

Ing. / MSc.

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

Nombre(s)

**OBTENCIÓN DE HIDROGELES DE INULINA PARA REMOCIÓN  
DE ARSÉNICO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**VANESSA ESTEFANÍA SÁNCHEZ MORENO**

**DIRECTOR: ING. GLORIA MARIBEL LUNA AGUILERA**

Mes, año

**Quito, Junio 2017**

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

**OBTENCIÓN DE HIDROGELES DE INULINA PARA REMOCIÓN DE  
ARSÉNICO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**VANESSA ESTEFANÍA SÁNCHEZ MORENO**

**DIRECTOR: ING. GLORIA MARIBEL LUNA AGUILERA**

**Quito, Junio 2017**

© Escuela Politécnica Nacional (2017)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Vanessa Estefanía Sánchez Moreno, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Vanessa Estefanía Sánchez Moreno

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Vanessa Estefanía Sánchez Moreno, bajo mi supervisión.

---

Ing. Maribel Luna M.Sc.  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIJ-15-15 “Obtención de hidrogeles y films a partir de inulina mediante radiación beta de un acelerador de electrones y reacciones de polimerización” que se ejecuta en el Departamento de Ciencias Nucleares.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios porque Él es el pilar fundamental de mi vida, sin Él no estaría aquí para escribir estas palabras. He tenido que atravesar duros momentos en la vida, sin embargo su amor siempre me ha sostenido en medio de la tempestad. Él me salvo en medio de mi sufrimiento cuando la felicidad era algo imposible para mí. Hoy puedo sonreír y ser feliz gracias a Él.

La vida se compone de muchas situaciones, unas dulces y otras amargas. Dios me enseñó que los momentos inolvidables, las personas únicas y buena actitud para recibir cada día como un obsequio son ingredientes para que nuestro paso por este mundo sea algo hermoso y maravilloso. Hoy quiero agradecer a cada persona valiosa, quienes como regalo del Señor me supieron guiar, dar la mano o tan solo brindar una sonrisa para poder llegar a este momento.

A mis padres porque han sido un apoyo incondicional en mi vida, especialmente a mi madre por ser esa mujer fuerte, sabia y luchadora; ella me ha enseñado que un trabajo realizado con amor trae consigo grandes bendiciones y alegrías.

A mis hermanos y a mi prima Samy quienes han sido los grandes compañeros de mi vida, han hecho de cada día algo hermoso, han sabido sacarme una sonrisa y apoyarme cuando más lo he necesitado.

A mi hermosa y grande familia quienes son una de las bendiciones más grandes que Dios me ha dado.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito por su colaboración en el desarrollo de este proyecto de titulación.

A mi directora de tesis, la Ing. Maribel Luna, por brindarme su apoyo, por saberme ayudar con una sonrisa y mucha paciencia, y por cada uno de los consejos que ha sabido brindarme para la culminación de este trabajo.

A los ingenieros Miguel Aldás, Lorena Jaramillo y Maribel Luna por permitirme ser parte del proyecto de investigación PIJ-15-15.

A la Dra. Florinella Muñoz por abrirme las puertas del Departamento de Ciencias Nucleares y por ser ejemplo de una profesional que ama su trabajo.

Al Dr. Paul Vargas y al Ing. Marco Sinche por su ayuda en la presentación de un buen trabajo de investigación y a todos los docentes del Departamento de Ciencias Nucleares.

A todos los trabajadores del acelerador de electrones por su apoyo y los momentos divertidos que compartimos con mucha amabilidad y cordialidad.

Al Ing. Edison Vera y mis amigos del Departamento de Ciencias Nucleares con quienes he compartido estos meses de trabajo; por sus conversaciones divertidas, sus consejos y el apoyo mutuo para lograr la meta tan anhelada.

A mis amigos, quienes me acompañaron durante toda la carrera e hicieron de este caminar una bendición, especialmente a Dianita. Gracias a ustedes he sido feliz durante todos estos años de estudio porque entre risas y malas noches aprendimos lo que significa ser ingeniero.

A mis superamigos Kenny y Paul quienes han sido un apoyo en medio de las dificultades, especialmente a mi amiga Kenny por ser incondicional durante todos estos años de estudio.

Finalmente a ti Freddy, no esperaba encontrarte en medio de este camino, pero has sido la bendición más grande que Dios ha sabido regalarme. Por enseñarme que hay más de una forma para hacer las cosas, por tenerme paciencia y contribuir a mi felicidad. Has sido el perfecto complemento para esta personita que te ama.



## DEDICATORIA

*A Dios por hacerme lo que soy y guiarme a esta carrera. Él y yo aún tenemos grandes sueños por cumplir.*

*A ti mamita querida porque has creído en mí y me has apoyado incondicionalmente.*

*Todas vuestras cosas sean hechas con amor*

*1 Corintios 16, 14*

# Obtención de Hidrogeles de Inulina con Radiación Beta para Remoción de Arsénico

**Resumen:** Hidrogeles de inulina fueron obtenidos y utilizados para la remoción de arsénico en aguas sintéticas. La síntesis fue inducida por radiación  $\beta$  en el acelerador lineal de electrones ELU-6U. Se irradiaron dos soluciones poliméricas, inulina-acrilamida (Inu-AAM) e inulina-alcohol polivinílico (Inu-PVA) y se evaluó la composición y la dosis de radiación. Las mejores concentraciones de los precursores AAM y PVA fueron de 22 y 7,5 % (w/w), respectivamente. Al mantener constantes estas concentraciones se evaluaron la relación inulina:precursor (20:80, 40:60 y 60:40) y la dosis de radiación (20, 30, 40 y 50 kGy) en un diseño experimental factorial mixto 4x3. La mejor relación inulina:precursor y dosis de radiación para obtener los hidrogeles de Inu-AAM fueron 20:80 y 30 kGy; y 20,78:79,12 y 20 kGy para los hidrogeles de Inu-PVA. Al caracterizar los dos hidrogeles sintetizados a estas condiciones, se obtuvieron los siguientes resultados: los valores de porcentaje de hinchamiento, contenido de agua en equilibrio y porcentaje de gelación fueron de 3 013 %, 96,81 % y 73,02 % para el hidrogel de Inu-AAM y de 2 408 %, 96,01 % y 71,53 % para del hidrogel de Inu-PVA. La formación de dos nuevos materiales poliméricos fue comprobada mediante los análisis de Termogravimetría, Calorimetría Diferencial de Barrido y Espectroscopía Infrarroja de Transformadas de Fourier. El hidrogel de Inu-AAM fue escogido para la remoción de arsénico por presentar mejores propiedades físicas y tener mayor afinidad química con el arsénico. Finalmente, se construyeron las isothermas de adsorción y se determinó la cinética de adsorción, los modelos que más se ajustaron fueron el de la isoterma de Langmuir y el de la cinética de Ho, respectivamente.

Palabras clave: inulina, radiación beta, polisacáridos, remoción de arsénico, hidrogeles superabsorbentes.

## Synthesis of inulin hydrogels with beta radiation to remove arsenic

**Abstract:** Inulin hydrogels were synthesized with beta radiation to remove arsenic from synthetic water. Two polymeric solutions of inulin-acrylamide (Inu-AAM) and inulin-polyvinyl alcohol (Inu-PVA) were irradiated in the E-beam accelerator ELU-6U to obtain hydrogels. The variables composition of solutions and the radiation doses were evaluated. The best values of precursors concentrations of AAM and PVA, respectively, were 22 y 7,5 % (w/w). The inulin:precursor ratio (20:80, 40:60 and 60:40) and the radiation doses (20, 30, 40 and 50 kGy) were evaluated within an 4x3 mixed factorial experimental design. The best conditions for inulin:precursor ratio and radiation doses to obtain Inu-AAM hydrogels were 20:80 and 30 kGy; and 20,78:79,12 and 20 kGy for Inu:PVA hydrogel. The following results were obtained by characterizing the two synthesized hydrogels: the swelling percentage, equilibrium water content and gel percentage were 3 013 %, 96,81 % and 73,02 % to Inu-AAM hydrogel and 2 408 %, 96,01 % and 71,53 % to Inu-PVA hydrogel. By means of Thermogravimetry, Differential Scanning Calorimetry and Fourier Transform Infrared Spectroscopy analysis two new polymeric materials formation were confirmed. The Inu-AAM hydrogel was preferred to arsenical removal because of its properties and chemical affinity with arsenic. Finally, Langmuir isotherm and Ho kinetic model were adjusted to the arsenic adsorption process.

Keywords: inulin, beta radiation, polysaccharides, arsenic removal, superabsorbent hydrogels.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de arsénico en agua para consumo humano es un problema global, millones de personas en América Latina y el sureste asiático beben agua contaminada con este metal (Castro, 2004, p. 1 y Flanagan et al., 2012, pp. 839-840). Aunque se encuentra de forma natural en aguas termales, ríos y vertientes; es causante de enfermedades cancerígenas, cutáneas, pulmonares, entre otras. Por ello, está catalogado como una de las 10 sustancias más nocivas para la salud pública. (WHO, 2012).

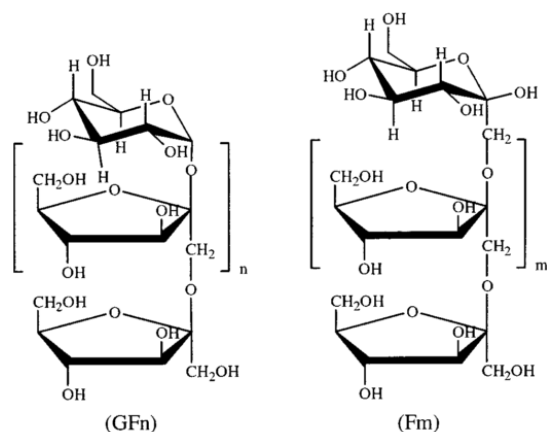
En el Ecuador, se han encontrado fuentes de agua con concentraciones de arsénico peligrosas para la salud en las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha. (Cumbal et al., 2015, p. 3). Este es el caso de las fuentes de agua que abastecían a las poblaciones de Tumbaco y Guayllabamba que actualmente se encuentran clausuradas por no cumplir con los niveles de arsénico establecidos en la norma INEN 1108 Agua Potable. Requisitos (INEN, 2011, p. 2). A pesar de este riesgo se conoce que pequeños poblados aledaños a estas fuentes consumen esta agua en forma regular (EMAAP, 2007, pp. 57-60 y EPMAPS, 2011, pp. 21-23). De ahí que se hayan

realizado varias investigaciones para encontrar una solución a este problema. Como ejemplos de investigaciones realizadas en el Ecuador se puede mencionar la de Rosero (2008), quien propuso el tratamiento del agua del pozo Patahua de Tumbaco con óxidos de hierro y carbón activado impregnado con hierro, y la de Cumbal et al. (2015), quienes desarrollaron materiales sorbentes con quitosano para la remoción de arsénico en la laguna de Papallacta.

Existen diferentes tecnologías para retirar el arsénico del agua, sin embargo, muchas resultan ser costosas, como es el caso de la ósmosis inversa y otras ineficientes como la oxidación-floculación-coagulación, para alcanzar los valores permitidos. (Reed et al., 2000, p. 869). Por eso se desarrollaron tratamientos con el uso de materiales adsorbentes como, arcillas, alúmina activada, zeolita, carbón activado e hidrogeles entre otros (Luján, 2001, pp. 302-303). Éstas son tecnologías más sencillas y menos costosas. Sanyang et al. (2014) sintetizaron hidrogeles de acrilamida con cascarrilla de arroz para el tratamiento de arsénico. En otra investigación, desarrollaron hidrogeles de almidón con alcohol polivinílico para la remoción de éste y otros metales (Chowdhury et al., 2015).

Los hidrogeles son utilizados para la remoción de metales, ya que poseen una estructura porosa, tienen una alta capacidad de adsorción y se pueden separar fácilmente de soluciones acuosas. Son estructuras poliméricas conformadas por compuestos hidrofílicos que se han entrecruzado entre sí para formar una red tridimensional. Este entrecruzamiento puede ser físico debido a interacciones secundarias, o químico debido a la formación de enlaces covalentes que pueden ser producidos por reacciones químicas o por el uso de radiaciones ionizantes (Bhatia et al., 2013, pp. 271-278).

