES</b>	<b>TARIFA</b>	<b>TOTAL USD\$</b>
Deshidratación Estación de Tratamiento	3,72	5.041
Costos facilidades recolección	161.709	14.554
Transporte	54.580	4.912
Personal	140.957	12.686
<b>SUBTOTAL</b>		<b>37.193</b>
<b>COSTO EVAPORACIÓN MECÁNICA</b>		
Costo Evaporación	0,350	1.256
Costo Adicional por Tratamiento Osmosis inversa	1,5	5.382
<b>SUBTOTAL</b>		<b>6.637</b>
<b>TOTAL</b>		<b>43.831</b>
<b>LIFTING COST USD\$</b>		<b>33</b>

Fuente piloto en campo

El lifting cost se reduce en 18 USD\$/Bbl, ofreciendo a la compañía una optimización de costos, que le pueden generar 8.741.911 USD\$ al año (23.950,44 USD\$ por día)

Adicionalmente se hace un análisis de flujo de caja con los datos reales de producción obtenidos durante los 11 meses que duro el mismo.

#### **4.3.1 Análisis Económico Con Flujo de Caja.**

Este análisis se dividirá en:

- Premisas económicas, en donde se encontrarán precios, costos, etc.
- Perfil tipo, en donde se encontrara la producción del campo de interés
- Flujo de caja: en donde se observara en forma gráfica la tendencia con los valores de las premisas económicas y el perfil tipo y
- Resultados en términos de indicadores económicos, en donde se verán indicadores como el valor presente neto, retorno de la inversión entre otros.

**Premisas económicas:**

Dentro del OPEX: se tuvieron en cuenta los siguientes valores y parámetros:

- Tratamiento de petróleo por bbl: de acuerdo a tabla 16
- Tratamiento de agua por barril: adición de química aproximadamente 0.15 dólares por barril
- Evaporación mecánica de agua: incluye dos parámetros: la evaporación propiamente dicha que es 0.35 dólares por barril y el proceso de osmosis inversa con el fin de remover cloruros presentes en el agua, esta última tarifa corresponde a 1.5 dólares por barril.
- La tarifa de transporte se está incluyendo la distancia de recorrido y la cantidad de barriles a transportar, se están considerando 1.05 dólares por barril y una distancia de 35 km.

Dentro del CAPEX: se debe recordar que esto es un piloto, y debido a las negociaciones llevadas a cabo con la empresa de servicios que tratara los fluidos de producción, se podría considerar que no existe la inversión inicial.

Sin embargo para poder hacer un análisis económico con indicadores como el valor presente neto (VPN), valor presente de inversión (VPI), tasa interna de

recobro (TIR), eficiencia de la inversión (EI), y tiempo de pago; se requiere asignar un valor a una inversión inicial.

Como punto de partida se tomara como inversión las facilidades de producción que según la tabla anterior corresponde a USD\$ 161709 por mes, ya que se tienen datos de pruebas del piloto de 10 meses, se asumirá una inversión inicial en estas facilidades.

Por otro lado se considera que el crudo se estará vendiendo a USD\$ 40 por barril, las regalías estarán por el orden de 0.04, una tasa de descuento de 11.1% y una contingencia del 8.93%.

Estas premisas económicas se describen en la tabla (21).

Tabla 22. Premisas económicas para el flujo de caja

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	TARIFA (USD\$)
OPEX	Tratamiento crudo. Ver tabla 16	bbl	
	Tratamiento agua	bbl	0.35
	Aspersión de Agua	bbl	1.85
	Personal tratamiento	día	4698
	Carrotanque	Bbl	1.05
CAPEX	Facilidades para Tratamiento		1617090

Fuente Elaboración propia

### Perfil tipo:

En los 10 meses del proyecto se obtuvo la siguiente relación de producción de agua y petróleo en promedio, así como el agua evaporada, tomados todos en promedio, estos datos se reportaran tanto en forma gráfica como en tabla:

