

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA DEL
AMBIENTE USANDO ABSORBENTES, BAJO LAS CONDICIONES
AMBIENTALES DE RIOHACHA, COLOMBIA**

**ANGELY JULIANA PORRAS DUARTE
CRISTHIAN EDUARDO PRADA REYES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA DEL
AMBIENTE USANDO ABSORBENTES, BAJO LAS CONDICIONES
AMBIENTALES DE RIOHACHA, COLOMBIA**

**ANGELY JULIANA PORRAS DUARTE
CRISTHIAN EDUARDO PRADA REYES**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Químico**

**Director
MARIA PAOLA MARADEI GARCIA
Ingeniera Química Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. METODOLOGÍA	17
1.1 SISTEMA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE ABSORCIÓN	17
1.2 SISTEMA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE DESORCIÓN	18
1.3 PRUEBAS PRELIMINARES	19
1.3.1 Estabilización de la unidad de absorción	19
1.3.2 Estabilización de la unidad de desorción	20
1.4 SECADO Y ANÁLISIS DE HUMEDAD DE ABSORBENTES	20
1.5 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ABSORCIÓN	21
1.6 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DESORCIÓN	22
1.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
2.1 PRUEBAS PRELIMINARES	28
2.1.1 Estabilización de la unidad de absorción	28
2.1.2 Estabilización de la unidad de desorción	29
2.2 SECADO Y ANÁLISIS DE HUMEDAD DE ABSORBENTES	30
2.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ABSORCIÓN	30
2.4 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DESORCIÓN	33
3. CONCLUSIONES	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	45

LISTA DE FIGURAS.

	pág.
Figura 1. Metodología del proyecto	17
Figura 2. Esquema de la unidad de absorción empleada	18
Figura 3. Esquema de la unidad de desorción empleada	19
Figura 4. Transferencia de masa del soluto A a través de la película formada al lado de la interfase gas-liquido en a) la etapa de absorción y b) la etapa de desorción	24
Figura 5. Humedad relativa Vs tiempo: Etapa de estabilización de la unidad de absorción usando diferentes flujos de aire	28
Figura 6. Pruebas de absorción. Relación peso de agua/volumen de absorbente contra tiempo de absorción para el etilenglicol y el glicerol	32
Figura 7. Pruebas de desorción. Porcentaje de agua recuperada por glicerol contra tiempo de desorción, en pruebas de 10 y 20 horas de absorción	35
Figura 8. Pruebas de desorción. Fracción molar(x_{A0}) contra tiempo de desorción, en pruebas de 10 y 20 horas de absorción desde concentraciones iniciales y finales cercanas	36

LISTA DE TABLAS.

	pág.
Tabla 1. Temperatura y humedad relativa alcanzadas en las pruebas preliminares para los ensayos posteriores de absorción con un flujo de aire de 500 Nml/min	29
Tabla 2. Temperatura y humedad relativa alcanzadas en las pruebas preliminares de desorción	30
Tabla 3. Condiciones iniciales de los absorbentes y la unidad en el proceso de absorción	31
Tabla 4. Condiciones iniciales del absorbente y la unidad en el proceso de desorción	34
Tabla 5. Datos de absorción para etilenglicol en g de agua/L y fracción molar	45
Tabla 6. Datos de absorción para glicerol en g de agua/L y la fracción molar	46
Tabla 7. Datos de desorción para glicerol en la prueba de 10 horas de absorción en porcentaje de agua recuperada y fracción molar	47
Tabla 8. Datos de desorción para glicerol en la prueba de 20 horas de absorción en porcentaje de agua recuperada y fracción molar	48

LISTA DE ANEXOS.

	pág.
ANEXO A: DATOS DEL PROCESO DE ABSORCION	45
ANEXO B: DATOS DEL PROCESO DE DESORCION	47

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA DEL AMBIENTE USANDO ABSORBENTES BAJO LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE RIOHACHA, COLOMBIA*

AUTORES: ANGELY JULIANA PORRAS DUARTE
CRISTHIAN EDUARDO PRADA REYES**

PALABRAS CLAVE: Humedad, absorción, desorción, recuperación, ambiente, Riohacha.

DESCRIPCIÓN:

La escasez de agua a nivel mundial es algo que se prevé se agravara en los próximos años, a raíz de la existencia de este problema se ha venido buscando una solución a lo largo de todo el mundo, podemos encontrar muchas alternativas para mitigar este problema. En este trabajo, los estudios serán basados en el principio de absorción y desorción, siendo así desarrollado un sistema que absorbe agua del medio ambiente y luego por medio un proceso de desorción es recuperada como agua potable, utilizando absorbentes.

Es importante destacar las pruebas experimentales en las condiciones climáticas de Riohacha, que es la urbe principal de la Guajira colombiana, una región conocida por tener grandes problemas de escasez de agua. Se utilizaron dos absorbentes, siendo estos el glicerol y el etilenglicol. Utilizando la ecuación de continuidad que define la transferencia de masa a través de la interfase aire-solvente generada durante los procesos de absorción y desorción, se lleva a cabo un tratamiento de datos que permite comparar las difusividades obtenidas en el rango de operación de los dos absorbentes utilizados y el área necesaria para abastecer a una familia promedio en la región.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. María Paola Maradei García. Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF AN ATMOSPHERIC WATER RECOVERY SYSTEM USING ABSORBENTS UNDER RIOHACHA'S COLOMBIA ENVIRONMENTAL CONDITIONS.

AUTHOR: ANGELY JULIANA PORRAS DUARTE
CRISTHIAN EDUARDO PRADA REYES*

KEY WORDS: Humidity, absorption, desorption, recovery, environment, Riohacha.

DESCRIPTION:

The world wide water short age is something which is expected to be worse in the coming years, following the existence of this problem has been seeking a solution along worldwide, we can find many alternatives to mitigate this problem. In this paper studies will be based on absorption and desorption principles, being thus developed a system that absorbs water from the environment and then through a process of desorption is recovered as drinking water, using absorbents.

It's important to highlight that experimental tests under the weather conditions of Riohacha, that is the most important city in Guajira, Colombia, a region known for its problems of water shortage. Two absorbents were used, these are glycerol and ethylene. Using the continuity equation that defines mass transfer through the air-solvent interphase generated during the absorption and desorption processes, it performs a data processing to compare the diffusivities obtained in the operating range of the two absorbent used, and the needed area to supply an average family in the region.

*Project of grade

** Physicochemical engineering faculty, School engineering chemical, Director: Maria Paola Maradei García, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Colombia está situada en la Zona Tórrida, y por tanto no existen estaciones como en otros países. Sin embargo, la conjugación de una serie de factores geográficos y atmosféricos como altitud, latitud y relieve, le otorgan al país una variedad de climas que influyen en su vegetación y fauna[1]. La existencia de la cordillera de los Andes sobre el territorio colombiano ofrece todos los climas de la Tierra, por esta causa se tiene en Colombia tierras desde las más secas (muy cálidas y con pocas precipitaciones) hasta los glaciares (con precipitaciones en forma de nieve), pasando por los climas templados según la altitud relativa sobre el nivel del mar, esto da lugar a los llamados pisos térmicos[1].

Uno de los lugares donde se presentan las más elevadas temperaturas de Colombia es el departamento de la Guajira, situado en el extremo norte del país y la llanura del Caribe, en la parte más septentrional de América del Sur. Su superficie es de 20848 km² y representa el 1,8% del territorio nacional [2]. Las lluvias son escasas y mal distribuidas con una precipitación anual que oscila entre 354 y 1170mm y temperatura media anual de 28,2°C. La humedad relativa promedio es de 72%, con presencia constante de vientos, alta evaporación y estaciones bastante marcadas [3]. Por sus diferencias fisiográficas se consideran 3 diferentes regiones: Alta guajira, Media Guajira y Baja Guajira [2].

La consecución del recurso hídrico es un problema fundamental presente en el departamento; debido a la falta de acueductos en las cabeceras municipales y las áreas rurales, 4 de las 15 cabeceras municipales del departamento tienen una cobertura por debajo del 90%, encontramos por ejemplo, Uribía con un 84,38%, Riohacha con un 81,67%, Maicao con un 68,93% y Manaure con un 25,08%. En contraste, en el área rural los porcentajes van desde el 16,20% (en Barracas)

hasta el 0,43% (en Uribía); valores muy por debajo del promedio rural nacional de 39,56% [5].

Además de los problemas mencionados, la riqueza no abunda en la región. Esto se puede evidenciar con el porcentaje de población en riesgo de pobreza en el departamento de la Guajira que fue de 55,8% en el año 2013, y por el porcentaje de personas en pobreza extrema que fue de 25,7%. Por otra parte, el ingreso per cápita de la Guajira fue de \$284.467 en el año 2013, limitando así el comercio y los artículos que las familias puedan adquirir [6].