Tradicionalmente se han usado polímeros sintéticos para la obtención de hidrogeles, sin embargo, en los últimos años se ha investigado el uso de polímeros naturales como el almidón, el quitosano y la celulosa (Bhatia et al., 2013, p. 1). Pavón (2015) obtuvo hidrogeles a partir de almidón y gomas de guarango para la remoción de colorantes, mientras que Ávila (2015) obtuvo hidrogeles a partir de quitosano para la adsorción de cromo. Otro polímero natural que se ha investigado en el uso de materiales poliméricos es la inulina, puesto que presenta interesantes propiedades como biocompatibilidad, biodegradabilidad, no toxicidad y alta solubilidad en el agua. Esto la convierte en un precursor de gran potencial para el desarrollo de biopolímeros (Tripodo et al., 2005, p. 1 074).



**Figura 1.** Estructura química de la inulina, GFn (izquierda) y Fm (derecha) (Stevens et al., 2001, p.2)

En la Figura 1 se observa la estructura de la inulina que es un polisacárido compuesto principalmente de unidades de fructosa unidas por un enlace  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 2) fructosil-fructosa. La molécula terminal en su estructura puede ser un grupo  $\beta$ -D-glucopiranosil (GFn) o  $\beta$ -D-fructopiranosil (Fm). Se encuentra en una variedad de plantas ecuatorianas y tiene diversas aplicaciones poco investigadas en el Ecuador. Una de estas aplicaciones es el tratamiento de aguas para la remoción de metales como el arsénico (Stevens et al., 2001, pp. 1-16).

Por este motivo, en este trabajo se propone la obtención de hidrogeles a partir de inulina por medio de radiación beta para el tratamiento de agua contaminada con arsénico. Se utilizó radiación beta para producir los enlaces poliméricos puesto que presenta ventajas frente al método químico. Algunas de ellas son, un mayor control de la reacción, no requiere aditivos químicos, ni altas temperaturas y se obtiene un producto estéril (Hennink y van Nostrum, 2012, pp. 228-229).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Reactivos

#### 2.1.1. Obtención de los hidrogeles de inulina

Acilamida,  $C_3H_5NO$  (AAM) para síntesis (Merk, pureza 99 %) fue usada como monómero en la preparación de hidrogeles de poliacrilamida (Inu-AAM), y alcohol polivinílico,  $(C_2H_4O)_n$  (PVA) (Merck, totalmente hidrolizado) para el hidrogel de PVA (Inu-PVA). Cada precursor fue mezclado con inulina de achicoria, (Inu) grado alimenticio (Beneo Orafiti® HP, GP>23, 4 100-5 500 g/mol).

#### 2.1.2. Estudio de remoción de arsénico

Arsenato de sodio heptahidratado,  $Na_2HAS_2O_4 \cdot 7H_2O$  (Merck, pureza 98 %) fue usado para la preparación de una solución madre a una concentración de 30 mg/L. Tricitrato de sodio,  $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$  (BDH, pureza  $\geq 99$  %), ácido cítrico monohidratado,  $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$  (Merk, pureza  $\geq 99,5$  %), fosfato monobásico de potasio,  $KH_2PO_4$  (BDH, pureza  $\geq 99$  %) y fosfato dibásico de potasio trihidratado,  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$  (Merck, pureza  $\geq 99$  %) fueron utilizados para la preparación de las soluciones buffer.

### 2.2 Métodos

En este trabajo se sintetizaron dos tipos de hidrogeles de inulina: Inu-AAM e Inu-PVA. Primero se realizó el estudio para determinar las mejores condiciones (dosis de radiación y composición de la solución polimérica) para la obtención de cada tipo de hidrogel con el porcentaje de hinchamiento como variable de respuesta. A continuación se obtuvieron los dos hidrogeles a dichas condiciones y se los caracterizó según sus propiedades físicas, térmicas y espectroscópicas (espectroscopía infrarroja). Tomando en cuenta las propiedades de los hidrogeles obtenidos, se seleccionó uno de ellos para realizar ensayos de remoción de arsénico.

#### 2.2.1 Estudio de las mejores condiciones para la obtención de los hidrogeles

##### a) Síntesis de los hidrogeles

Primero se prepararon dos tipos de soluciones poliméricas para sintetizar cada tipo de hidrogel.

Para preparar las soluciones de Inu-AAM se solubilizó la inulina en agua destilada a una temperatura de 60 °C, se dejó enfriar la solución hasta temperatura ambiente, se agregó la acrilamida y se agitó hasta una completa disolución. Se prepararon 3 soluciones de diferente composición a las relaciones en peso de Inu:AAM de 20:80, 40:60 y 60:40, mientras la concentración de AAM en la solución permaneció constante al 22 % (w/w).

Para preparar las soluciones de Inu-PVA se solubilizó el PVA en agua destilada a una temperatura entre 22 y 60 °C, se agregó la inulina y se agitó hasta la disolución completa de la mezcla. De manera similar se prepararon 3 soluciones diferentes correspondientes a cada relación en peso de Inu:PVA en los

valores de 20:80, 40:60 y 60:40, mientras la concentración de PVA en la solución permaneció constante al 7,5 % (w/w).

Posteriormente se eliminó el oxígeno atrapado en las soluciones con un baño de ultrasonido durante 20 min. Se colocó las soluciones en fundas de polietileno de baja densidad cerradas herméticamente y se irradiaron a las dosis de 20, 30, 40 y 50 kGy en un acelerador lineal de electrones, modelo ELU-6U, de la EPN. Finalmente los hidrogeles obtenidos fueron lavados para eliminar cualquier residuo que no haya reaccionado y secados en una estufa a una temperatura de 60 °C durante 24 horas para obtener xerogeles (hidrogeles deshidratados).

#### b) *Diseño experimental y tratamiento de resultados para la selección de las mejores condiciones*

Para el análisis estadístico se seleccionó un diseño experimental factorial mixto 4x3 para cada tipo de hidrogel, en el que se tomó como variables de diseño a la dosis de radiación y a la relación en peso inulina:precursor. Se caracterizaron los hidrogeles obtenidos con el parámetro porcentaje de hinchamiento (%H) según la ecuación (1).

$$\%H = \frac{W_H - W_S}{W_S} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $W_H$  es el peso del hidrogel hinchado en un tiempo  $t$ ,  $W_S$  es el peso del xerogel en el tiempo inicial (Zuluaga et al., 2006, p. 104).

Se determinaron las mejores condiciones estadísticamente con el programa Statgraphics Centurion XVI.I y se sintetizaron los dos hidrogeles Inu-AAm e Inu-PVA a las mejores condiciones determinadas con el análisis estadístico.

### 2.2.2 Caracterización y selección de los hidrogeles obtenidos a las mejores condiciones determinadas

#### a) *Caracterización de los mejores hidrogeles*

Se caracterizaron los dos hidrogeles obtenidos según las siguientes propiedades:

- *Porcentaje de hinchamiento y contenido de agua en equilibrio*

Para su determinación se colocó 0,01 g de xerogel en un vaso de precipitación con 50 mL de agua destilada y se tomó el peso del hidrogel a diferentes intervalos de tiempo hasta alcanzar las 48 horas. Para tomar el peso del hidrogel, se lo sacó del vaso con una pinza, se secó el excedente de agua con un papel filtro y se lo pesó en la balanza analítica. El porcentaje de hinchamiento y contenido de agua en equilibrio (%W) se calcularon según las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$\%W = \frac{W_H - W_S}{W_H} \times 100 \quad (2)$$

Donde  $W_H$  es el peso del hidrogel hinchado en un tiempo  $t$ ,  $W_S$  es el peso del xerogel en el tiempo inicial (Zuluaga et al., 2006, p. 104).

- *Porcentaje de gelación*

Se colocó 0,1 g de xerogel en un vaso con 100 mL de agua destilada a 60 °C dentro de un autoclave durante 4 horas. Se retiró el hidrogel y se secó en una estufa a 60 °C durante 24 horas. Se pesó el hidrogel seco antes y después del proceso. Se obtuvo el porcentaje de gelación con la ecuación (3).

$$\%G = \frac{W_{HS}}{W_S} \times 100 \quad (3)$$

Donde  $W_{HS}$  es el peso del hidrogel seco luego del proceso y  $W_S$  es el peso del hidrogel seco antes del proceso. (Chowdhury et al., 2015, p. 6)

- *Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR)*

Para su determinación se realizó una mezcla homogénea de xerogel pulverizado con bromuro de potasio, se la comprimió en una prensa troquel y se obtuvo una pastilla translúcida, la cual fue analizada en el equipo en el rango de 4 000-450  $\text{cm}^{-1}$  (Larkin, 2011, pp. 1-3).

- *Calorimetría diferencial de barrido (DSC)*

Para la realización del análisis se utilizó una muestra de xerogel pulverizado. Las condiciones del análisis fueron: calentamiento desde los 15 hasta los 250 °C, atmósfera de nitrógeno con un flujo de calentamiento de 20 °C/min (Leyva-Porras et al., 2015, pp. 3-7).

- *Termogravimetría (TGA)*

El análisis se realizó con una muestra de xerogel pulverizado. Las condiciones del análisis fueron: una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 mL/min, calentamiento desde los 30 hasta los 800 °C y un flujo de calentamiento de 20 °C/min (Leyva-Porras et al., 2015, pp. 3-7).

#### b) *Selección del hidrogel para la remoción de arsénico*

Se realizó un análisis comparativo entre las propiedades de los dos hidrogeles obtenidos (Inu-AAm e Inu-PVA) y entre la afinidad química del hidrogel con respecto al arsénico de acuerdo a las condiciones de remoción. Se seleccionó al hidrogel que presentó los mejores valores en las propiedades analizadas y una mayor afinidad química para remover el metal.

### 2.2.3 Estudio de adsorción de arsénico con los hidrogeles obtenidos

Se realizaron los ensayos de adsorción de arsénico con el hidrogel de Inu-AAm. Todas las remociones en este estudio se realizaron a pH 6 (Sanyang et al., 2014, pp. 6-7).

#### a) *Isotermas de adsorción*

A partir de la solución madre de arsénico de 30 mg/L, se prepararon 1,4 L de solución de arsénico de 0,3 mg/L que se separaron en 7 muestras de 200 mL. Se guardó una muestra como testigo; se colocaron 0,02, 0,2, 0,5, 1, 1,5 y 3 g de xerogel en cada muestra y se agitó durante 24 horas en un agitador orbital. Una vez realizada la remoción se filtraron las

muestras con un colador para retirar los hidrogeles. Las muestras de agua se colocaron en un envase plástico estéril, se acidificaron y se las colocó en refrigeración para posteriormente ser analizadas por la técnica de plasma por acoplamiento inductivo (ICP). Esta técnica utiliza un plasma que atomiza, ioniza, excita y detecta al arsénico en sus formas arsenicales (Martinez y Gasquez, 2005, p. 4). El límite de detección de esta técnica es de 0,01 mg/L.

Para determinar el mecanismo de adsorción del proceso, se estudiaron los modelos de Langmuir y Freundlich según las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{1}{q_{\max}} C_e \quad (4)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

Donde  $q_e$  es la cantidad de arsénico adsorbido en el hidrogel (mg/g),  $C_e$  es la concentración de arsénico en la solución en el equilibrio (mg/L),  $q_{\max}$  es la cantidad máxima de arsénico adsorbido en el hidrogel (mg/g),  $K_L$  es la constante de equilibrio del modelo de Langmuir y  $K_F$  y  $n$  son la constante de equilibrio del modelo de Freundlich y la intensidad de adsorción, respectivamente (Sanyang et al., 2014, p. 4).

#### b) Cinética de adsorción

A partir de la solución madre de arsénico de 30 mg/L, se prepararon 2 L de solución de arsénico de 0,3 mg/L que se dividieron en 10 muestras de 200 mL. Se guardó una muestra como testigo; se colocaron 0,2 g de xerogel en las otras muestras y se agitaron durante 10, 20, 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas en un agitador orbital. Se retiraron los hidrogeles con un colador y se guardaron las muestras para su posterior análisis. Se construyó la curva de remoción de arsénico en el tiempo. El porcentaje de remoción de arsénico se calculó con la ecuación (6).

$$\%Remoción = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \quad (6)$$

Donde  $C_o$  es la concentración inicial de arsénico y  $C_t$  es la concentración de arsénico al tiempo  $t$  (Sanyang et al., 2014, p. 4).