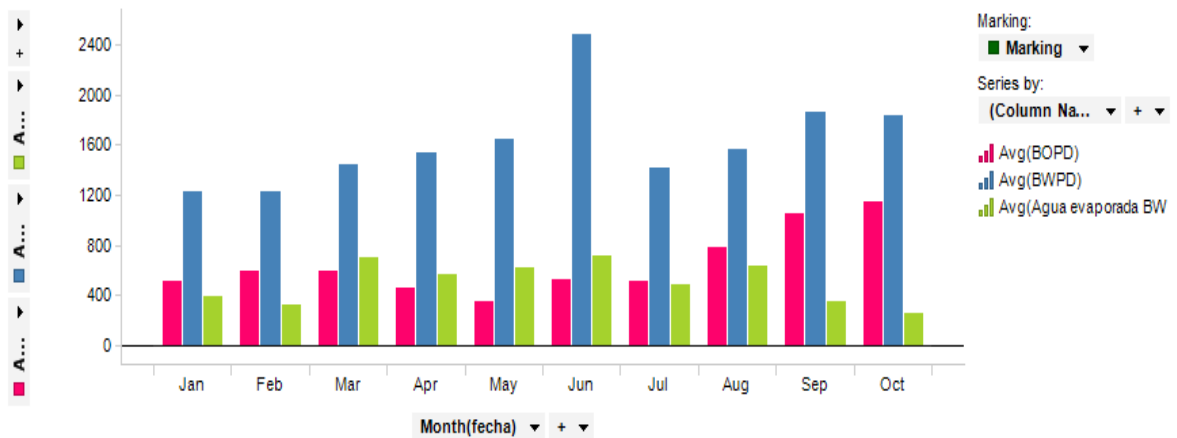
Tabla 23. Volumen producido de fluidos y agua evaporada durante el proyecto

Mes	BOPD	BWPD	BWPD evaporada
Enero	508	1228	391
Febrero	593	1233	324
Marzo	589	1442	702
Abril	458	1535	567
Mayo	349	1644	625
Junio	527	2484	714
Julio	512	1416	484
Agosto	780	1568	637
Septiembre	1049	1862	350
Octubre	909	1837	261

Fuente Elaboración propia tomado de data de campo

Figura 16. Volumen producido de fluidos y agua evaporada durante el proyecto

Produccion Promedia por día y volumen evaporado



Fuente Elaboración propia tomado de data de campo

## Flujo de caja:

A continuación se van a presentar los diferentes flujos de caja y sus sensibilidades: la primera sensibilidad realizada fue con los datos de producción reales sin incluir la evaporación

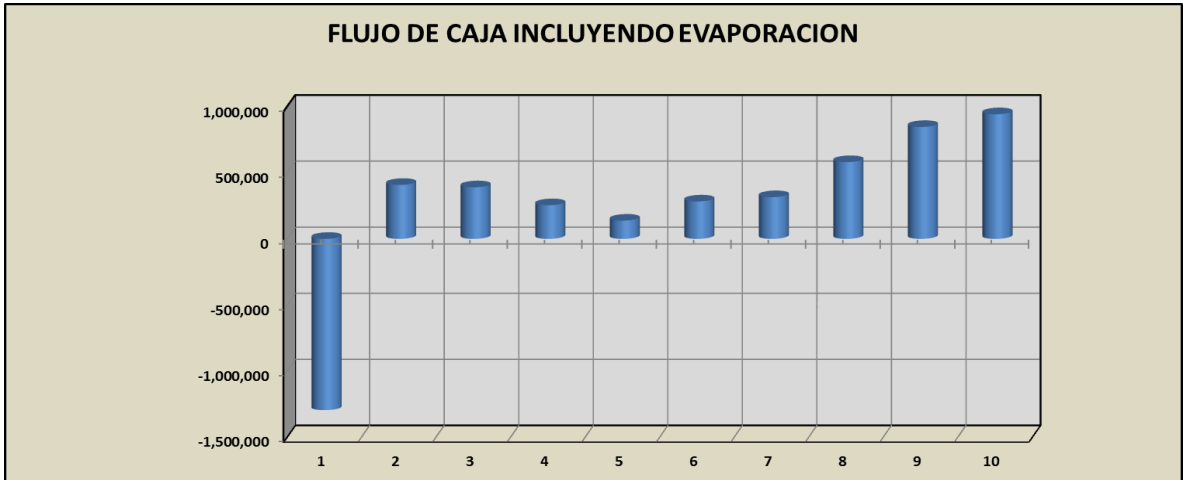
Figura 17. Flujo de caja con volúmenes reales sin evaporación



Fuente Elaboración Propia

Luego se hace el mismo ejercicio pero incluyendo la evaporación, en la cual se observa que aunque la tendencia en ambos casos es la misma el flujo de caja incluyendo la evaporación aumenta en USD\$ 37550.