Hace 50 años, durante la dictadura del general Rojas Pinilla, nació la idea de la construcción de la represa del río Ranchería. Esta represa fue inaugurada en 2010, sin embargo se observa que después de estos años de funcionamiento, ésta no ha logrado cumplir con los propósitos para los que fue construida, existiendo aún problema de escasez de agua en la región [7]. En los últimos años, la inversión que se ha realizado en la Guajira ha aumentado para la ejecución de proyectos que buscan mitigar este problema. Actualmente se está invirtiendo en aproximadamente 12 pozos de agua dulce subterránea que podrían ayudar con la solución del problema, al menos para la capital del departamento de la Guajira[8].

La tendencia mundial para la solución de este tipo de problemas en la actualidad es aprovechar la humedad del aire en lugares donde la pluviosidad es muy poca pero que tiene un grado de humedad relativa alto por encontrarse cerca del mar. Entre los casos reportados se encuentra por ejemplo una valla publicitaria de la universidad de ingeniería y tecnología (UTEC) que se encuentra aproximadamente 90 km al sur de Lima (Perú), y que permite recoger agua del aire por medio mecánico. El agua es potabilizada y almacenada para posteriormente ser distribuida a la comunidad ubicada en una región conocida por ser desértica[9]. También se reporta un caso en Chile, donde se ha desarrollado un dispositivo llamado Fresh Water, que funciona en el desierto de Atacama y que produce agua

potable por medio del uso de electricidad para su condensación y se purifica por medio de filtros [10]. Este tipo de procesos mecánicos tiene la dificultad de presentar altos costos y una gran demanda energética; algo no asimilable en una región con tanta pobreza y a su vez con tantas dificultades para obtener el recurso eléctrico.

En Etiopia se ha desarrollado una estructura con forma de árbol hecha en bambú y plásticos biodegradables que puede recoger agua del aire húmedo de las noches etíopes solo con el contacto del aire y la estructura, dicha estructura ha sido diseñada por la firma Architecture and Visión [11], esta estructura ha solucionado muchos problemas y ha cambiado radicalmente la calidad de vida de las personas de las comunidades beneficiadas.

Otra forma de recuperar la humedad del airees utilizando un lecho sólido absorbente (arena o algún material poroso) que permita el paso del aire, este lecho es generalmente empapado o mezclado con un desecante que realice la absorción de agua en gran cantidad. Posteriormente, el agua es retirada por evaporación ya sea al vacío o por aumento de la temperatura [12]. En realidad, aunque el método es innovador, también requiere de cierta energía aplicada, que nos genera el mismo problema que los procesos mecánicos, no siendo viable para la comunidad de la Guajira.

Otra posibilidad tecnológica es el uso de absorbentes líquidos a través de los cuales se hace pasar el aire húmedo, la cantidad máxima de vapor de agua absorbido dependerá del tiempo de residencia del aire húmedo. Posteriormente, el agua absorbida es separada por medio de una destilación simple aprovechando la diferencia de puntos de ebullición de las dos especies presentes (el absorbente y el agua).Esta destilación puede ser llevada por medio de la luz solar lo que permitiría el uso de una energía limpia para la recuperación de agua potable. Sin embargo, cabe aclarar que es importante tener en cuenta que el absorbente no

debe contaminar el agua ya que esto eliminaría por completo la viabilidad del proyecto [13].

Los sistemas de recuperación de agua presente en el ambiente usando energía solar en la etapa de desorción son muy pocos. Estos dispositivos trabajan en dos tiempos; una etapa de absorción se lleva a cabo en la noche, ya que a estas horas se presentan la temperatura más baja y la humedad más alta en la región, y una etapa de desorción que se realiza durante el día. La etapa de absorción se realiza mediante un sistema abierto donde un líquido higroscópico capta la humedad presente en el aire. Por otro lado, la etapa de desorción es un sistema cerrado en el que se calienta el líquido por medio de la radiación solar logrando evaporar el agua que se condensa al entrar en contacto con las paredes y el techo inclinado del sistema cerrado. Dicha inclinación permite que el agua condensada se deslice y pueda ser recolectada en la parte más baja.

Los reportes en la literatura hablan del uso del etilenglicol como agente adsorbente por su capacidad para absorber agua. Sin embargo, aunque es ampliamente usado en productos domésticos como anticongelante, descongela, detergentes, pinturas y cosméticos, puede producir intoxicación si es ingerido. De hecho en altas dosis puede causar daño cerebral, pulmonar, renal o del hígado causando shock profundo en algunos individuos hasta su muerte [14]. La industria del biodiesel produce grandes cantidades de glicerol que es difícilmente valorizable en industrias como la de alimentos, farmacéutica o cosmética ya que su bajo grado de pureza implica altos costos de purificación. Sin embargo, el glicerol es altamente higroscópico y es conocido como seguro para el consumo humano; grandes cantidades pueden ser administradas sin que aparezcan efectos nocivos para la salud humana [15].

Este trabajo de fin de carrera, por lo tanto, consistió en determinar las condiciones de absorción y desorción del glicerol como agente absorbente constituyéndose en

una base para la evaluación de dicho absorbente en sistemas de recuperación de agua presente en el ambiente, como alternativa para las zonas no interconectadas que sufren de indisponibilidad de agua potable como lo es el departamento de la Guajira.

1. METODOLOGÍA

La Figura 1 presenta la metodología que se siguió para el cumplimiento del objetivo trazado. A continuación se detallada cada paso así como el descriptivo del sistema experimental utilizado.

Figura 1. Metodología del proyecto.

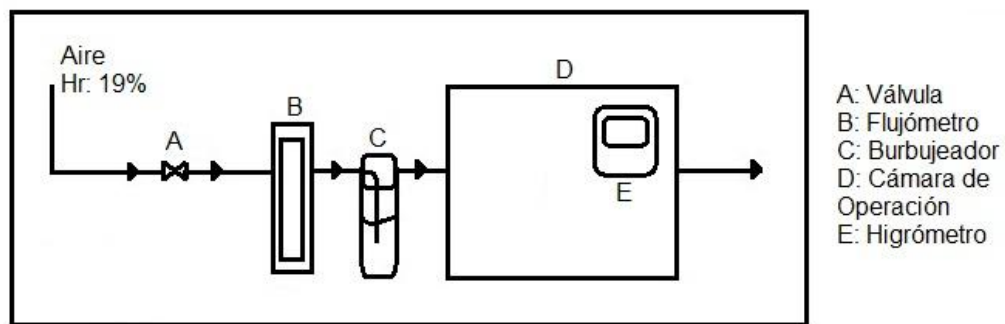


1.1 SISTEMA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE ABSORCIÓN

Se contó con una cámara de atmósfera controlada en polipropileno transparente en donde se instaló en su interior un higrómetro para la medida de humedad relativa y temperatura. Para las pruebas, a la cámara se le inyectó constantemente una corriente de aire húmedo. El sistema de inyección cuenta con un compresor

que produce aire con una humedad relativa de 19%, éste es enviado a un rotámetro con válvula antes de que pase a través de un burbujeador conteniendo agua destilada (50ml). El rotámetro permite la medida del flujo volumétrico de aire que será inyectado a la cámara y el burbujeador permite aumentar la humedad relativa del aire hasta el valor deseado. El esquema del sistema empleado se presenta en la Figura 2.

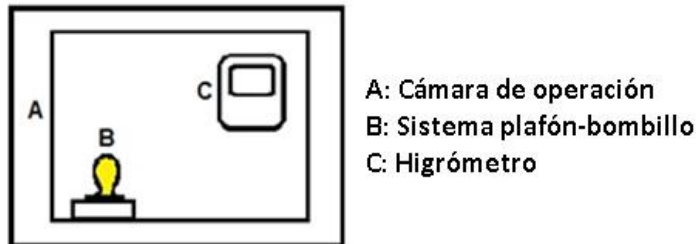
Figura 2. Esquema de la unidad de absorción empleada.



1.2 SISTEMA EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE DESORCIÓN

Se utilizó la misma cámara de atmósfera controlada de las pruebas de adsorción pero sin inyección de aire, simulando lo que sucedería en un dispositivo de recuperación de agua del ambiente usando energía solar. Para las pruebas, se instaló adicionalmente un plafón y un bombillo en la parte baja de la cámara con el fin de aumentar la temperatura en el interior de esta. El montaje se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Esquema de la unidad de desorción empleada.



1.3 PRUEBAS PRELIMINARES

Con el objetivo de encontrar las características adecuadas para llevar a cabo las pruebas de adsorción y desorción se evaluaron diferentes condiciones de flujo en la cámara de atmósfera controlada.

1.3.1 Estabilización de la unidad de absorción

Para las pruebas de estabilización se consideró la climatología en la capital del departamento de la Guajira, Riohacha, en horas de la noche; temperatura mínima de 23,9°C y humedad relativa promedio de 72% [3].