Se evaluó la cinética de adsorción del arsénico en el hidrogel de acuerdo a los modelos de Lagergren y Ho según las ecuaciones (7) y (8), respectivamente. Se consideraron estos modelos debido a que modelan la adsorción de un soluto presente en una solución por parte de un sólido.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{K_L}{2,303} t \quad (7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 K_H} + \frac{1}{q_e} t \quad (8)$$

Donde  $q_e$  y  $q_t$  son la cantidad de arsénico adsorbido por el hidrogel en el equilibrio y a un tiempo determinado,

respectivamente,  $q_e^2 k_H$  es la velocidad de adsorción de arsénico inicial y  $k_L$  y  $k_H$  son las constantes de los modelos de Lagergren y Ho, respectivamente (Sanyang et al., 2014, p. 4).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudio de las mejores condiciones para la obtención de los hidrogeles

Al realizar el análisis de superficie de respuesta sobre los hidrogeles de Inu-AAm como se muestra en la Figura 2a, se observó como el porcentaje de hinchamiento se relaciona con las variables relación Inu:AAm y dosis de radiación. El porcentaje de hinchamiento aumenta con una tendencia lineal con la disminución de la relación Inu:AAm y presenta una relación cuadrática con respecto a la dosis de radiación en la que el máximo relativo varía con la relación Inu:AAm. Las mejores condiciones para la obtención del hidrogel de Inu-AAm fueron la relación Inu:AAm de 20:80 y la dosis de radiación de 30 kGy. Sultana et al. (2012) determinaron que la mejor dosis de radiación para obtener hidrogeles de carboximetil celulosa y AAm, fue 25 kGy. Posiblemente, en este trabajo se obtiene una dosis mayor porque la inulina no posee grupos carboxilo fácilmente reactivos que le permitan reticular.

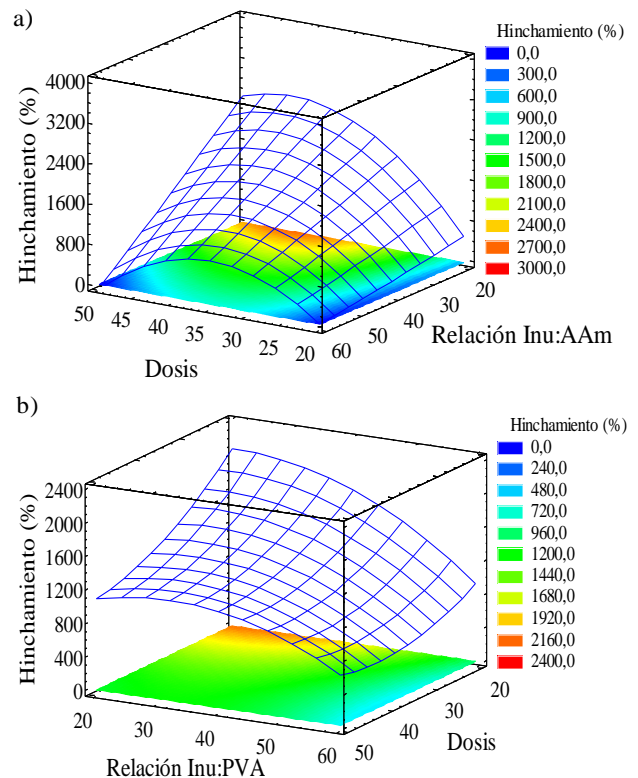


Figura 2. Análisis estadístico de superficie de respuesta: a) Hidrogel de Inu-AAm b) Hidrogel de Inu-PVA

En la Figura 2b correspondiente al análisis de superficie de respuesta del hidrogel Inu-PVA, se observa que el porcentaje de hinchamiento tiene una relación cuadrática con la dosis de radiación y la relación Inu:PVA. A medida que aumenta el porcentaje de hinchamiento disminuye la dosis y disminuye la relación Inu:PVA hasta alcanzar su máximo. Las mejores condiciones de obtención del hidrogel de Inu-PVA fueron la

relación Inu:PVA de 20,78:79,12 y la dosis de radiación de 20 kGy. Pavón (2015) obtuvo hidrogeles de PVA y gomas de guarango a una dosis de 23,31 kGy e hidrogeles de PVA y almidón de yuca a 26,2 kGy. La dosis en este trabajo es menor probablemente porque la inulina tiene una estructura menos cristalina que el almidón, esto significa que los radicales libres tienen más espacio para reaccionar con los grupos hidroxilo presentes en el polisacárido, ya que pueden ingresar entre los espacios de las cadenas poliméricas (Kornacka et al., 2013, pp. 154-156 y Ramarad et al., 2017, p. 19).

En general se observó que en ambas gráficas el porcentaje de hinchamiento guarda estrecha dependencia con la dosis de radiación, a menor dosis, mayor porcentaje de hinchamiento, en el rango de estudio. Esto se debe probablemente a que a menores dosis el entrecruzamiento entre las cadenas es menor y se tiene una estructura menos rígida con espacios intermoleculares que permiten el ingreso de las moléculas de agua en la red polimérica. (Sudirman et al., 2013, p. 91) Se observa que la dependencia del porcentaje de hinchamiento con respecto a la relación Inu:Precursor es mayor en los hidrogeles de Inu-AAM.

### 3.2 Caracterización de los hidrogeles obtenidos a las mejores condiciones y selección del hidrogel para la remoción de arsénico

#### a) Caracterización de los mejores hidrogeles

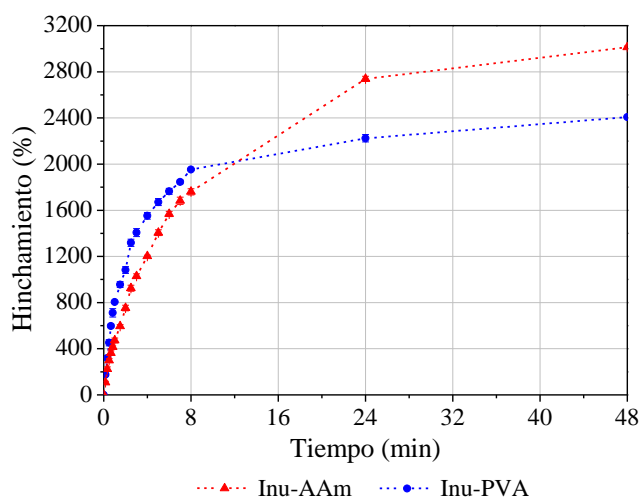
Se caracterizaron los dos hidrogeles obtenidos de acuerdo a sus propiedades físicas como se muestra en la Tabla 1. Los hidrogeles poseen una gran afinidad por el agua como lo indican los parámetros porcentaje de hinchamiento y porcentaje de agua en equilibrio, ambos hidrogeles entran en la categoría de superabsorbentes porque se hincharon más del 1 000 % de su peso (Zohuriaan-Mehr et al., 2010, p. 5 711). Los resultados del porcentaje de hinchamiento de los hidrogeles fueron mayores que los mejores valores alcanzados por Pavón (2015) y Ávila (2015), 2 074,63 y 820,49 %, respectivamente. El hidrogel de Inu-AAM obtuvo los mejores valores en todas las propiedades físicas analizadas.

**Tabla 1.** Valores de las propiedades físicas de los dos hidrogeles de inulina

Propiedades	Hidrogel de Inu-AAM	Hidrogel de Inu-PVA
Porcentaje de hinchamiento (%)	3 013,0	2 408,0
Contenido de agua en equilibrio (%)	96,81	96,01
Porcentaje de gelación (%)	73,02	71,53

La Figura 3 muestra el porcentaje de hinchamiento en función del tiempo. Se observan dos etapas de absorción, durante las primeras horas la absorción es rápida ya que existen espacios libres en la red polimérica, a partir de las 24 horas la velocidad de absorción disminuye debido a que estos espacios ya han sido ocupados (Chowdhury et al., 2015, pp. 20-21). El equilibrio se alcanzó aproximadamente a las 48 horas. Al comparar las curvas de hinchamiento de los dos hidrogeles, se observa que inicialmente el hidrogel de Inu-PVA tiene un mayor porcentaje de hinchamiento, probablemente porque este hidrogel presenta una mayor afinidad por el agua debido a los grupos OH que presenta (Chang, 2010, pp. 377-380). Sin embargo a partir de las 8 horas su velocidad de absorción

disminuye drásticamente, mientras que la velocidad de absorción del hidrogel de Inu-AAM no. Se estima que esto se produce debido a que el hidrogel de Inu-AAM posee en su estructura grupos más grandes (grupo amida), esto provoca que tenga un mayor espaciamiento entre las cadenas de AAM. Al tener un mayor volumen libre en su interior permite un mayor ingreso de agua. Además, es probable que el PVA tenga zonas cristalinas en las cuales el ingreso de agua se dificulta, mientras que la poli(acrilamida) se encuentre en estado amorfo, que le permite un mayor ingreso del agua (Bodugoz-Senturk et al., 2009, pp. 589-590).



**Figura 3.** Porcentaje de hinchamiento en función del tiempo para los mejores hidrogeles de Inu-AAM e Inu-PVA

Las Figuras 4 y 5 muestran los análisis térmicos de los dos hidrogeles obtenidos con sus materias primas correspondientes (la inulina y los precursores AAM y PVA, según el caso).

La Figura 4 muestra los análisis térmicos del hidrogel de Inu-AAM. Es importante aclarar que el hidrogel está compuesto por inulina y poli(acrilamida), puesto que la acrilamida polimeriza con la radiación. La Figura 4a muestra el análisis TGA, en el que se observa como la masa de xerogel Inu-AAM cambia con la variación de la temperatura. Se observan tres zonas con pérdida de peso. La primera entre los 34 y 229 °C que indica la pérdida de peso del agua libre del hidrogel, en esta zona se perdió un 10,44% del peso del material, la segunda entre los 232 y 297 °C que indica la rotura de los enlaces que unen a la inulina y la poli(acrilamida), así como la descomposición de varias cadenas de inulina, y la última zona entre los 297 y 556 °C que indica la descomposición de las cadenas de poli(acrilamida) y las cadenas principales de inulina (Ehrenstein et al., 2004, pp. 142-160). Al comparar los rangos de temperaturas de degradación del nuevo material formado con el de sus materias primas, se observa que el nuevo material formado tiene mayor estabilidad térmica, esto probablemente porque el acrilamida polimerizó en poli(acrilamida), haciendo más resistente al material.

La Figura 4b muestra el análisis DSC del hidrogel de Inu-AAM, en la cual se observa la variación del flujo de calor en el xerogel en función de la temperatura. Este diagrama no se encuentra bien definido debido a la humedad presente en la muestra. Se presentan dos picos endotérmicos, el primero a los

88,3 °C correspondiente a la pérdida de agua del xerogel, y el segundo pico no tan definido alrededor de los 169 °C que probablemente corresponde a la temperatura de fusión del material. La inulina tiene un punto de fusión alrededor de los 161 °C y la poliacrilamida alrededor de los 237 °C, el punto de fusión del hidrogel se encontraría en un punto medio de sus materias primas (Blecker et al., 2003, pp. 218-223 y Sowwan et al., 2011, p. 6 281). No se puede observar claramente la temperatura de transición vítrea (Tg), pero podría estar enmascarada en el pico de evaporación del agua, puesto que se observa un cambio en la línea base del flujo de calor. Además, según estudios previos (Ramaraj, 2006, p. 913) es probable que el nuevo material tenga una Tg menor a la de sus materias primas, la Tg de la inulina esta alrededor de los 125°C y de la poliacrilamida alrededor de los 161°C (Lozano et al., 2010, p. 19 y Sowwan et al., 2011, p. 6 281).