Figura 18. Flujo de caja con volúmenes reales con evaporación



Fuente Elaboración Propia

En términos generales la producción del campo ha estado por debajo de lo inicialmente proyectado, en caso de cumplir con la producción estimada, es decir aproximadamente 3000 barriles de agua, los escenarios contemplados anteriormente se modifican como se observa en la figura (20), nuevamente la tendencia es la misma, pero el flujo de caja se incrementa respecto al volumen de producción hoy día en USD\$ 140763

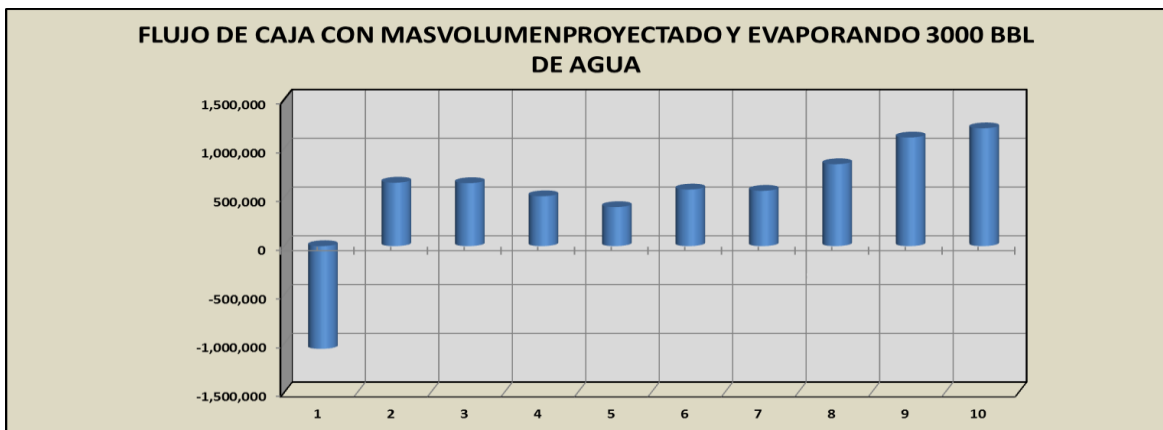
Figura 19. Flujo de caja con volúmenes mayores proyectados sin evaporación



Fuente Elaboración Propia

Para luego realizar el ejercicio pero asumiendo que se pueden evaporar los 3000 bbl de agua por día, se incrementa el flujo de caja en USD\$ 264583 dólares y la tendencia se indica en la figura (21)

Figura 20. Flujo de caja con volúmenes mayores proyectados con evaporación



Fuente Elaboración Propia

### Resultados en términos de indicadores económicos.

Realizando el cálculo de los indicadores económicos en términos del valor presente neto (VPN), valor presente de la inversión (VPI), tasas de retorno a la inversión (TIR) y eficiencia de la inversión se obtienen los resultados que se indican en la tabla (23)

Tabla 24. Análisis económico comparando diferentes escenarios de producción

Escenario	VPN (USD\$)	VPI (\$USD)	TIR (%)	EI	Tiempo de pago (mes)
Volúmenes actuales sin evaporación	910527	1617090	24	0.56	1
Volúmenes actuales con evaporación	1007426	1617090	26	0.62	1
Volúmenes proyectados sin evaporación	1827681	1617090	40	1.13	1
Volúmenes proyectados con evaporación	2685465	1617090	57	1.66	1

Fuente Elaboración Propia

De la tabla anterior se puede observar que el proyecto es rentable ya que si se compara cada escenario sin la técnica de evaporación con la técnica de evaporación siempre hay un incremento en términos de valor presente neto, retorno de la inversión y eficiencia de la misma.