Inicialmente se inyectó aire a la cámara de operación sin el uso del burbujeador y se determinó el tiempo de estabilización de la humedad (en este caso de 19%, correspondiente al aire saliendo del compresor). Una vez alcanzada la estabilización se reguló el flujo de aire y éste se envió al burbujeador antes de su inyección a la cámara. Tanto la humedad como la temperatura fueron registradas cada 5 minutos por 13 horas. Al final de la prueba se determinó la humedad máxima posible en función del flujo de aire utilizado. Estas pruebas se realizaron por duplicado.

Teniendo cuenta las condiciones meteorológicas base de este estudio, se fijó un flujo de aire adecuado y se realizaron tres pruebas adicionales de estabilidad con registro de temperatura y humedad cada hora durante seis horas, estas pruebas se realizaron iniciando con la humedad ambiente presente en el laboratorio; para garantizar en el proceso de absorción la humedad deseada sin la necesidad de esperar tiempo de estabilización en la cámara de operación.

1.3.2 Estabilización de la unidad de desorción

Para las pruebas de estabilización, se consideró la climatología en la capital del departamento de la Guajira, Riohacha, en horas del día; temperatura máxima de 45°Cy una humedad relativa promedio de 55% [3].

Se realizaron pruebas de la unidad utilizando el sistema plafón-bombillo encendido, observando cómo varia la temperatura y la humedad relativa con el tiempo. Los datos de humedad y temperatura se registraron cada hora durante 6 horas, la toma de datos se inició después de 30 min de funcionamiento de la unidad. Al final de la prueba se encontraron los rangos de humedad y temperatura que se consiguen dentro de la cámara de operación cerrada. Estas pruebas se realizaron por triplicado.

1.4 SECADO Y ANÁLISIS DE HUMEDAD DE ABSORBENTES

Dos absorbentes fueron usados: etilenglicol (Carlo Erba 99%) y glicerina USP de calidad alimenticia (Industrias Químicos y Sabores). Cada absorbente fue inicialmente secado y su humedad fue medida antes de ser usado en las pruebas de adsorción.

En el caso del etilenglicol, éste fue secado usando sulfato de sodio como desecante, el cual fue previamente activado en horno durante 12 horas a

110°C[16]. La mezcla etilenglicol/sulfato de sodio (1/10 parte en peso) previamente agitada fue puesta en reposo durante 24 horas. Pasado este tiempo, el etilenglicol fue separado por filtración usando una bomba a vacío y una membrana de 0,45 micras. Finalmente, el etilenglicol fue almacenado en un desecador con sílice para prevenir reabsorción de humedad del ambiente.

En el caso del glicerol, el sulfato de sodio no pudo ser usado debido a que éste resultó ser soluble en glicerol. Por lo tanto, el secado fue realizado durante 2 horas por rotoevaporación en condiciones de operación constantes de: temperatura de 80°C, presión de 90 mbar y agitación de 80 rpm. Finalmente, el glicerol obtenido fue almacenado en un desecador con sílice para prevenir reabsorción de humedad del ambiente.

La humedad de cada adsorbente fue medida por el método coulombimétrico de Karl- Fischer (KF) según la norma ASTM E203 [17]. El análisis se hizo por triplicado.

1.5 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ABSORCIÓN

Para cada uno de los absorbentes se prepararon muestras en cajas Petri de 9 cm de diámetro previamente pesadas y etiquetadas, conteniendo aproximadamente 6,37 ml de absorbente para lograr una película de 1mm de espesor. Las cajas fueron inicialmente pesadas con tapa antes de su ingreso a la cámara de atmósfera controlada. En cada prueba de absorción se utilizaron dos muestras de absorbentes.

Para el inicio de cada prueba, la cámara de atmósfera controlada fue inicialmente estabilizada a las condiciones de absorción ya definidas por las pruebas preliminares (ítem 1.2). Una vez estas alcanzadas, las cajas Petri fueron

introducidas sin tapa con el fin de mantener el absorbente en contacto con el aire húmedo.

Durante la prueba las muestras fueron pesadas cada hora por 10 horas; siguiendo en la unidad de absorción, se pesaron a las 20 hasta las 24 horas cada hora. El transporte de las cajas Petri desde la cámara a la balanza se realizó con tapa, con el fin de evitar alteraciones del medio ambiente.

Cabe aclarar que en la práctica, en la región de la Guajira, el proceso de absorción usando un sistema de absorción de humedad del ambiente se daría aproximadamente durante 10 horas, correspondientes al periodo de oscuridad y mayor humedad que se da en la región, de acuerdo a la hora mínima de salida del sol y a la hora máxima de puesta del sol en esa región del país [18].

1.6 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DESORCIÓN

Para determinar si el proceso de desorción del agua en el absorbente es viable se realizó un análisis de los datos obtenidos en la absorción (ítem 1.5) y las condiciones que se pueden obtener en la unidad de desorción (ítem 1.3.2).

La desorción se realiza con una muestra en la cámara de atmósfera controlada. Estas muestras se prepararon en cajas Petri de 9 cm de diámetro previamente pesadas y etiquetadas. En ellas se incorporó aproximadamente 6,37 ml de absorbente para lograr una película de 1mm de espesor. Cada caja Petri fue pesada con tapa y se determinó el peso agregado de absorbente. Posteriormente, se le incorporó agua destilada suficiente para garantizar la fracción másica que se obtuvo después de 10 horas en el proceso de absorción (ítem 1.5). La caja Petri con su tapa fue pesada nuevamente antes de su ingreso a la cámara de atmósfera controlada en donde se retiró la tapa para permitir la evaporación del agua presente en la sustancia absorbente.

Durante la prueba las muestras fueron pesadas cada hora por 10 horas; siguiendo en la unidad de desorción, se pesaron a las 20 hasta las 24 horas cada hora . El transporte de las cajas Petri desde la cámara a la balanza se realizó con tapa, con el fin de evitar alteraciones por el medio ambiente. Este proceso se realizó por duplicado para cada sustancia absorbente.

Cabe señalar que en la práctica, el proceso de desorción que se realizaría en un sistema de recuperación de humedad del ambiente a ubicar en la región de la Guajira, sucedería solamente durante 8 horas, de acuerdo a los mapas de brillo solar del país [19].

Adicionalmente, se analizará la posibilidad de un escenario usando dos días para absorción del agua y un día de desorción. Por tanto, se realizó el mismo tipo de ensayo con una fracción másica de agua en el absorbente igual a la obtenida después de 20 horas de absorción (ítem 2.5).

1.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una parte del análisis de resultados se realizó aplicando un modelo de absorción para sistemas transitorios propuesto en el libro de Fenómenos de Transporte de Bird[20]. La Ecuación 1 de continuidad que define la transferencia de masa a través de la interfase aire-solvente generada durante los procesos de absorción y desorción en el sistema estudiado. La Figura 4 esquematiza el fenómeno de transferencia que se estaría dando durante el proceso de absorción (a) y desorción (b).

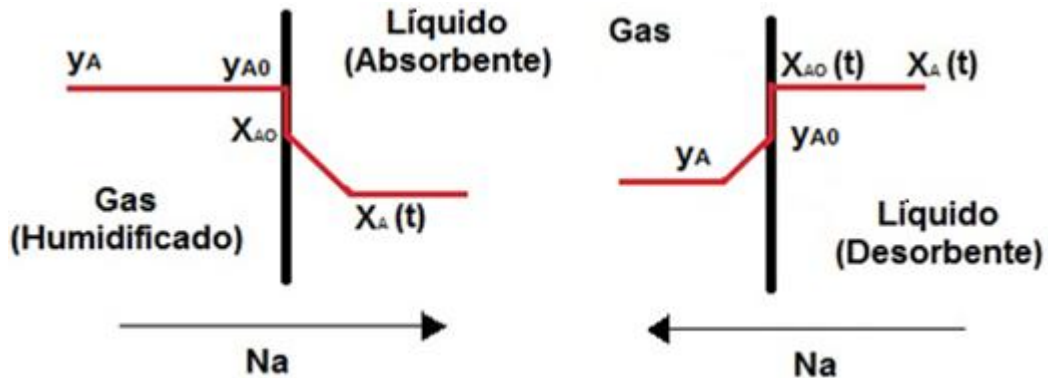
$$\frac{\partial x_A}{\partial t} - (v_z^*) \frac{\partial x_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 x_A}{\partial z^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$v_z^* = \frac{D_{AB}}{1-x_{A0}} \frac{\partial x_A}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde t es el tiempo de absorción (o desorción), z corresponde a la distancia entre la mayor concentración y la menor concentración, x_{A0} corresponde a la fracción molar en la interfase para la absorción y y_{A0} para la desorción, x_A corresponde a la fracción molar en fase líquida en el seno del absorbente (caso absorción) o fracción molar en fase gaseosa en el seno del aire húmedo (caso desorción, y_A en la Figura 4), D_{AB} es la Difusividad del agua en el absorbente (en caso de absorción) o en el aire (en caso de desorción) y v_z^* la velocidad promedio molar en dirección de la transferencia de masa.