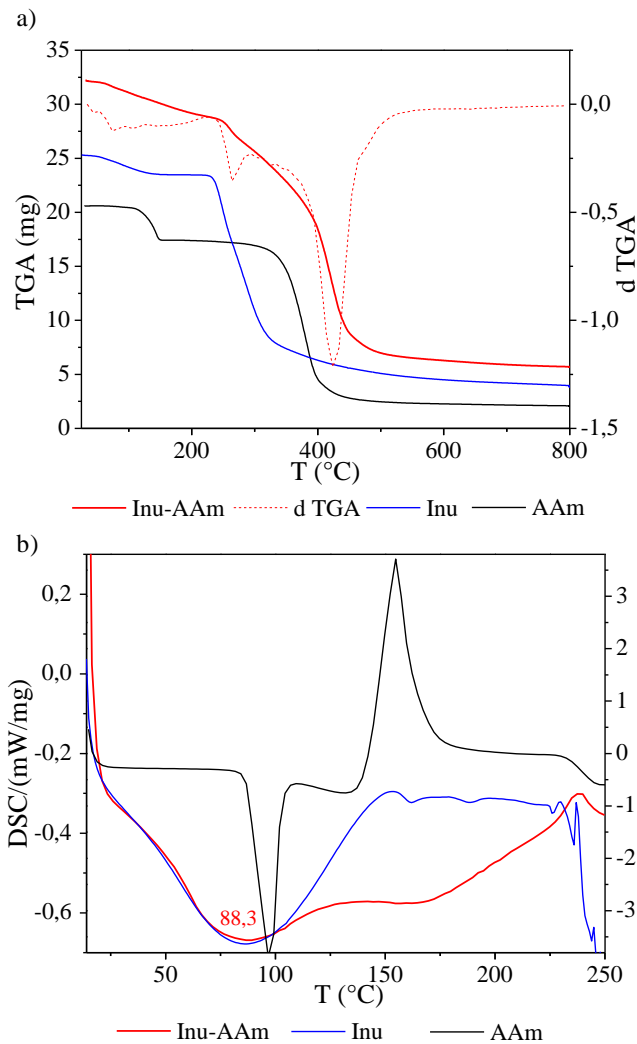


Figura 4. Análisis térmicos del hidrogel de Inu-AAm y sus materias primas a) termograma b) calorimetría diferencial de barrido

La Figura 5 presenta los análisis térmicos del hidrogel de Inu-PVA. La Figura 5a muestra el análisis TGA realizado en el xerogel. Se observan tres zonas de pérdida de peso, la primera entre los 30 y 143 °C correspondiente al agua libre en el hidrogel, en esta zona se perdió un 5,13%, la segunda entre los 143 y 433 °C que corresponde a la descomposición de los enlaces covalentes entre la inulina y el PVA, las cadenas de

inulina y parte de las cadenas del PVA; y la tercera zona entre los 434 y 524 °C correspondiente a la degradación de las cadenas principales del alcohol polivinílico y la inulina. (Ehrenstein et al., 2004, pp. 142-160 y Barrera et al., 2007, pp. 102-104). Al comparar los rangos de temperaturas de degradación del nuevo material formado con el de sus materias primas correspondientes se observa que el nuevo material es un poco menos resistente a la degradación que el alcohol polivinílico, pero mucho más resistente que la inulina.

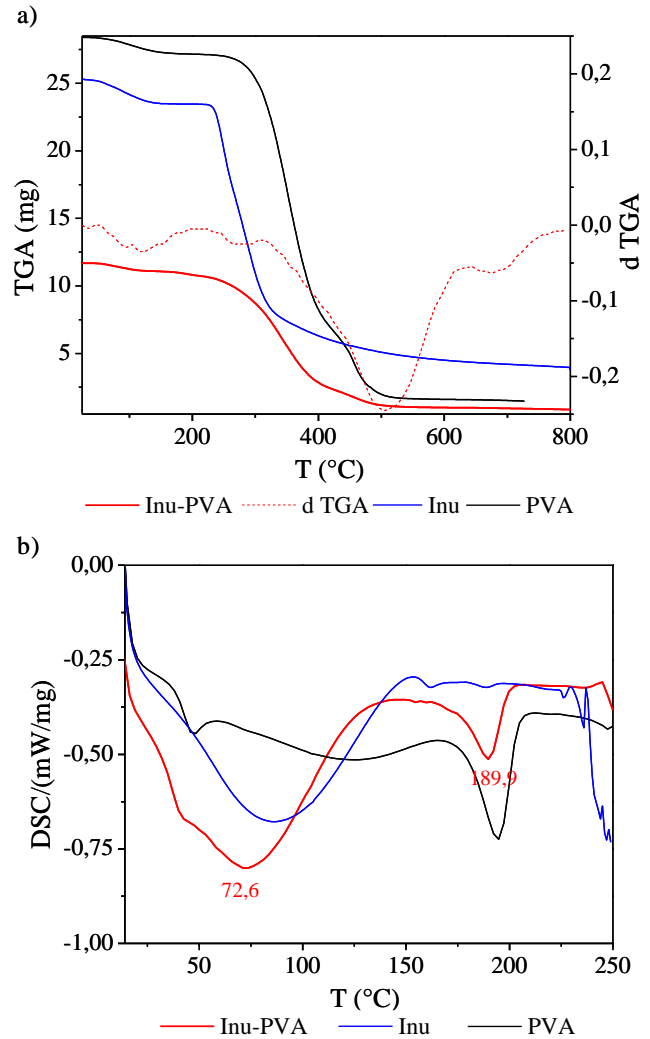


Figura 5. Análisis térmicos del hidrogel de Inu-PVA y sus materias primas a) termograma b) calorimetría diferencial de barrido

La Figura 5b corresponde al análisis DSC realizado en el hidrogel de Inu-PVA. Primero, se observa un pequeño pico a los 40°C correspondiente a la Tg del hidrogel. Esta Tg es menor que la del PVA e inulina, esto es explicado debido a que un aumento del volumen libre en la estructura de un polímero produce una reducción en su Tg. Este incremento del volumen libre es causado por la inserción de la inulina entre las cadenas de PVA (Ramaraj, 2006, p. 913). Al continuar con la gráfica se observa un pico comprendido aproximadamente entre los 18 y 140 °C con un punto máximo en los 72,6 °C correspondiente a la evaporación de agua en el hidrogel. Finalmente se observa el pico de fusión a 189,9 °C, este valor se encuentra entre la temperatura de fusión de la inulina y del PVA, lo que indica que el hidrogel obtenido corresponde a una

mezcla polimérica homogénea (Ehrenstein et al., 2004, pp. 82-91).

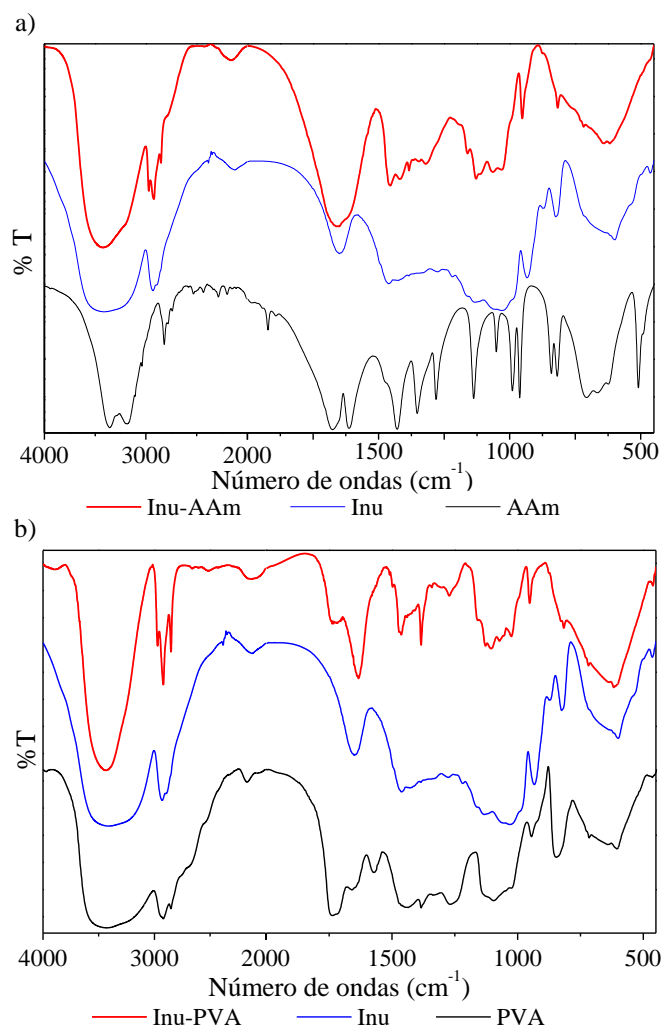


Figura 6. Espectro infrarrojo del hidrogel y sus materias primas:  
a) Inu-AAm b) Inu-PVA

En la Figura 6 se observan los espectros infrarrojos de los dos hidrogeles con sus materias primas correspondientes. La Figura 6a correspondiente al hidrogel de Inu-AAm presenta una banda a  $3\,424\text{ cm}^{-1}$  que representa los estiramientos del enlace O-H, se observa una pequeña banda alrededor de los  $3\,182\text{ cm}^{-1}$  solapada con la banda del enlace O-H, esta banda conjuntamente con la de  $3\,424\text{ cm}^{-1}$  podrían ser atribuidas a los estiramientos del enlace N-H en el grupo  $\text{NH}_2$ . Las bandas encontradas a  $2\,971$ ,  $2\,921$ , y  $2\,851\text{ cm}^{-1}$  se asignan a los estiramientos del enlace C-H en los grupos  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}$ , respectivamente. Las bandas que se presentan a  $1\,650$  y  $1\,421\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a los grupos C=O y C-N, respectivamente. Las dos bandas observadas a  $1\,454$  y  $1\,320\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a las deformaciones debidas al enlace  $\text{CH}_2\text{-CH}$  (Larkin, 2011, pp. 50, 62, 76, 174, 176). La banda encontrada a  $1\,128\text{ cm}^{-1}$  se atribuye al estiramiento de los grupos C-O-C en el anillo de la inulina y la banda a  $1\,321\text{ cm}^{-1}$  se asigna a las deformaciones provocadas por el N-H del grupo  $\text{NH}_2$  (Temkov et al., 2015, pp. 463-464 y Murugan et al., 1998, pp. 508-510). Se aprecia que en la zona de la huella digital (menor a los  $1\,500\text{ cm}^{-1}$ ) el hidrogel de Inu-

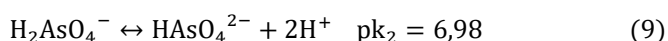
AAm formado presenta un espectro IR diferente al de sus dos materias primas.

La Figura 6b correspondiente al análisis FTIR del hidrogel de Inu-PVA, presenta las bandas a  $3\,434$ ,  $2\,971$ ,  $2\,919$ , y  $2\,851\text{ cm}^{-1}$  que se asignan a los estiramientos de los enlaces O-H y C-H de los grupos OH,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  y CH, respectivamente. (Larkin, 2011, p. 174). Las bandas encontradas a  $1\,738$  y  $1\,634\text{ cm}^{-1}$  se asocian con la presencia de agua en el hidrogel (Chowdhury et al., 2015, pp. 12-18). Las bandas ubicadas entre los  $1\,300$  y  $750\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a los estiramientos del enlace C-O de los alcoholes (Larkin, 2011, p. 131). La banda observada a  $817\text{ cm}^{-1}$  se asocia con las deformaciones del grupo ceto furanosa y la banda a  $1\,384\text{ cm}^{-1}$  se asigna a la deformación del enlace C-H del grupo  $\text{CH}_2$  (Larkin, 2011, p. 172). En la zona de la huella digital el hidrogel de Inu-PVA presenta un espectro IR con un perfil diferente al de sus materias primas.

Se observa que los dos hidrogeles formados mantienen algunos grupos funcionales de sus materias primas, y las bandas asociadas a estos grupos se encuentran en regiones espectrales similares. Estas bandas pueden estar algo desplazadas respecto de las bandas observadas en sus materias primas e incluso cambiar su intensidad. En ambos hidrogeles el espectro IR presenta un perfil distinto al de sus materias primas. Todo lo observado confirma la formación de dos nuevos materiales poliméricos.

#### b) Selección del hidrogel para la remoción de arsénico

De acuerdo a las condiciones en las que se realizaron las remociones, pH 6 en una atmósfera oxidante, el arsénico se encuentra como ácido arsénico, por lo cual la reacción de disociación que se presenta a continuación es la que se produjo a tales condiciones.



Esto significa que el arsénico presentó una carga negativa en la solución. A pH 6 los grupos  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y el  $\text{HAsO}_4^{2-}$  coexisten siendo predominante el grupo  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ . (Cumbal et al., 2015, pp. 3-6). Al hacer un análisis sobre los dos hidrogeles obtenidos, se conoce que a tales condiciones los grupos  $\text{OH}^-$  del PVA y la Inu se encuentra cargados positivamente, coexistiendo los grupos  $\text{OH}^-$  y  $\text{OH}_2^+$  con predominancia del grupo  $\text{OH}_2^+$  por encontrarse en medio ácido. (Chowdhury et al., 2015, pp. 26-27). Por otro lado los grupos amida de la AAm se encuentran protonados a tales condiciones  $\text{NH}_3^+$ . Al considerar los dos hidrogeles obtenidos, el hidrogel de Inu-AAm es el más idóneo para la remoción ya que presenta los grupos  $\text{OH}_2^+$  provenientes del polisacárido y los grupos  $\text{NH}_3^+$  de la poliácridamida, estos hacen una sinergia para unirse electrostáticamente a los grupos del arsénico cargados negativamente (Sanyang et al., 2014, pp. 6-7).