## 5. CONCLUSIONES

El método de evaporación mecánica es una buena opción teniendo en cuenta que se podría tomar como un método de disposición alternativo para campos pequeños, campos en fase de desarrollo inicial, cuando no cuenta con métodos de disposición como pozos inyectoros, Zodars, o vertimiento en aguas superficiales.

Este método es ambientalmente amigables ya que el agua retorna a su ciclo natural.

Aunque el método de evaporación mecánica no depende de la temperatura ambiente, si depende del delta de temperatura existente y otras condiciones climáticas como la humedad relativa.

El método de evaporación mecánica ofrece una alternativa de optimización de costos, para el caso específico del campo en donde se desarrolló el piloto.

Los resultados del piloto, no fueron los esperados; se evaporó menos caudal del que se había establecido en la fase de planeación del piloto. Pero si se tiene en cuenta que el diseño original no se llevó a cabo y las pruebas individuales de los evaporadores ofrecieron caudales incluso superiores al establecido inicialmente, se podría contemplar como una opción para la disposición de agua de este campo. Se recomienda continuar con el piloto, realizando los ajustes correspondientes del diseño original.

Según la velocidad del viento del área se observa el fenómeno de deriva, por lo tanto la sugerencia de utilizar ventilación forzada suena lógica y razonable.

Según los datos de velocidades del viento y humedad relativa reportadas durante el trabajo el mejor periodo del día en términos de obtener mayor evaporación de agua está comprendido entre las 12 del mediodía y las 6 de la tarde.

Respecto al análisis financiero el estudio se llevó a cabo desde dos puntos de vista, el costo de levantamiento y se realizó un flujo de caja para evaluar otros parámetros como valor presente neto, tasa de retorno de la inversión y en todos los casos la evaporación mecánica representa una ganancia desde el punto de vista económico.

Analizando el costo de levantamiento para una producción de 1300 barriles de crudo por día y 3588 barriles de agua pro día, se obtiene un costo de 51 dólares por barril sin la técnica de evaporación mecánica. Si por el contrario se incluye la técnica de evaporación mecánica y contemplando la reducción en movilizaciones este valor se reduce a 33 dólares por barril, lo cual indica que se está ofreciendo a la compañía una optimización de costos, que le pueden generar 8.741.911 USD\$ al año (23.950,44 UD\$ por día).

Desde el punto de vista del valor presente neto se observa un incremento en 96899 dólares, comparando con las tasas actuales de producción y con la técnica tradicional (USD\$ 910527) vs la técnica de evaporación mecánica (USD\$1007426).

La tasa de recobro de la inversión se incrementa en 2% comparando la técnica convencional (24%) vs la evaporación mecánica (26%).

Luego la técnica de evaporación mecánica es rentable ya que si se compara cada escenario sin la técnica de evaporación con la técnica de evaporación siempre hay un incremento en términos de valor presente neto, retorno de la inversión y eficiencia de la misma.

Las tasas instantáneas de evaporación mayores a 900 bbls por día indican que el sistema puede operar con eficiencia siempre y cuando las condiciones de saturación de área se mantengan controladas.

La configuración del área de la piscina y los factores como disponibilidad del viento y flujo en todas las direcciones se ven seriamente afectados por la morfología del área y la existencia de equipos muy cercanos que afectan el desempeño del proceso.

El hecho de evaporar el agua en el sitio reduce el riesgo de accidente ya que se reducen los viajes de las tractomulas, recordando que la mayoría de las empresas le ponen especial cuidado a los indicadores de salud, seguridad y medio ambiente, sin olvidar la relación con la comunidad.

## 6. RECOMENDACIONES

- Debido a los resultados obtenidos de evaporación, esta es una opción de disposición de agua sobre todo cuando no se dispone de pozos inyectoros.
- Ya que la velocidad del viento afecta tanto el proceso, la ventilación forzada sería una buena opción y debería luego compararse su efectividad.
- Contemplar la posibilidad de seguir trabajando los evaporadores en forma de zigzag ya que se observa un beneficio al aumentar el área entre los evaporadores.

## BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. LEY 23 de 1973.» Bogotá, 19 de Diciembre de 1973. Por el cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 4581. Bogotá, D.C., 19 de Diciembre 1973.

COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. LEY 9 de Enero 24 de 1979.» Bogotá, 19 de Diciembre de 1973. Por la cual se dictan Medidas Sanitarias. Diario Oficial No. 2175. Bogotá, D.C., 24 de Enero 1979.

COLOMBIA. CONGRESO DE COLOMBIA. LEY 99 de Diciembre 22 de 1993.» Bogotá, 19 de Diciembre de 1973. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41146. Bogotá, D.C., 22 de diciembre de 1993.

COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Constitución Política de Colombia. 1991. Artículos 79, 80 y 95.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA, DECRETO 1541 de Julio 28 de 1978. Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. Diario Oficial No. 3716. Bogotá, D.C., 26 de Julio de 1978.

COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA, DECRETO 1594 de Junio 26 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial No. 36700. Bogotá, D.C., 23 de Julio de 1984.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, RESOLUCIÓN 0631, Marzo 07 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 49486. Bogotá, D.C., de 18 de abril de 2015.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, DECRETO 3960, Octubre 25 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. Oficial 47873. Bogotá, D.C., de 25 de Octubre de 2010.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, DECRETO 155, Enero 22 de 2004. Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones. Diario Oficial No. Oficial 45439. Bogotá, D.C., de 23 de Enero de 2004, artículos 1 al 3.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, DECRETO 3100, Octubre 30 de 2003. Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial No. Oficial 45357. Bogotá, D.C., de 31 de Octubre de 2003, CAPITULO II.

COLOMBIA , MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Ley 23 de 1973. Diciembre 12 de 1973. Por el cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 34001. Bogotá, D.C., de 17 de enero de 1974.

COLOMBIA , PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. DECRETO 1449 de Junio 27 de 1977, artículo 2. Por el cual se reglamentan parcialmente el inciso 1 del numeral 5 del artículo 56 de la Ley número 135 de 1961 y el Decreto-Ley número 2811 de 1974. Diario Oficial No. 34827. Bogotá, D.C., de 27 de Junio de 1977.

COLOMBIA , PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. DECRETO 2811 del 18 de Diciembre de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Diario Oficial No. 34243. Bogotá, D.C., de 18 de Diciembre de 1974.

R.E, King. «Maureen Produced Water Injection.» SPE 26703, 1983.

D.C. Kincaid, T.S. Longley. «A Water Droplet Evaporation and Temperature .» En: ASAE ( American Society of Agricultural Engineers), 1989: 457-463.

DIAZ CONSUEGRA, Harving, Sistemas Integrados de Gestión. Bogotá: Escuela de Ingeniería de Petróleos, Especialización en Producción de Hidrocarburos, 2014.

Hamed Wael, Ibrahim Shaban. Moving Towards Innovative Waste Water Treatment and Disposal technologies: Field Study for In Situ Waste Water Treatment and Evaporation Technology. En: SPE 164672. 2013. Cairo

H.J, Holterman. Kinetics and evaporation of water drops in air. Wageningen UR, , 2003.

K Arnold, M Stewart. Surface production Operations. 2008.

KHATIB, Z. Verbeek P. «Water to value-Produced Water Management for Sustainable Field development of Mature and Green Fields.» En: SPE 73853, 2002.

Qué hacer con el agua de Producción? (Anónimo). En: Revista e+. Ecopetrol. Edición 4 Julio-Septiembre 2014.

ORTIZ Carolina, Identificación y Definición de la metodología de cálculo de los índices y variables involucrados en el cálculo de las tasas por uso del agua. Trabajo de Grado Magister en Ingeniería-Recursos hidráulicos. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. 2006.

PARIS de Ferrer, Magdalena. Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos. 2001.

Telemetry Efficiency through simplicity. s.f. [www.telemetry.com](http://www.telemetry.com) (último acceso: 14 de January de 2015).

Unidad de planeación minero energética. 31 de Octubre de 2014. [www.upmed.gov.co](http://www.upmed.gov.co) (último acceso: 6 de Enero de 2015).