Figura 4. Transferencia de masa del soluto A a través de la película formada al lado de la interfase gas-líquido en a) la etapa de absorción y b) la etapa de desorción.



El modelo propuesto debe ser resultado teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

- | | | |
|------|-------------------|-----------------|
| C.I. | Para $t = 0$ | $x_A = 0$ |
| C.F. | Para $z = 0$ | $x_A = x_{A,0}$ |
| C.F. | Para $z = \infty$ | $x_A = 0$ |

Este tipo de modelo puede ser resuelto por medio de la Función Error la cual permite definir el perfil de la concentración de soluto en el solvente durante la absorción (o en el aire, para el caso de desorción) en función del tiempo usando las variables adimensionales X y Z como lo muestra las Ecuaciones 3 a 7.

$$X(Z) = 1 - \frac{\text{erf}(Z-\varphi) + \text{erf}\varphi}{\text{erf}\infty + \text{erf}\varphi} = \frac{1 - \text{erf}(Z-\varphi)}{1 + \text{erf}\varphi} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$$X = \frac{x_A}{x_{A0}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Z = \frac{z}{\sqrt{4D_{AB}t}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde φ corresponde a la velocidad promedio molar descrita de forma adimensional como lo presenta la Ecuación 6.

$$\varphi = v_z^* \sqrt{t/D_{AB}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Esta puede representarse en función de la concentración en interfase (x_{A0}) como lo muestra la Ecuación 7.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{x_{A0}}{1-x_{A0}} \frac{\exp(-\varphi^2)}{1+\text{erf}(\varphi)} \quad \text{Ecuación 7}$$

El valor de x_{A0} es definido por el equilibrio de fases, el cual en este estudio es asumido como ideal y regido por la ley de Raoult. Es sistema es considerado isotérmico.

Debido que la ecuación 7 se encuentra en función de la misma variable, suponemos valores de la velocidad promedio molar (φ) entre cero e infinito; Se

calculo la función error utilizando expansión de serie infinita (Ecuación 8)[21].
Calculando x_{A0} como lo muestra la Ecuación 9.

$$\operatorname{erf}(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \varphi^{2n+1}}{n!(2n+1)} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$x_{A0} = \frac{1}{1 + [\sqrt{\pi}(1 + \operatorname{erf}(\varphi)\varphi \exp \varphi^2)]^{-1}} \quad \text{Ecuación 9}$$

De acuerdo a los datos calculados con las ecuaciones 8 y 9; y el valor de x_{A0} definido por el equilibrio de fases, encontramos el valor de la velocidad promedio molar(φ) en cada caso.

Es posible calcular la velocidad de producción de vapor desde una superficie de área S, como lo presenta la ecuación 10.

$$\frac{dV_A}{dt} = \frac{N_{AZ0}S}{c} = S\varphi \sqrt{\frac{D_{AB}}{t}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Resolviendo el modelo se encuentra la siguiente expresión:

$$V_A = S\varphi \sqrt{4D_{AB}t} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde V_A es el volumen de agua que se puede obtener después de un tiempo t, S es el área de transferencia, φ es una velocidad promedio adimensional, D_{AB} es la difusividad del solvente.

El valor de D_{AB} fue obtenido a partir de minimización de la función objetivo descrita en la Ecuación 12.

$$f = \frac{\sum_1^n (|V_{A_{exp}}^2 - V_{A_{cal}}^2|)}{n} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde $v_{A_{exp}}$ y $v_{A_{cal}}$ corresponde al valor obtenido experimentalmente y calculado usando el modelo, respectivamente, de la cantidad de agua absorbida (en el caso de absorción) o la cantidad de agua perdida (en el caso de desorción). Los valores de $v_{A_{cal}}$ fueron calculados por iteración asignando un valor inicial a D_{AB} hasta minimizar la función objetivo a su valor más bajo posible.

Para el análisis de los datos de absorción se evaluó la relación de la masa de agua absorbida en gramos [g] por el volumen de solvente usado en litros [L] versus el tiempo en horas [h]. Por otra parte, para el análisis de los datos de desorción se calculó el porcentaje de agua recuperada [%], usando la Ecuación 13, en función del tiempo en horas [h].

$$\% \text{ Agua recuperada} = \frac{\text{Agua inicial}[g] - \text{Agua en el tiempo}[g]}{\text{Agua inicial}[g]} * 100 \quad \text{Ecuación 13}$$

El agua inicial es el agua que se agrega inicialmente antes del proceso de desorción, mientras que el agua en el tiempo es el agua presente en el solvente después de un tiempo de desorción determinado.

Una vez determinado los coeficientes de difusión, se calculó el área de transferencia necesaria para un volumen de agua recuperado por el sistema que puede abastecer un grupo familiar de 4 personas. Esto con el fin de determinar la viabilidad técnica del proceso para los diferentes escenarios propuestos. Se consideró un consumo per cápita aproximado de 50 L/día; dato de la OMS para acceso intermedio que asegura consumo e higiene básica personal y de alimentos [22]. Por medio de este volumen de agua podemos encontrar un área de transferencia necesaria usando la Ecuación 11.

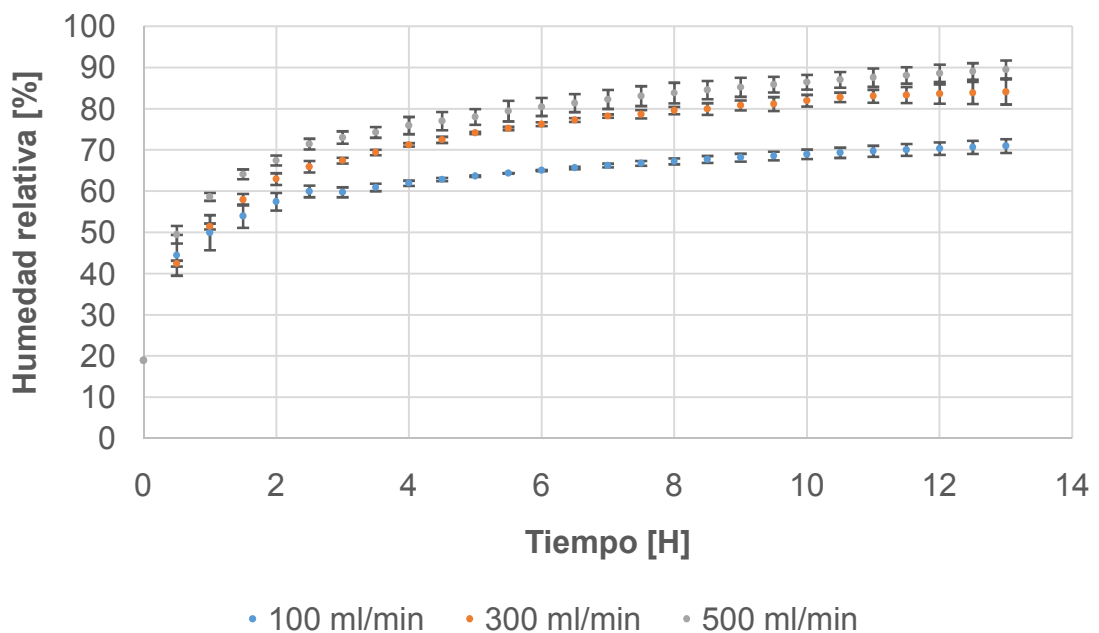
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 PRUEBAS PRELIMINARES

2.1.1 Estabilización de la unidad de absorción

En la Figura 5 se presentan los valores de humedad relativa [%] en función del tiempo [h] medidos durante las pruebas de estabilización de la unidad. Se puede observar que la humedad final alcanzada en la cámara depende del flujo de aire que entra en la misma, encontrándose que en todos los casos es posible obtener una humedad superior a 70%. Este valor fue tomado como referencia por ser el observado en la región de Riohacha en horas nocturnas según datos del IDEAM. Por otro lado, se observa que dicha humedad es más rápidamente alcanzada con el mayor flujo estudiado, 500 ml/min (aproximadamente en 2h) siendo éste el valor adoptado para las pruebas de absorción.

Figura 5. Humedad relativa vs tiempo: Etapa de estabilización de la unidad de absorción usando diferentes flujos de aire.