Como resultado de la caracterización de ambos hidrogeles se comprobó la formación de los dos hidrogeles de inulina con los análisis TGA y DSC y FTIR. Se escogió al hidrogel de Inu-AAm para el estudio de remoción de arsénico, primero por



presentar mejores propiedades físicas que el hidrogel de Inu-PVA y segundo por tener una mayor afinidad química con el arsénico para su remoción.

### 3.3 Estudio de adsorción de arsénico con los hidrogeles obtenidos

#### a) Isotermas de adsorción

La Figura 7 muestra el porcentaje de remoción de arsénico con respecto a la masa de xerogel utilizada en la remoción. Se observa que a medida que aumenta la masa de xerogel el porcentaje de remoción del metal aumenta. Esto concuerda con los principios de transferencia de masa, puesto que al aumentar la masa de xerogel existe una mayor área superficial que el arsénico puede ocupar, lo que facilita la difusión del metal en las redes poliméricas entrecruzadas del hidrogel (Sanyang et al., 2014, pp. 7-8). En la curva de remoción se observan dos etapas, la primera etapa hasta los 0,02 g en la que un pequeño cambio en la masa implica un gran cambio en la capacidad de adsorción; en la segunda etapa en la que un gran aumento en la masa implica un pequeño cambio en la adsorción. Esto se debe a que inicialmente el gradiente de concentración es mayor, una vez que el hidrogel adsorbe el metal la concentración tiende al equilibrio y por más que se aumente la masa de xerogel la concentración en el interior del xerogel es igual a la de la solución y ya no habrá un cambio significativo en la cantidad de arsénico que se adsorbe, puesto que se ha alcanzado el equilibrio (Treybal, 1987, pp. 88-95).

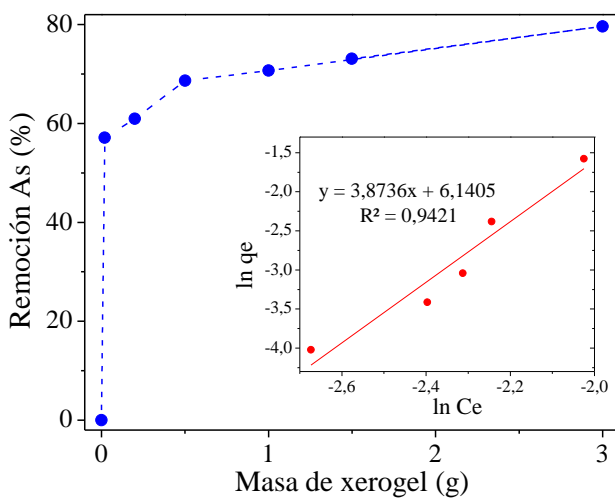


Figura 7. Remoción de arsénico en función de la masa de hidrogel a una concentración inicial de arsénico de 0,338 mg/L y pH 6  
Inserto: Isoterma linealizada según el modelo de Freundlich

Por otro lado como se muestra en el inserto de la Figura 7, la adsorción del arsénico en el hidrogel de Inu-AAM es descrita por el modelo de Freundlich. En la Tabla 2 se muestran las constantes de los dos modelos estudiados. Se observa que el modelo de Freundlich es el que mejor se ajusta al proceso de adsorción puesto que el coeficiente de correlación  $r^2$  calculado es mayor que el del modelo de Langmuir y las constantes de adsorción del modelo presentan valores positivos. En otras investigaciones de adsorciones con hidrogeles también se determinó que el modelo de Freundlich es el que describe el

proceso de adsorción. (Xiao-Feng et al., 2013, pp. 48-49, y Ahmed Galal et al., 2016, pp. 231-232).

Tabla 2. Comparación de los parámetros obtenidos según los modelos de Langmuir y Freundlich

Parámetro	n	$k_F/k_L$	$q_{máx}$	$R^2$
Modelo de Freundlich	0,2582	464,29	-	0,9421
Modelo de Langmuir	-	-7,0133	-0,0203	0,9411

#### b) Cinética de adsorción

La Figura 8 describe la variación del porcentaje de adsorción de arsénico en función del tiempo, se observa que aproximadamente a las 2 horas de remoción la concentración de arsénico en la solución se acerca al equilibrio. Esto va ligado a que inicialmente el gradiente de concentración de arsénico entre el interior del xerogel y la solución es grande, pero a medida que el arsénico es adsorbido en el tiempo, este gradiente disminuye hasta alcanzar el equilibrio. Esto significa que inicialmente se presenta una adsorción rápida del metal y luego inicia una etapa de adsorción lenta (Treybal, 1987, pp. 88-95).

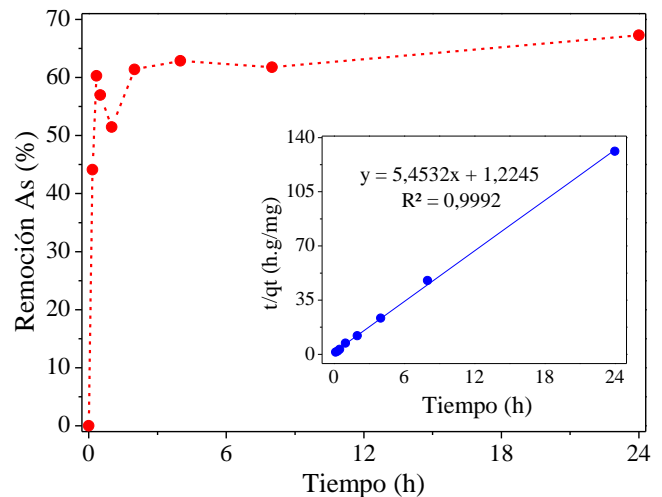


Figura 8. Remoción de arsénico en función del tiempo a una concentración inicial de arsénico de 0,272 mg/L, pH 6 y una masa de xerogel de 0,2 g  
Inserto: Cinética de adsorción linealizada según el modelo de Ho

Como se observa en el inserto de la Figura 8, el modelo que describe la cinética de adsorción del arsénico con los hidrogeles de Inu-AAM obtenidos es el de Ho. Este modelo presenta un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0,9992, mayor al del Lagergren que fue de 0,3757. Además el parámetro  $q_e$ , que representa la cantidad de arsénico adsorbido por el hidrogel en el equilibrio, presenta un valor experimental de 0,183, que se corresponde con el valor calculado según el modelo de 0,1834, lo que comprueba que el modelo seleccionado es el correcto (Abachi et al., 2013, pp. 35-36). Sanyang et al. (2014) también determinaron que el modelo de Ho se ajustaba a la cinética de adsorción en su trabajo.

## 4. CONCLUSIONES

Las mejores condiciones para obtener el hidrogel de Inu-AAM correspondieron a la concentración de AAM de 22 % (w/w), la relación Inu:AAM de 20:80 y la dosis de radiación de 30 kGy.

Las mejores condiciones para obtener el hidrogel de Inu-PVA correspondieron a la concentración de PVA de 7,5 % (w/w), la relación Inu:PVA de 20,79:79,21 y la dosis de radiación de 20 kGy.

Se obtuvieron dos hidrogeles superabsorbentes, el porcentaje de hinchamiento, contenido de agua en equilibrio y porcentaje de gelación del hidrogel de Inu-AAm fue de 3 013 %, 96,81 % y 73,02 %, y del hidrogel de Inu-PVA fue de 2 048 %, 96,01 % y 71,53 %.

El hidrogel de Inu-AAm fue el seleccionado para el estudio de remoción del arsénico por presentar mejores propiedades físicas y una mayor afinidad química para remover el arsénico que el hidrogel de Inu-PVA.

El análisis DSC determinó que el hidrogel de Inu-AAm presentó una temperatura de evaporación de 88,3 °C y que el hidrogel de Inu-PVA presentó una temperatura de evaporación de 72,6°C y una temperatura de fusión de 189,9 °C.

El análisis TGA estableció el porcentaje en peso de agua presente en las muestras finales de los hidrogeles obtenidos, 10,44 % en el hidrogel de Inu-AAm y 5,13 % en el hidrogel Inu-PVA.

Los análisis FTIR realizados en los dos hidrogeles confirmaron la formación de dos nuevos materiales poliméricos, puesto que sus espectros IR fueron diferentes a los de sus materias primas correspondientes.

El modelo de la isoterma de Freundlich es el que mejor describe el proceso de adsorción de arsénico en el hidrogel de Inu-AAm, presentó un coeficiente de correlación de 0,9421.

El modelo de cinética de adsorción que mejor describe el proceso de adsorción del arsénico con el hidrogel de Inu-AAm es el de Ho, este presentó un coeficiente de correlación de 0,9992.

## AGRADECIMIENTO

Este proyecto de titulación fue realizado gracias al auspicio del proyecto de investigación PIJ-15-15 "Obtención de hidrogeles y films a partir de inulina mediante radiación beta de un acelerador de electrones y reacciones de polimerización" financiado por la Escuela Politécnica Nacional, y al Departamento de Ciencias Nucleares de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria.

## REFERENCIAS

Abachi, M., Awady, N. y Al-anbakey, A. (2013). Evaluation of Poly Acrylic Acid (PAA) Hydrogel Beads as Adsorbent for The Removal of Lead (II) ion from Water. *Journal of Al-Nahrain University*, 16 (3), 30-39. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/307593769\\_Evaluation\\_of\\_Poly\\_Acrylic\\_AcidPAA\\_Hydrogel\\_Beads\\_as\\_Adsorbent\\_for\\_The\\_Removal\\_of\\_LeadII\\_from\\_Water](https://www.researchgate.net/publication/307593769_Evaluation_of_Poly_Acrylic_AcidPAA_Hydrogel_Beads_as_Adsorbent_for_The_Removal_of_LeadII_from_Water) (Diciembre, 2016).

Ahmed Galal I., Farag Abdel H., Hamada Abdel W., Hamza M. (2016). Synthesis, Characterization, Swelling Studies and Dye Removal of Chemically Crosslinked Acrylic Acid/Acrylamide/N,N-Dimethyl Acrylamide

Hydrogels. *American Journal of Applied Chemistry*. 4 (6), 221-234. doi: 10.11648/j.ajac.20160406.12.

Ávila, A. (2015). *Obtención de un hidrogel de quitosano mediante la irradiación con un haz de electrones acelerados para determinar su aplicación en la adsorción de cromo*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Química). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11991/1/CD-6609.pdf> (Mayo, 2016).

Barrera, J., Rodríguez, J., Perilla, J. y Algecira, N. (2007). Estudio de la degradación térmica de poli (alcohol vinílico) mediante termogravimetría y termogravimetría diferencial. *Revista ingeniería e investigación*, 27 (2), 100-105. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n2/v27n2a14.pdf> (Diciembre, 2016).

Bhatia, J., Kaith, B. y Kalia S. (2013). Polysaccharide hydrogels: synthesis, characterization, and applications. Kalia, S. y Sabaa, M. (Eds.), *Polysaccharide Based Graft Copolymers* (271-290). Berlin, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-36566-9\_7.

Blecker, C., Chevalier, J.-P., Fougnes, C., Van Herck, J.-C., Deroanne, C. y Paquot, M. (2003). CHARACTERISATION OF DIFFERENT INULIN SAMPLES BY DSC Influence of polymerisation degree on melting temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 71, 215-224. doi: 10.1023/A:1022238905962.

Bodogoz-Senturk, H., Macias, C. E., Kung J. H. y Muratoglu O. K. (2009). Poly (vinyl alcohol)-acrylamide hydrogels as load-bearing cartilage substitute. *Biomaterials*, 30 (4), 589-596. doi: 10.1016/j.biomaterials.2008.10.010.

Castro M. (2006). *Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos*. En Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America. Ciudad de México, México. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf> (Noviembre, 2016).

Chang, R. (2010). *Química* (10ma. ed.) Ciudad de México, México: McGraw-Hill.

Chowdhury, N. K., Ismail, A. F., Beg, D. H., Hegde, G. y Gohari R. J. (2015). Polyvinyl alcohol/polysaccharides hydrogel graft materials for arsenic and heavy metal removal. *New Journal of Chemistry*, 39 (7), 5823-5832. doi: 10.1039/C5NJ00509D.