Con base en ello, se realizaron tres pruebas adicionales en esas condiciones registrando temperatura y humedad como descrito en la metodología. La media de los datos y el intervalo de confianza a 95% para cada uno de ellos son presentados en la Tabla 1. De acuerdo con la tabla, se observa que la temperatura promedio de la unidad es de $22,9 \pm 0,9^{\circ}\text{C}$; muy cercana a la temperatura mínima de $23,9^{\circ}\text{C}$ registrada por la región de Riohacha (datos IDEAM). La humedad relativa por su lado es de $69 \pm 5,7\%$, próxima a la humedad de Riohacha, estimada a 72%, aproximadamente, según datos del IDEAM.

Tabla 1. Temperatura y humedad relativa alcanzadas en las pruebas preliminares para los ensayos posteriores de absorción con un flujo de aire de 500 ml/min.

Tiempo [horas]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Humedad relativa [%]
0	$22,40 \pm 1,29$	$70,00 \pm 6,79$
1	$23,10 \pm 1,60$	$68,00 \pm 5,66$
2	$23,40 \pm 1,18$	$68,00 \pm 4,57$
3	$22,90 \pm 0,39$	$68,00 \pm 4,57$
4	$22,30 \pm 0,86$	$69,00 \pm 4,71$
5	$22,70 \pm 0,63$	$69,00 \pm 6,30$
6	$23,30 \pm 0,58$	$69,00 \pm 7,42$
Promedio	$22,90 \pm 0,90$	$69,00 \pm 5,70$

2.1.2 Estabilización de la unidad de desorción

La Tabla 2 presenta la media y el intervalo de confianza a 95% de las medidas de temperatura y humedad registrados durante las 6 horas de prueba. La temperatura promedio alcanzada fue de $43,6 \pm 1,56^{\circ}\text{C}$, muy cercana a 45°C ; temperatura máxima en Riohacha según el IDEAM en horas diurnas. Por otro lado, se observó una humedad relativa promedio de $32 \pm 2,92\%$. Esta humedad corresponde a la máxima alcanzada durante la estabilización, la cual es baja con respecto a la

reportada por el municipio de Riohacha; 55% aproximadamente. Debido a la imposibilidad de obtener experimentalmente una humedad superior, las pruebas de desorción se realizaron a la humedad máxima obtenida.

Tabla 2. Temperatura y humedad relativa alcanzadas en las pruebas preliminares de desorción.

Tiempo [horas]	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]
0	44,30 ± 1,35	32,00 ± 2,81
1	44,10 ± 1,13	33,00 ± 2,94
2	43,50 ± 0,96	33,00 ± 3,70
3	42,40 ± 0,94	33,00 ± 2,53
4	43,40 ± 1,19	32,00 ± 2,70
5	43,70 ± 1,35	33,00 ± 3,05
6	43,60 ± 1,14	32,00 ± 2,70
Promedio	43,60 ± 1,56	32,00 ± 2,92

2.2 SECADO Y ANÁLISIS DE HUMEDAD DE ABSORBENTES

Luego de realizar el proceso de secado de los absorbentes (ítem 1.4) se procedió a la determinación de su humedad encontrándose un valor promedio inicial del etilenglicol después del secado de $1384,33 \pm 100,20$ ppm y del glicerol de $5857,67 \pm 119,36$ ppm.

2.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ABSORCIÓN

En la Tabla 3 resume las condiciones iniciales de los absorbentes utilizados y las condiciones en la unidad durante el proceso de absorción, mencionados en los ítems anteriores.

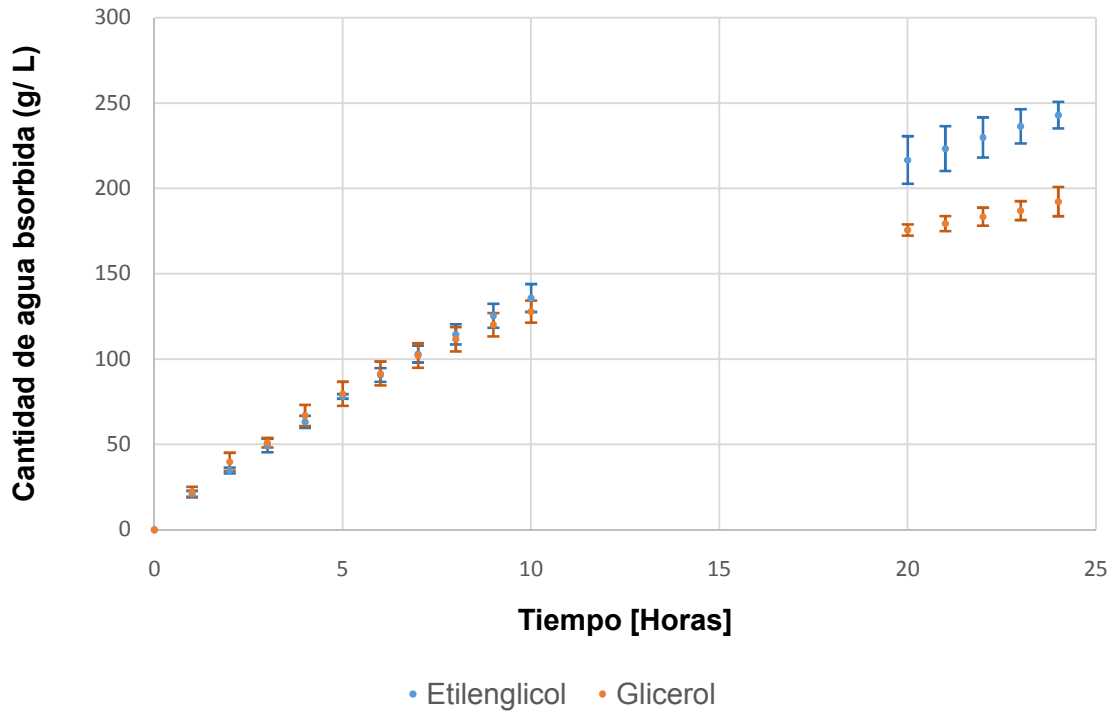
Tabla 3. Condiciones iniciales de los absorbentes y la unidad en el proceso de absorción.

Condiciones iniciales	ABSORBENTE	
	Etilenglicol	Glicerol
Humedad [ppm]	1384,33 ± 100,20	5857,67 ± 119,36
Volumen aproximado [ml]	12,7	12,7
Peso [g]	13,8597 ± 0,0436	15,3163 ± 0,2000
Condiciones iniciales	UNIDAD DE ABSORCIÓN	
Temperatura [°C]	22,9 ± 0,9	
Presión [mmHg]	680	
Humedad relativa [%]	69 ± 5,7	
Flujo de aire [ml/min]	500	
Tiempo de proceso [Horas]	10	

En la Figura 6 podemos observar los resultados obtenidos después de realizar las pruebas de absorción (ítem 1.5). Encontramos que para las primeras 10 horas la cantidad de agua absorbida por las dos sustancias es aproximadamente la misma $135,79 \pm 8,14$ g/L de etilenglicol y $127,84 \pm 6,45$ g/L de glicerol. Por otro lado, se observa que pasadas 20 horas el etilenglicol sigue absorbiendo con la misma rapidez a diferencia de lo que sucede con el glicerol, el cual absorbe mucho menos en ese mismo lapso de tiempo. De hecho, la relación agua-absorbente después de 20h de proceso fue evaluada en aproximadamente $216,60 \pm 13,94$ g/L para el etilenglicol y de $175,63 \pm 3,24$ g/L para el glicerol (Los datos en tabla se encuentran en el Anexo A).

Aunque existen documentos que propone el uso de etilenglicol como absorbente en este tipo de proceso de recuperación de humedad del ambiente [12, 13], lamentablemente, estos no reportan resultados de eficiencia de absorción por lo que los resultados aquí publicados no pueden compararse con la literatura actual.

Figura 6. Pruebas de absorción. Relación peso de agua / volumen de absorbente contra tiempo de absorción para el etilenglicol y el glicerol.



Teniendo en cuenta las condiciones de operación presentadas en la Tabla 3, los valores de fracciones molares de agua en el absorbente (x_A) para cada tiempo (t) y la presión de saturación del agua a esas condiciones (para el cálculo de la fracción molar de agua en la interfase, x_{A0}) se determinó el coeficiente de difusión según el modelo descrito anteriormente (Ecuación 12), con velocidad promedio molar (φ) constante ya que ésta depende del valor de (x_{A0}). El valor del coeficiente de difusividad calculado fue de $6,68 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{h}$ para el etilenglicol y de $4,29 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{h}$ para el glicerol. Para esos valores, la función objetivo obtenida fue de 0,4749 y 0,0560, respectivamente.

2.4 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DESORCIÓN

Según lo descrito en la metodología, para la desorción se agregó la cantidad de agua correspondiente a la misma absorbida luego de un periodo de 10 horas. Esto con el fin de simular un ciclo de absorción-desorción de 1 día.

Del Anexo A se puede observar que para el etilenglicol, la fracción molar en la fase líquida luego de 10 horas de absorción es $0,2983 \pm 0,0124$, esta fracción molar en fase gaseosa (y_{Ao}) utilizando la ley de Raoult es $0,0298 \pm 0,0012$ y correspondería a la fracción de inicio de las pruebas de desorción. Esta es inferior a la fijada en la cámara de atmósfera controlada (Humedad relativa de 32%, fracción molar del agua en el aire, y_A , de 0,0320, aproximadamente) y por lo tanto no permitiría una transferencia de masa. En consecuencia, se concluye que la cantidad de agua absorbida luego de 10 horas usando etilenglicol como solvente no es suficiente para que pueda ser recuperada en un ciclo 1 día.

En el caso del glicerol, la fracción molar líquida luego de las 10 horas del proceso de absorción es de $0,3414 \pm 0,0114$. Según el equilibrio de fases (aplicando Ley de Raoult) la composición en fase gaseosa de agua, y_{Ao} , es de $0,0342 \pm 0,0011$, aproximadamente, superior a la composición molar el aire en la cámara para una Hr de 32% ($y_A = 0,0320$). Se concluye entonces que el glicerol puede ser usado en ciclos de 1 día/1 día.

La Tabla 4 muestra las condiciones iniciales de las pruebas de desorción, las cuales se llevaron a cabo exclusivamente con glicerol. Se realizaron pruebas agregando cantidad exacta de agua al absorbente de manera a lograr la concentración de agua obtenida en las pruebas de absorción a 10 y 20 horas de operación. De acuerdo con el anexo A, la concentración inicial de agua en el absorbente pasadas 20 horas de absorción es de $0,4161 \pm 0,0045$. Las pruebas

con la humedad de 20 horas se hicieron pensando en una posible aplicación de dos ciclos de absorción por uno de desorción.

Tabla 4. Condiciones iniciales del absorbente y la unidad en el proceso de desorción.

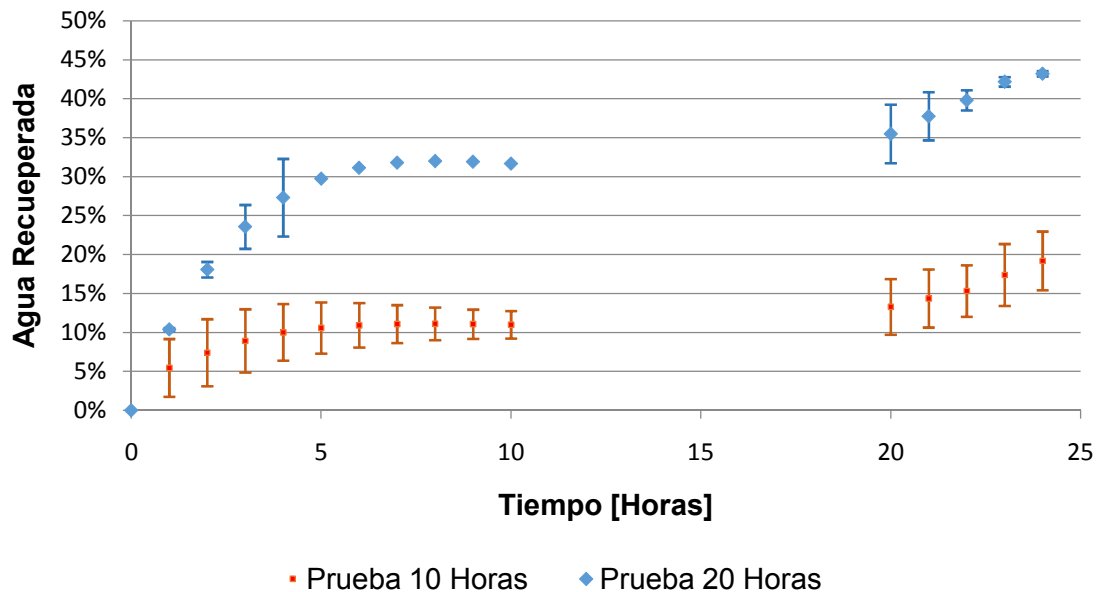
Condiciones iniciales	ABSORBENTE - GLICEROL	
	10 horas	20 horas
Humedad del absorbente [ppm]	5857,67 ± 119,36	5857,67 ± 119,36
Volumen aproximado [ml]	6,37	6,37
Peso glicerol [g]	7,8057 ± 0,1078	7,7144 ± 0,0159
Peso Agua destilada agregada [g]	0,8557 ± 0,0042	1,1740 ± 0,0098
Condiciones iniciales	UNIDAD DE DESORCIÓN	
Temperatura [°C]	43,6 ± 1,56	
Humedad relativa [%]	32 ± 2,92	
Tiempo de proceso [Horas]	8	

En la Figura 7 se puede observar la variación de la cantidad de agua eliminada por desorción en función del tiempo. La mayor recuperación de agua se da cuando la concentración de agua en el glicerol inicial es más alta, lo cual es completamente coherente con un proceso clásico de difusión molecular. Se observa además que el proceso se da principalmente en las primeras 5 horas.

En la comparación de los dos procesos de desorción estudiados. Se observa que el comportamiento de ambos procesos tiene la misma tendencia (ver Figura 7), pero en las primeras horas rápidamente se distancian uno del otro debido a que la diferencia entre la humedad del aire y la concentración molar de agua en el glicerol es más grande para la prueba de 20 horas, lo que le otorga una velocidad de desorción mayor en comparación a la prueba después de 10 horas de absorción, y por lo tanto se logra desorber mayor cantidad de agua en un periodo de tiempo más corto. Si se consideran las 8 horas de exposición solar para la

desorción, las pruebas realizadas muestran que para ese lapso, sólo se recuperaría un $11,12 \pm 2,10\%$ y $31,99 \pm 3,81\%$, aproximadamente, del agua inicial presente el absorbente que estuvo en un proceso de absorción anterior por 10h y 20h, respectivamente.

Figura 7. Pruebas de desorción. Porcentaje de agua recuperada por glicerol contra tiempo de desorción, en pruebas de 10 y 20 horas de absorción.

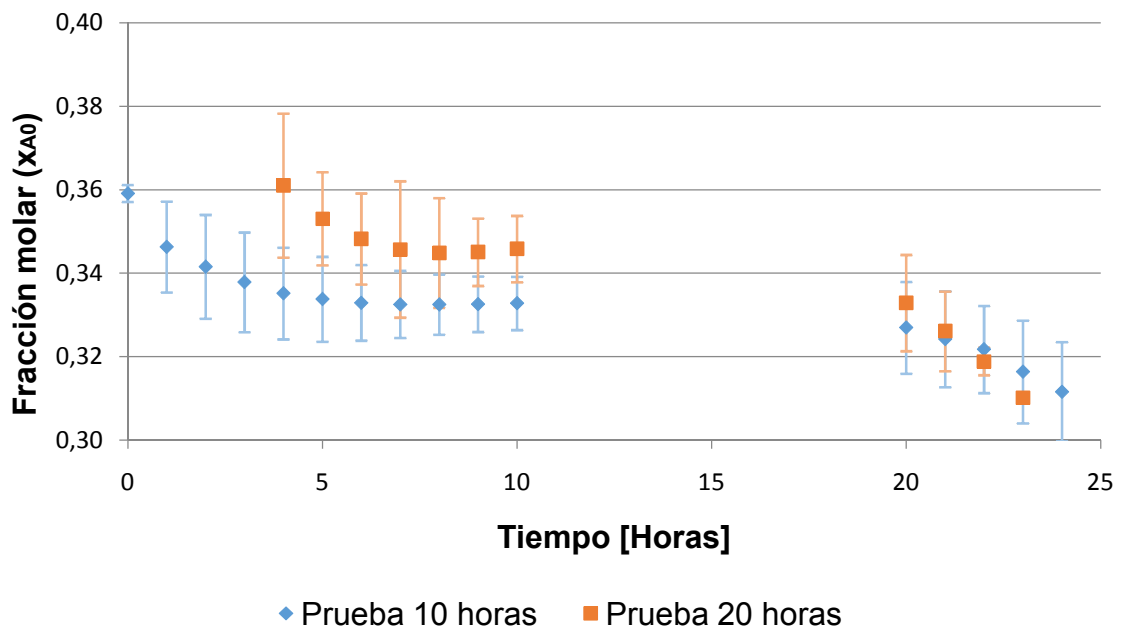


Siguiendo con el modelo planteado y resolviendo de la misma forma que para el proceso de absorción, encontramos que la difusividad para el proceso de desorción después de diez horas de absorción es igual a $1,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{h}$ y después de 20 horas de absorción es igual a $2,01 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{h}$. Los respectivos valores de la función objetivo fueron de 0,00279 para la prueba de 10 horas de absorción y 0,030 para la prueba de 20 horas de absorción. Ya que se habla del mismo solvente y el mismo soluto, la difusividad debería tener un mismo valor en ambos casos. La Figura 8 presenta un comparativo entre la fracción molar en interfase del agua (x_{A0}) vs tiempo de desorción para la prueba de 10 y 20 horas de absorción iniciando al mismo valor de concentración. Bajo ese criterio, se puede

comparar el fenómeno de transferencia usando la misma fuerza motriz. En el caso de la prueba de 20h de absorción, la concentración de agua en interfase llega a ser igual a la inicial de la prueba de 10h después de un lapso de 10h de desorción (Ver Anexo B, concentración en tiempo inicial de la Tabla 7 y concentración en tiempo 10h de la Tabla 8). Según la figura, el fenómeno de transferencia estudiado es igual a iguales condiciones de gradiente de concentración, lo que permite asegurar entonces que el coeficiente de difusión debe entonces ser el mismo, coherente con la literatura.