Cumbal, L., Aguirre, V., Murgueitio, E., Tipán, R. y Chávez, C. (2015). *Desarrollo de una tecnología para la recuperación de las aguas de la laguna de Papallacta contaminadas con arsénico y metales pesados usando materiales sorbentes emergentes*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/280316432\\_DESARROLLO\\_DE\\_UNA\\_TECNOLOGIA\\_PARA\\_LA\\_RECUPERACION\\_DE\\_LAS\\_AGUAS\\_DE\\_LA\\_LAGUNA\\_DE\\_PAPALLACTA\\_CONTAMINADAS\\_CON\\_ARSENICO\\_Y\\_METALES\\_PESADOS\\_USANDO\\_MATERIALES\\_SORBENTES\\_EMERGENTES](https://www.researchgate.net/publication/280316432_DESARROLLO_DE_UNA_TECNOLOGIA_PARA_LA_RECUPERACION_DE_LAS_AGUAS_DE_LA_LAGUNA_DE_PAPALLACTA_CONTAMINADAS_CON_ARSENICO_Y_METALES_PESADOS_USANDO_MATERIALES_SORBENTES_EMERGENTES) (Marzo, 2016).

Ehrenstein, G. W., Riedel, G., y Trawiel, P. (2004). *Thermal Analysis of Plastics*. Munich, Alemania: Carl Hanser Verlag.

Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito EMAAP. (2007). *Auditoría ambiental a la calidad del agua de consumo humano de las poblaciones de Guayllabamba y Tumbaco*. Recuperado de [http://www.environmental-auditing.org/portals/0/auditfiles/ec148spa07ar\\_ft\\_guayllabambatumaco.pdf](http://www.environmental-auditing.org/portals/0/auditfiles/ec148spa07ar_ft_guayllabambatumaco.pdf) (Agosto, 2015).

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS. (2011). *Estudios de Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable y Alcantarillado para el DMQ. Resumen Ejecutivo Plan Maestro de Agua Potable*. Recuperado de [http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan\\_maestro\\_agua\\_potable.pdf](http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan_maestro_agua_potable.pdf) (Mayo, 2016).

Flanagan, S. V., Johnston, R. B. y Zheng, Y. (2012). Arsenic in tube well water in Bangladesh: health and economic impacts and implications for arsenic mitigation. *Bulletin of the World Health Organization*, 90, 839-46. doi: 10.2471/BLT.11.101253.

- Hennink, W. E. y van Nostrum, C. F. (2012). Novel crosslinking methods to design hydrogels. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 223-236. doi: 10.1016/j.addr.2012.09.009.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana 1108 Agua Potable. Requisitos*. Recuperado de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1108-5.pdf> (Mayo, 2016).
- Kornacka, E. M., Przybytniak, G. y Świeszkowski, W. (2013). The influence of crystallinity on radiation stability of UHMWPE. *Radiation Physics and Chemistry*, 84, 151–156. doi: 10.1016/j.radphyschem.2012.06.027.
- Larkin, P. (2011). *Infrared and raman spectroscopy : principles and spectral interpretation*. Estados Unidos: Elsevier.
- Leyva-Porras, C., Saavedra-Leos, M. Z., Lopez-Pablos, A. L., Soto-Guerrero, J. J., Toxqui-Terán A. y Fozado-Quiroz R. E. (2015). Chemical, Thermal and Physical Characterization of Inulin for its Technological Application Based on the Degree of Polymerization. *Journal of Food Process Engineering*, 1-13. doi:10.1111/jfpe.12333.
- Lozano, M., Obón, J. M., Castellar, M. R. y Díaz-García, M. C. (2010). Microencapsulados funcionales de frutos de *Opuntia stricta*. En III Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT. Cartagena, España. Recuperado de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2040/mff.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Diciembre, 2016).
- Luján, J. (2001). Un hidrogel de hidróxido de aluminio para eliminar el arsénico del agua. *Revista Panamericana Salud Pública*, 9 (5), 302-305. doi: 10.1590/S1020-49892001000500003.
- Martínez, L. y Gasquez J. (2005). *Determinación de arsénico en aguas: Diferentes técnicas y metodologías*. En IIº Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea; IVº Congreso Hidrogeológico Argentino, Río cuarto, Córdoba, Argentina. Recuperado de [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_bebida/177-Determinacion\\_arsenico.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/177-Determinacion_arsenico.pdf) (Febrero, 2017).
- Murugan, R., Mohan, S. y Bigotto, A. (1998). FTIR and polarized Raman spectra of acrylamide and polyacrylamide. *Journal of the Korean Physical Society*, 32 (4), 505-512. Recuperado de [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVg86gstjRAhXKJiYKHSs6BjgQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fold.kps.or.kr%2Fhome%2Fkor%2Fjournal%2Flibrary%2FdownloadPdf.asp%3Farticleuid%3D%257B43E6F355-D43F-4D4E-B386-6E5B29A6F648%257D&usq=AFQjCNF3t\\_zDeige34\\_yLR2UR8ICRvboMw&sig2=xMnnrqFnqfgKZn9nBDnU0g](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVg86gstjRAhXKJiYKHSs6BjgQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fold.kps.or.kr%2Fhome%2Fkor%2Fjournal%2Flibrary%2FdownloadPdf.asp%3Farticleuid%3D%257B43E6F355-D43F-4D4E-B386-6E5B29A6F648%257D&usq=AFQjCNF3t_zDeige34_yLR2UR8ICRvboMw&sig2=xMnnrqFnqfgKZn9nBDnU0g) (Noviembre, 2016).
- Pavón, C. (2015). *Preparación de hidrogeles para el tratamiento de efluentes coloreados, con base en polisacáridos y alcohol polivinílico (PVA) por medio de irradiación beta con un acelerador lineal de electrones*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ramarad, S., Ratnam, C. T., Khalid, M., Chuah, A. L. y Hanson, S. (2017). Improved crystallinity and dynamic mechanical properties of reclaimed waste tire rubber/EVA blends under the influence of electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 1-33. doi: 10.1016/j.radphyschem.2016.09.023.
- Ramaraj, B. (2006). Crosslinked Poly (vinyl alcohol) and Starch Composite Films. II. Physicomechanical Thermal Properties and Swelling Studies. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 909–916. doi: 10.1002/app.25237.
- Reed, B. E., Vaughan, R. y Jiang L. (2000). As (III), As (V), Hg, Pb Removal by Fe-Oxide Impregnated. *Journal of Environmental Engineering*, 126(9), 869-873. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:9(869).
- Rosero, V. (2008). *Estudio de la remoción de arsénico soluble presente en agua, mediante óxidos de hierro y carbón activado impregnado con hierro*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Sanyang, M. L., Karim Ghani, W. A., Idris, A. y Ahmad, M. B. (2014). Hydrogel biochar composite for arsenic removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57 (8), 1-15. doi:10.1080/19443994.2014.989412.
- Sowwan, M., Makhzarza, S., Sultan, W., Ghabboun, J., Teir, M. A. y Dweik, H. (2011). Analysis, characterization and some properties of polyacrylamide-Ni (II) complexes. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(27), 6280-6285. doi: 10.5897/IJPS09.257.
- Stevens, C. V., Meriggi, A. y Booten, K. (2001). Chemical Modification of Inulin, a Valuable Renewable Resource, and Its Industrial Applications. *Biomacromolecules*, 2 (1), 1-16. doi: 10.1021/bm005642t.
- Sudirman, E., Budianto, e., Mahendra A. y Yudianti R. (2013). Radiation Synthesis of Superabsorbent Poly (acrylamide-co-acrylic acid) -Sodium Alginate Hydrogels. *Advanced Materials Research*, 746, 88-96. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.746.88.
- Sultana, S., Islam, M. R., Dafader, N. C. y Haque, M. E. (2012). Preparation of carboxymethyl cellulose/acrylamide copoly-mer hydrogel using gamma radiation and investigation of its swelling behavior. *Journal of Bangladesh Chemical Society*, 25(2), 132-138. doi: 10.3329/jbcs.v25i2.15065.
- Temkov, M., Petkova, N., Denev, P. y Krastanov, A. (2015). *Characterization of inulin from Helianthus tuberosus L. obtained by different extraction methods – Comparative study*. En Food Science, Engineering and Technology 2015, Plovdiv, Bulgaria. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/287645695\\_Characterization\\_of\\_inulin\\_from\\_Helianthus\\_tuberosus\\_L\\_obtained\\_by\\_different\\_extraction\\_methods\\_-\\_Comparative\\_study](https://www.researchgate.net/publication/287645695_Characterization_of_inulin_from_Helianthus_tuberosus_L_obtained_by_different_extraction_methods_-_Comparative_study) (Diciembre, 2016).
- Treybal, R. (1987). *Mass-Transfer Operations*. (3ra ed.). Singapur: McGraw Hill.
- Tripodo, G., Pitarresi, G., Palumbo, F. S., Craparo, E. F., Giammona, G. (2005). UV-Photocrosslinking of Inulin Derivatives to Produce Hydrogels for Drug Delivery Application. *Macromolecular Bioscience*, 5 (11), 1074-1084. doi: 10.1002/mabi.200500134.
- World Health Organization WHO. (2012). *Arsenic*. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/en/> (Abril, 2016).
- Xiao-Feng S., Qing Y., Zhanxin J., Yajing L. (2013). Preparation of Hemicellulose-g-Poly(methacrylic acid)/ Carbon Nanotube Composite Hydrogel and Adsorption Properties. *Polymer Composites*, 35, 45-52. doi: 10.1002/pc.22632.
- Zohuriaan-Mehr, M. J., Omidian, H., Doroudiani S. y Kabiri, K. (2010). Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. *Journal of Materials Science*, 45 (21), 5711-5735. doi: 10.1007/s10853-010-4780-1.
- Zuluaga Corrales, F., Valderruten, N. E. y Muñoz, F. (2006). Síntesis y estudio de hidrogeles de acrilamida/ácido metacrílico y su aplicación en la liberación de fármacos. *El Hombre y la Máquina*, (27), 100-107. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/478/47802711.pdf> (Febrero, 2016).

## **FICHAS TÉCNICAS**

## FICHA TÉCNICA I

### ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DOSIS DE RADIACIÓN, EL USO DE NITRÓGENO Y LA CANTIDAD DE ALCOHOL POLIVINÍLICO EN EL PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO DE LOS HIDROGELES SINTETIZADOS

**Muestra:** Hidrogeles de inulina-alcohol polivinílico sintetizados a diferentes dosis de radiación y composición

**Objetivo:** Seleccionar la mejor concentración de alcohol polivinílico, delimitar el rango de estudio de la dosis de radiación y determinar si el uso de nitrógeno para eliminar las burbujas en la solución polimérica es significativo.

Para este estudio se dejó constante la relación en peso Inu:PVA en 50:50, se realizó un diseño experimental 2<sup>3</sup>, en el que se tomó como variables de diseño: la dosis de radiación, la concentración de PVA y el uso de nitrógeno para eliminar las burbujas en la solución polimérica. La dosis y la concentración de PVA se variaron en dos niveles 25 y 75 kGy; y 2,5 y 7,5 % (w/w). El punto al centro fue a la dosis de 50 kGy y concentración de 5 % (w/w). Este diseño se realizó con y sin el uso de nitrógeno. La variable de respuesta fue el porcentaje de hinchamiento. Se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI para realizar los análisis estadísticos correspondientes.