Por lo tanto, la diferencia observada en el cálculo de la difusividad puede explicarse cómo una diferencia en la precisión del cálculo asociado al uso de gradientes de concentración diferentes. Para este estudio se consideró entonces, el valor de la difusividad determinada usando la prueba de 20h de absorción

Figura 8. Pruebas de desorción. Fracción molar (x_{A0}) vs tiempo de desorción, en pruebas de 10 y 20 horas de absorción a partir de una concentraciones igual.



Según el consumo de agua per cápita de 50 L/día, para cuatro personas serian 200 L/día y en un mes serian aproximadamente 6000 L/mes por núcleo familiar [20]. Esto corresponde a 6 m³ de agua al mes o 400 L de agua por dos días que es la cantidad de agua necesaria después de dos ciclos de absorción para poder suplir la demanda de agua.

La recuperación de un volumen de 400 L al final de la etapa de desorción, implica inicialmente que se deben absorber 1250L de agua durante la etapa de absorción, ya que el agua recuperada después de la absorción corresponde al $31,99 \pm 3,81\%$ del agua absorbida después de 8 horas de desorción. (Datos en Tabla 8, Anexo B).

Para el cálculo de área de transferencia en la etapa de absorción se considera una velocidad promedio molar (φ) constante de 0,575 calculado según una tabla de x_{A0} en función de φ generada a partir de la ecuación 9 y se asume un tiempo de absorción de 20h. El área calculada para la etapa de absorción es de 3710,8 m².

Para el caso de la etapa de desorción, la velocidad promedio molar (φ) es variable, la cual se calcula usando el promedio de los datos calculados por medio de la tabla anteriormente generada con la ecuación 9 obteniéndose un valor de 0,0177. El área de transferencia para la etapa de desorción fue calculada en 8910,74 m².

3. CONCLUSIONES

Los resultados de absorción y desorción muestran que tanto el etilenglicol y el glicerol son buenos absorbentes, recuperando aproximadamente la misma cantidad de agua en un lapso de 10h; tiempo estimado para realizar la absorción en la región de Riohacha. Se observa que usando dos ciclos de 10 h, es decir 20 horas de absorción se favorece la transferencia de masa ya que el gradiente de concentraciones o fuerza motriz es mayor.

Los resultados de absorción permiten descartar al etilenglicol como absorbente debido a que la fracción molar obtenida en interfase (y_{A0}) después de 10h de absorción es más baja que la presente en el aire; impidiendo la dirección del flujo necesaria para un proceso de desorción. Por tanto, se consideró al glicerol como el absorbente indicado para realizar la recuperación de agua del ambiente. Esto se favorece con otras razones, como su costo y la minimización de riesgos de intoxicación por ingestión del absorbente, ya que el glicerol o glicerina grado alimentario (United States Pharmacopeia, USP) de la industria químicos & sabores S.A. de bajo costo y de menor riesgos para la salud que el etilenglicol.

Este estudio muestra que sólo es posible recuperar hasta un 31%, aproximadamente, del agua absorbida (en un ciclo de 2 días de absorción y 1 día de desorción), lo cual conlleva a necesidades de área de transferencia elevadas si se desea satisfacer las necesidades de agua a un núcleo familiar de 4 personas en la región de Riohacha. Las áreas calculadas son cercanas a 9000 m², para la etapa de desorción, y de casi 4000m², para la etapa de absorción. Se concluye por tanto que no existe una viabilidad técnica del proceso propuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.utp.edu.co/internacional/colombia>. Acceso el 03 de marzo de 2015.
- [2] Cámara de comercio de la Guajira. Informe socioeconómico del departamento de la Guajira 2014. Enero de 2015. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.camaraguajira.org/publicaciones/informes/informe-socio-economico-la-guajira-2014.pdf>. Acceso el 03 de marzo de 2015.
- [3] Escuela Naval Almirante Padilla. Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Riohacha. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/Climatologia%20Riohacha.pdf>. Acceso el 04 de marzo de 2015.
- [4] Defensoría del Pueblo. Colombia. Crisis humanitaria en la Guajira 2014. Acción integral de la Defensoría del Pueblo en el departamento. Bogotá D.C., 2014. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/informedefensorialguajira11.pdf> Acceso el 04 de marzo de 2015.
- [5] Programa de las naciones unidas para el desarrollo PNUD. La Guajira 2012. Estado de avances de los objetivos de Desarrollo del Milenio. [Sitio de internet]. Disponible en: http://www.pnud.org.co/2012/odm2012/odm_guajira.pdf. Acceso el 03 de marzo de 2015.
- [6] Dane. La Guajira: Pobreza monetaria 2013. Resultados generales - Pobreza monetaria y desigualdad - 2013. [Sitio de internet]. Disponible en:

https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/pobreza/Guajira_Pobreza_2013.pdf. Acceso el 03 de marzo de 2015.

- [7] El Espectador. Represa del río Ranchería cumple solo uno de los cuatro objetivos para los que se construyó. Agosto 21 de 2014. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.elespectador.com/noticias/nacional/represa-del-rio-rancheria-cumple-solo-uno-de-los-cuatro-articulo-511900>. Acceso el 15 de Marzo de 2015.
- [8] Minvivienda. Llega el agua para la Guajira a través de la excavación de pozos profundos. Enero 17 de 2015. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2015/enero/llega-el-agua-para-la-guajira-a-traves-de-excavacion-de-pozos-profundosminvivienda>. Acceso el 16 de Marzo de 2015.
- [9] BBC. El milagro de convertir el aire en agua potable. Marzo 5 de 2013. [Sitio de internet]. Disponible en: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/03/130304_agua_aire_peru_ap. Acceso el 16 de Marzo de 2015.
- [10] RT. Chilenos inventan un dispositivo que transforma el aire en agua. Diciembre 24 de 2015. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://actualidad.rt.com/ciencias/161381-chile-agua-aire-dispositivo>. Acceso el 16 de Marzo de 2015.
- [11] La Bioguia. Una torre que convierte aire en agua potable. Abril 7 de 2015. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.labioguia.com/notas/una-torre-que-convierte-aire-en-agua-potable>. Acceso 10 de Junio de 2015.
- [12] Tsymerman Alexander. Watertech M.A.S Ltd. Method and apparatus for extracting water from atmospheric air. 8 de enero de 2002.

- [13]Ahmed M. Hamed, Ayman A. Aly, El-Shafei B. Zeidan. Application of Solar Energy for Recovery of Water from Atmospheric Air in Climatic Zones of Saudi Arabia.Egypt. January 25th, 2011.
- [14] ToxFAQsTM sobre el etilenglicol. Agency for toxic Substances and Disease Registry. Division of Toxicology and Health Human Sciences. Noviembre de 2010
- [15]Cardona-Alzate, Carlos Ariel. Posada-Duque, John Alexander. Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiésel. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), enero-junio de 2010.
- [16]Salaverry García Oswaldo. Pigmentos Naturales Quinónicos. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Apéndice II. Pag. 259-263. Editorial UNMSM. 1998
- [17]ASTM INTERNATIONAL. Helping our world work better. Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration. 2008.
- [18]Time Genie. Amanecer y puesta del sol en la Guajira colombiana. [Sitio de internet].Disponible en: http://www.por.timegenie.co/sunrise_sunset/state/colag. Acceso 15 de junio de 2015.
- [19]Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ministerio de Minas y Energía. Mapa de brillo solar. República de Colombia. [Sitio de internet]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Brillo_Solar.pdf. Acceso 24 de agosto de 2015.
- [20]BIRD R. Byron. STEWART Warren E. LIGTHFOOT Edwin N. Transport Phenomena. Second Edition. Páginas 614-615.

[21]Función Error. [Sitio de internet]. Disponible en:
<http://tecno.cruzferro.com/formularios/error>. Acceso 27 de septiembre de 2015.

[22]HOWARD Guy. BARTRAM Jamie. Domestic Water Quantity, Service Level and Health. World Health Organization 2003. [Sitio de internet]. Disponible en:
http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1. Acceso 20 de septiembre de 2015.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed M. Hamed, Ayman A. Aly, El-Shafei B. Zeidan. Application of Solar Energy for Recovery of Water from Atmospheric Air in Climatic Zones of Saudi Arabia. Egypt. January 25th, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Helping our world work better. Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration. 2008.

BIRD R. Byron. STEWART Warren E. LIGHTFOOT Edwin N. Transport Phenomena. Second Edition. Páginas 614-615.

Cámara de comercio de la Guajira. Informe socioeconómico del departamento de la Guajira 2014. Enero de 2015. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.camaraguajira.org/publicaciones/informes/informe-socio-economico-la-guajira-2014.pdf>. Acceso el 03 de marzo de 2015.

Cardona-Alzate Carlos Ariel, Posada-Duque John Alexander. Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiésel. 24 de marzo de 2010. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 14 (1): 9-27, enero-junio de 2010.

Defensoría del Pueblo. Colombia. Crisis humanitaria en la Guajira 2014. Acción integral de la Defensoría del Pueblo en el departamento. Bogotá D.C., 2014. [Sitio de internet]. Disponible en: <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/informedefensorialguajira11.pdf> Acceso el 04 de marzo de 2015.

Escuela Naval Almirante Padilla. Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Riohacha. [Sitio de internet]. Disponible en:

<http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/Climatologia%20Riohacha.pdf>.

Acceso el 04 de marzo de 2015.

McCabe, W.L., Smith, J.C. i Harriot, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta edición. México: McGraw-Hill, 2002.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ministerio de Minas y Energía. Mapa de brillo solar. República de Colombia. [Sitio de internet]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Brillo_Solar.pdf. Acceso 24 de agosto de 2015.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ministerio de Minas y Energía. Mapa de radiación solar global. República de Colombia. [Sitio de internet]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf. Acceso 24 de agosto de 2015

Rivera, Judith. Pérez, Melina. Empleo del sistema potenciométrico Karl-Fischer en el desarrollo y la certificación de materiales de referencia (MR). Centro Nacional de Metrología. Simposio de Metrología. 25 al 27 de octubre de 2006. México.

Salaverry García Oswaldo. Pigmentos Naturales Quinónicos. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Apéndice II. Pag. 259-263. Editorial UNMSM. 1998

Tsymerman Alexander. Watertech M.A.S Ltd. Method and apparatus for extracting water from atmospheric air. 8 de enero de 2002.

Treybal, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. 2 ed. Editorial McGraw-Hill, 1967.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS DEL PROCESO DE ABSORCION.

En la tabla 5 observamos los datos obtenidos en el proceso de absorción para etilenglicol; en gramos de agua / litro de etilenglicol y en fracción molar de agua en etilenglicol de acuerdo al tiempo de absorción.

Tabla 5. Datos de absorción para etilenglicol en g de agua/L y fracción molar.

Tiempo [h]	Etilenglicol	
	g de agua / L	Fracción molar(x_{A0})
0	0,0000 ± 0,0000	0,0000 ± 0,0000
1	20,9856 ± 1,8893	0,0617 ± 0,0052
2	34,8247 ± 1,7051	0,0983 ± 0,0043
3	49,4406 ± 3,9488	0,1340 ± 0,0093
4	63,3260 ± 3,5288	0,1655 ± 0,0077
5	78,1743 ± 1,2830	0,1967 ± 0,0026
6	90,7318 ± 4,0348	0,2212 ± 0,0077
7	102,9329 ± 4,9181	0,2437 ± 0,0088
8	114,4832 ± 5,9138	0,2638 ± 0,0100
9	125,4217 ± 6,9982	0,2819 ± 0,0112
10	135,7877 ± 8,1385	0,2983 ± 0,0124
20	216,5995 ± 13,9440	0,4039 ± 0,0153
21	223,2812 ± 13,1169	0,4113 ± 0,0141
22	229,8178 ± 11,7960	0,4184 ± 0,0124
23	236,3142 ± 10,0521	0,4252 ± 0,0103
24	242,9295 ± 7,7441	0,4320 ± 0,0078

En la tabla 6 observamos los datos obtenidos en el proceso de absorción para glicerol; en gramos de agua / litro de glicerol y fracción molar de agua en glicerol de acuerdo al tiempo de absorción.

Tabla 6. Datos de absorción para glicerol en g de agua/L y fracción molar.

Tiempo [h]	Glicerol	
	g de agua / L	Fracción molar(x_{A0})
0	0,0000 ± 0,0000	0,0000 ± 0,0000
1	22,3448 ± 2,8694	0,0831 ± 0,0098
2	39,8906 ± 5,3197	0,1391 ± 0,0161
3	51,0655 ± 2,7411	0,1716 ± 0,0076
4	67,0019 ± 6,1537	0,2135 ± 0,0155
5	79,6826 ± 7,0812	0,2441 ± 0,0166
6	91,6169 ± 6,9957	0,2708 ± 0,0152
7	102,1414 ± 7,1588	0,2928 ± 0,0146
8	111,6309 ± 7,1094	0,3115 ± 0,0138
9	120,1701 ± 6,8671	0,3276 ± 0,0127
10	127,8438 ± 6,4515	0,3414 ± 0,0114
20	175,6320 ± 3,2421	0,4161 ± 0,0045
21	179,3812 ± 4,3503	0,4212 ± 0,0059
22	183,4372 ± 5,2895	0,4266 ± 0,0070
23	186,9679 ± 5,5406	0,4313 ± 0,0072
24	192,2544 ± 8,5672	0,4381 ± 0,0109

ANEXO B: DATOS DEL PROCESO DE DESORCIÓN.

En la tabla 7 observamos los datos obtenidos en el proceso de desorción para glicerol en la prueba de 10 horas de absorción; en porcentaje de agua recuperada y en fracción molar de agua en glicerol de acuerdo al tiempo de desorción.

Tabla 7. Datos de desorción para glicerol en la prueba de 10 horas de absorción en porcentaje de agua recuperada y fracción molar.

Tiempo [h]	Glicerol [Prueba 10 horas]	
	Porcentaje de agua recuperada	Fracción molar (x_{A0})
0	0,00 ± 0,00	0,3592 ± 0,0020
1	5,46 ± 3,71	0,3463 ± 0,0109
2	7,40 ± 4,30	0,3416 ± 0,0124
3	8,93 ± 4,05	0,3379 ± 0,0119
4	10,02 ± 3,64	0,3352 ± 0,0110
5	10,58 ± 3,30	0,3338 ± 0,0102
6	10,93 ± 2,84	0,3329 ± 0,0091
7	11,09 ± 2,43	0,3326 ± 0,0080
8	11,12 ± 2,10	0,3325 ± 0,0072
9	11,07 ± 1,88	0,3326 ± 0,0067
10	10,99 ± 1,77	0,3328 ± 0,0064
20	13,29 ± 3,57	0,3270 ± 0,0110
21	14,38 ± 3,73	0,3242 ± 0,0115
22	15,33 ± 3,30	0,3218 ± 0,0104
23	17,39 ± 3,97	0,3164 ± 0,0123
24	19,20 ± 3,76	0,3116 ± 0,0119

En la tabla 8 observamos los datos obtenidos en el proceso de desorción para glicerol en la prueba de 20 horas de absorción; en porcentaje de agua recuperada y en fracción molar de agua en glicerol de acuerdo al tiempo de desorción.

Tabla 8. Datos de desorción para glicerol en la prueba de 20 horas de absorción en porcentaje de agua recuperada y fracción molar.

Tiempo [h]	Glicerol [Prueba 20 horas]	
	Porcentaje de agua recuperada	Fracción molar (x_{A0})
0	0,00 ± 0,00	0,4375 ± 0,0016
1	10,38 ± 0,18	0,4108 ± 0,0010
2	18,06 ± 1,00	0,3893 ± 0,0044
3	23,56 ± 2,81	0,3728 ± 0,0101
4	27,31 ± 4,97	0,3610 ± 0,0172
5	29,71 ± 3,16	0,3531 ± 0,0112
6	31,11 ± 3,13	0,3482 ± 0,0109
7	31,79 ± 4,72	0,3457 ± 0,0163
8	31,99 ± 3,81	0,3449 ± 0,0131
9	31,89 ± 2,34	0,3451 ± 0,0081
10	31,67 ± 2,30	0,3458 ± 0,0080
20	35,84 ± 3,75	0,3329 ± 0,0115
21	37,76 ± 3,09	0,3261 ± 0,0095
22	39,80 ± 1,29	0,3189 ± 0,0033
23	42,18 ± 0,60	0,3103 ± 0,0009
24	43,22 ± 0,34	0,3064 ± 0,0026