#### Ejemplo de cálculo:

$$\% \text{Hinchamiento} = \frac{W_H - W_S}{W_S} \times 100 \quad [\text{FTI. 1}]$$

Donde:

$W_H$ : es el peso del hidrogel hinchado en un tiempo t

$W_S$ : es el peso del xerogel en el tiempo inicial

$$\% \text{ Hinchamiento} = \frac{0,0692\text{g} - 0,01\text{g}}{0,01\text{g}} \times 100$$

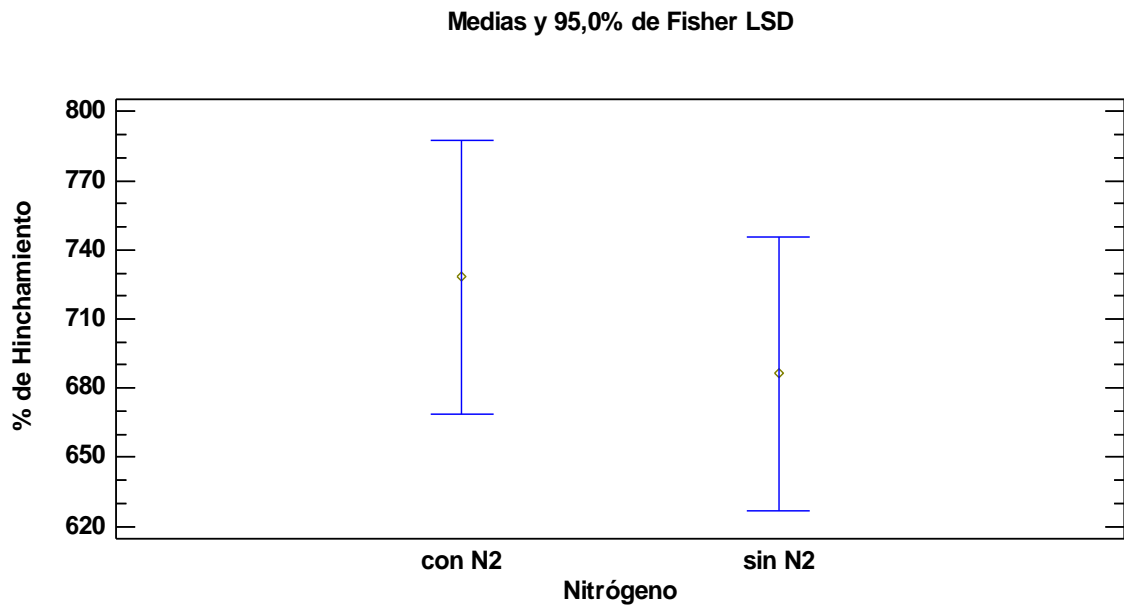
$$\% \text{ Hinchamiento} = 592 \%$$

$$\% \text{ Hinchamiento promedio} = \frac{592 + 662,75}{2}$$

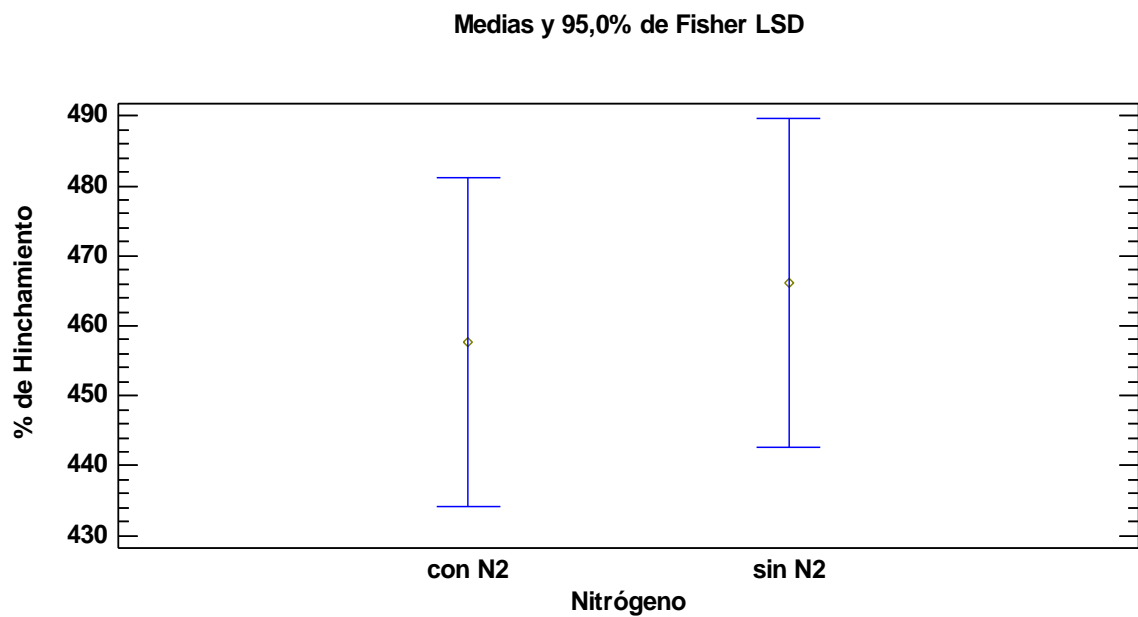
$$\% \text{ Hinchamiento promedio} = 627,37 \%$$

**Tabla FTL.1** Datos del porcentaje de hinchamiento a las diferentes dosis y composición para los hidrogeles de Inu-PVA sintetizados con y sin el uso de nitrógeno

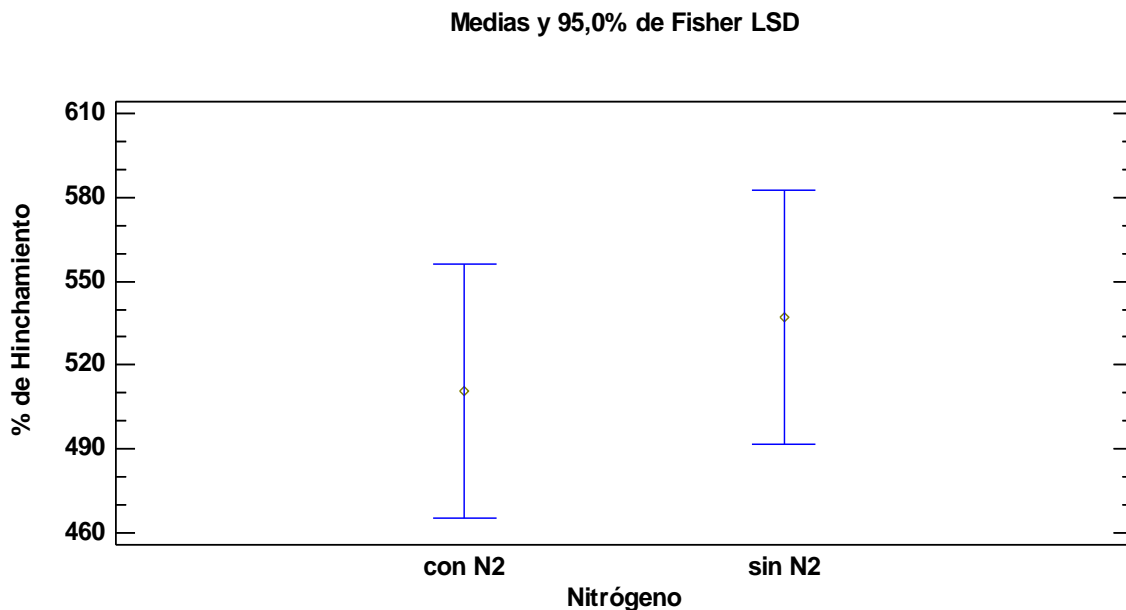
Dosis de radiación (kGy)	Uso de Nitrógeno	Concentración de PVA (w/w)	Repetición	Porcentaje de Hinchamiento (%)	Porcentaje de Hinchamiento (%) Promedio
25	Si	2,5	1	592,00	627,37
			2	662,75	
	No	2,5	1	663,00	629,05
			2	595,10	
	Si	7,5	1	775,00	829,41
			2	883,82	
	No	7,5	1	699,50	743,75
			2	788,00	
75	Si	2,5	1	578,92	550,97
			2	523,02	
	No	2,5	1	529,70	543,28
			2	556,86	
	Si	7,5	1	431,00	470,33
			2	509,65	
	No	7,5	1	573,27	531,19
			2	489,11	
25	Si	5	1	430,00	457,68
			2	463,73	
			3	465,00	
			4	472,00	
	No	5	1	447,52	466,12
			2	464,36	
			3	514,00	
			4	438,61	



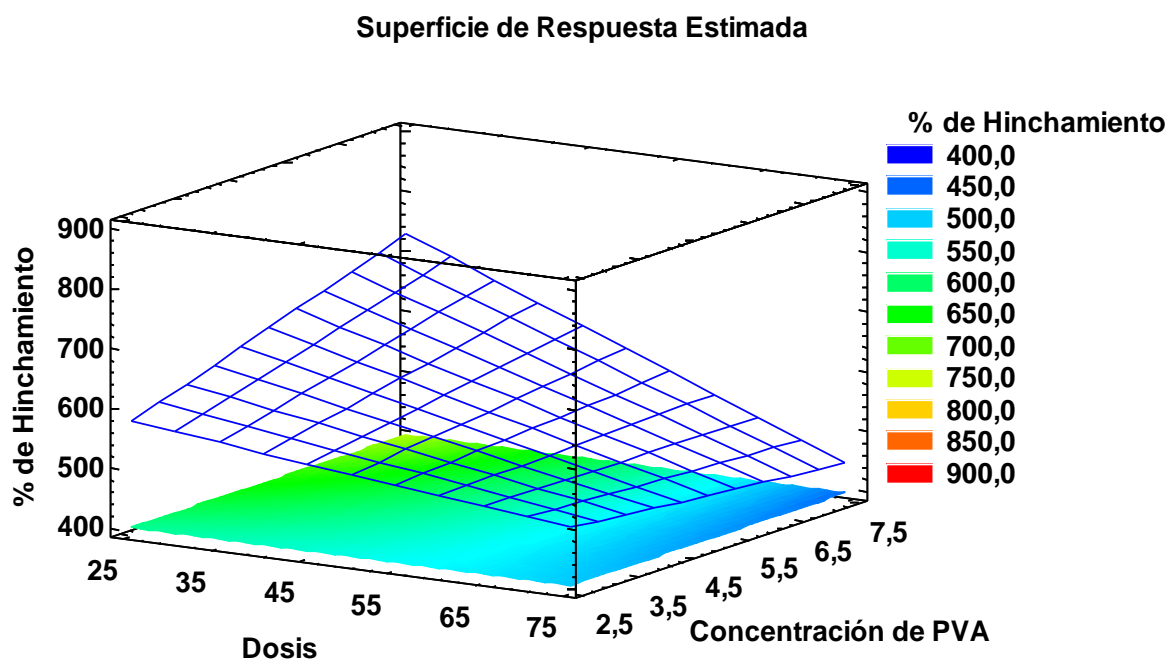
**Figura FTL.1** Gráfica de medias de Fisher LSD del porcentaje de hinchamiento en función del uso de nitrógeno en la preparación de los hidrogeles de Inu-PVA a la dosis de 25 kGy



**Figura FTL.2** Gráfica de medias de Fisher LSD del porcentaje de hinchamiento en función del uso de nitrógeno en la preparación de los hidrogeles de Inu-PVA a la dosis de 50 kGy



**Figura FTL.3** Gráfica de medias de Fisher LSD del porcentaje de hinchamiento en función del uso de nitrógeno en la preparación de los hidrogeles de Inu-PVA a la dosis de 75 kGy



**Figura FTL.4** Gráfica de superficie de respuesta de los hidrogeles de Inu-PVA, porcentaje de hinchamiento en función de la dosis de radiación y concentración de PVA

No hubo diferencia significativa entre el uso o no de nitrógeno en la preparación de la solución polimérica. La mejor concentración de PVA fue la de 7,5 % (w/w) y se obtuvieron mejores resultados hacia dosis de radiación menores.



### FICHA TÉCNICA III

## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DOSIS DE RADIACIÓN Y LA CANTIDAD DE ACRILAMIDA EN EL PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO DE LOS HIDROGELES SINTETIZADOS

**Muestra:** Hidrogeles sintetizados de inulina-acrilamida a diferentes dosis de radiación y composición

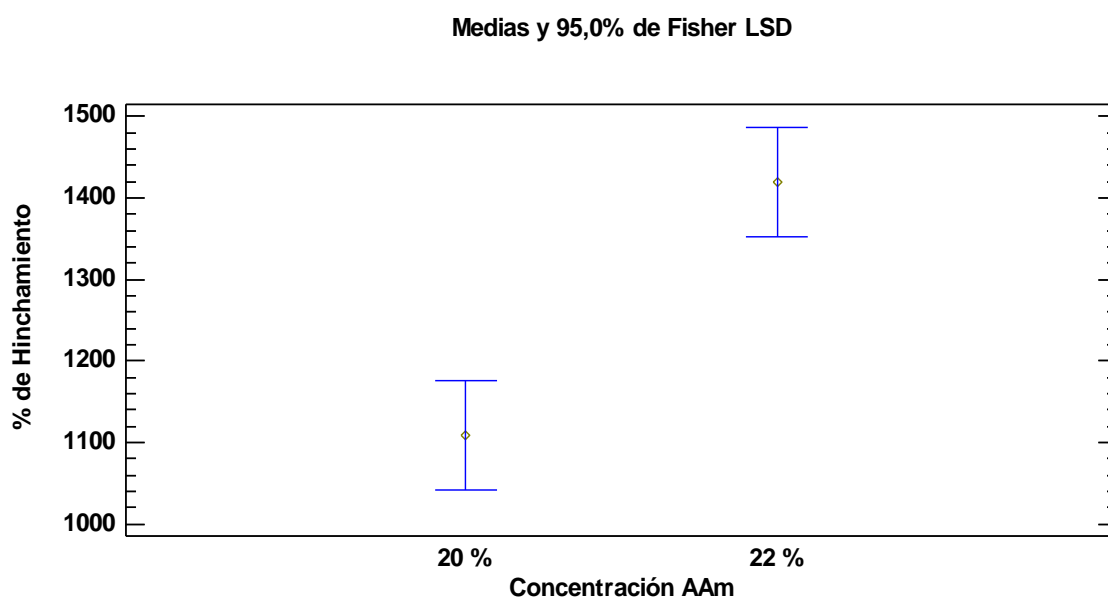
**Objetivo:** Seleccionar la mejor concentración de acrilamida y delimitar el rango de estudio de la dosis de radiación.

Para este estudio se mantuvo constante la relación Inu:AAM en 50:50. Se realizó un diseño experimental factorial mixto 4 x 3, las variables de diseño fueron la dosis de radiación, que se varió en 3 niveles: 25, 50 y 75 kGy; y la concentración de AAM, que se varió en 4 niveles: 10, 15, 20 y 25 % (w/w). Debido a que los hidrogeles no se formaron en algunas combinaciones no se analizaron los datos estadísticamente.

**Tabla FTII.1** Observaciones de los hidrogeles de Inu-AAM sintetizados a las diferentes dosis de radiación y concentración de AAM

Dosis de radiación (kGy)	Concentración de AAM % (w/w)	Observación
25	10	No se formó el hidrogel, se obtuvo una mezcla polimérica muy viscosa
	15	No se formó el hidrogel, se obtuvo una mezcla polimérica muy viscosa
	20	Se formó el hidrogel, se observó que era compacto y blando
	25	Se formó el hidrogel pero este era demasiado rígido y duro
50	10	No se formó el hidrogel, se obtuvo una mezcla polimérica muy viscosa
	15	Se formó el hidrogel, se observó que era compacto y blando
	20	Se formó el hidrogel, se observó que era compacto y blando
	25	Se formó el hidrogel pero este era demasiado rígido y duro
75	10	No se formó el hidrogel, se obtuvo una mezcla polimérica muy viscosa
	15	Se formó el hidrogel, se observó que era compacto y blando
	20	Se formó el hidrogel pero este era demasiado rígido y duro
	25	Se formó el hidrogel pero este era demasiado rígido y duro

Se observó que a la concentración de AAm del 20 % (w/w) se formaron hidrogel de buenas características, pero no se conocía si a una concentración de AAm entre el 20 y 25 % (w/w) se pudiera obtener un mejor resultado. Por ello se analizaron dos valores de concentración de AAm: 20 y 22 % (w/w). Se realizó en nuevo diseño en el que se variaron las dosis de radiación en valores de 20, 30, 40 y 50 kGy y la relación Inu:AAm en valores de 20:80, 40:60 y 60:40.



**Figura FTII.1** Gráfica de medias de Fisher LSD del porcentaje de hinchamiento en función de la concentración de acrilamida en la preparación de los hidrogel de Inu-AAm

Al comparar los porcentajes de hinchamientos obtenidos a las dos concentraciones, se observó que existe una diferencia significativa entre la concentración de AAm al 20 y 22 % (w/w), siendo mejor la concentración del 22 % (w/w). Se seleccionó la concentración de 22 % (w/w) para los estudios posteriores en el trabajo.

### FICHA TÉCNICA IIIII

## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DOSIS DE RADIACIÓN Y LA COMPOSICIÓN EN EL PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO DE LOS HIDROGELES SINTETIZADOS

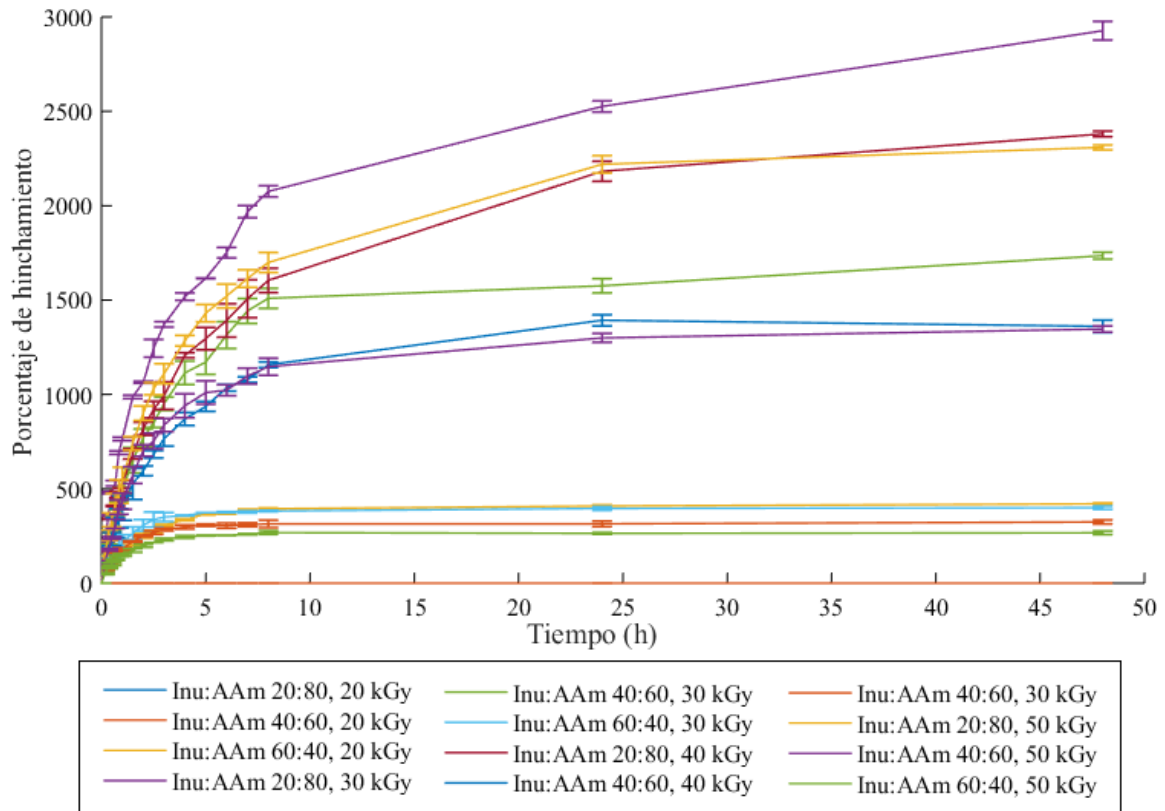
**Muestra:** Hidrogeles sintetizados de Inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico a diferentes dosis de radiación y composición

**Objetivo:** Seleccionar la dosis y la composición de los hidrogeles que permita obtener un mayor porcentaje de hinchamiento

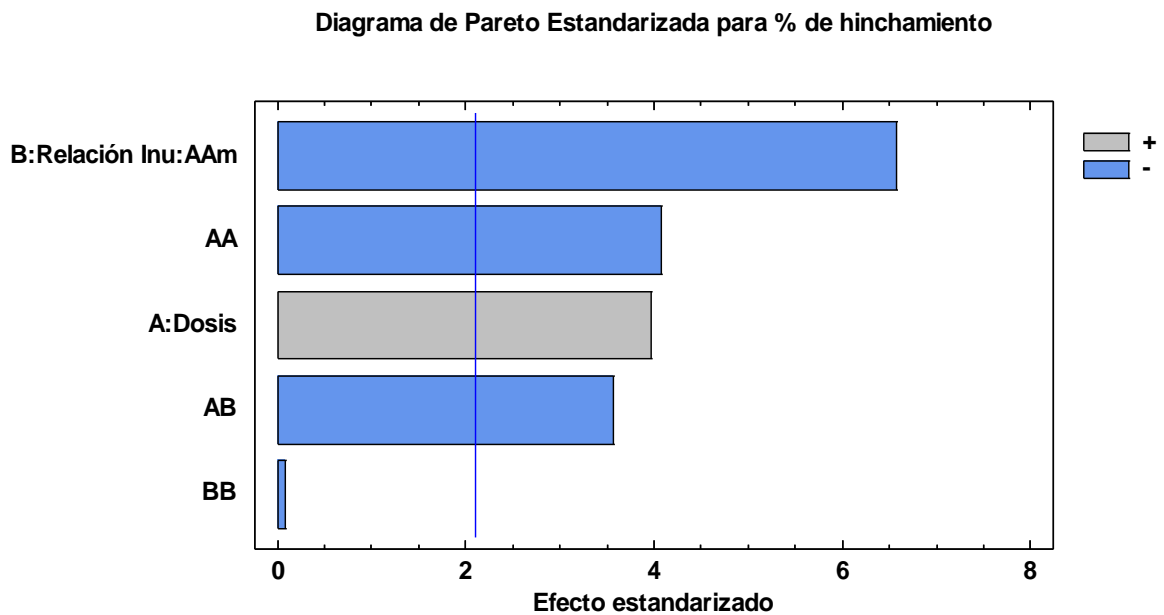
**Hidrogeles de Inu-AAm:** Se dejó constante la concentración de AAm en un valor del 22 % (w/w), pues este valor se consideró como el mejor durante pruebas pre-experimentales. Se utilizó un diseño experimental factorial mixto 4 x 3, en el que se tomó como variables de diseño a la dosis de radiación y la relación Inu:AAm. La variable de respuesta fue el porcentaje de hinchamiento. Se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI para realizar los análisis estadísticos correspondientes.

**Tabla FTIII.1** Datos del porcentaje de hinchamiento a las diferentes dosis y composiciones de los hidrogeles de Inu-AAm sintetizados

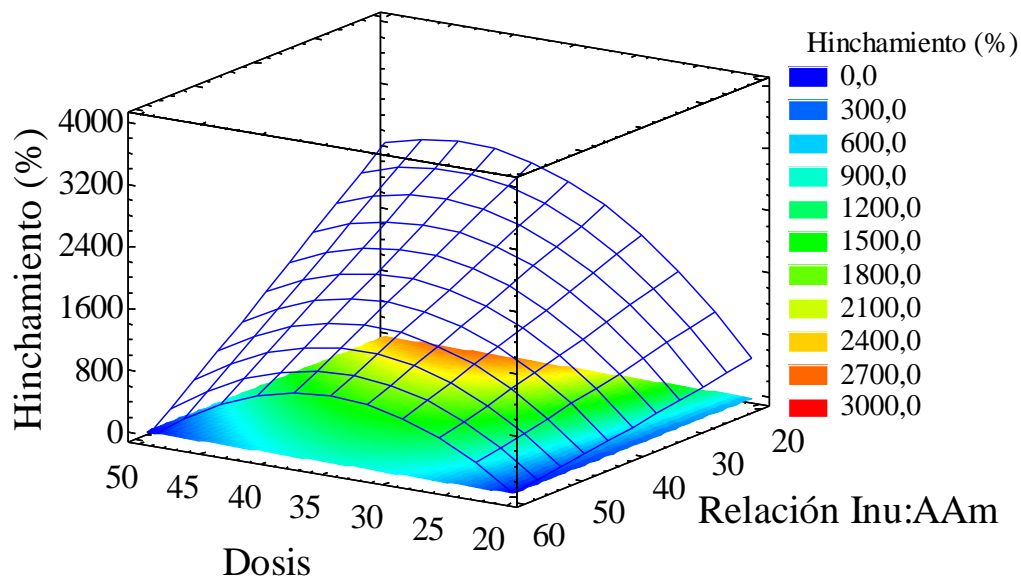
Dosis de radiación (kGy)	Relación Inu:AAm	Porcentaje de Hinchamiento (%) Primera repetición	Porcentaje de Hinchamiento (%) Segunda repetición	Porcentaje de Hinchamiento (%) Promedio
20	20:80	0	0	0
	40:60	0	0	0
	60:80	417	424	420,5
30	20:80	2 962	2 892	2 927
	40:60	1 722	1 748	1 735
	60:80	406	394	400
40	20:80	2 370	2 391	2 380,5
	40:60	1 338	1 384	1 361
	60:80	332	317	324,5
50	20:80	2 318	2 300	2 309
	40:60	1 335	1 358	1 346,5
	60:80	274	260	267



**Figura FTIII.1** Porcentaje de hinchamiento en función del tiempo de los hidrogeles de Inu-AAm sintetizados a las diferentes dosis y composiciones

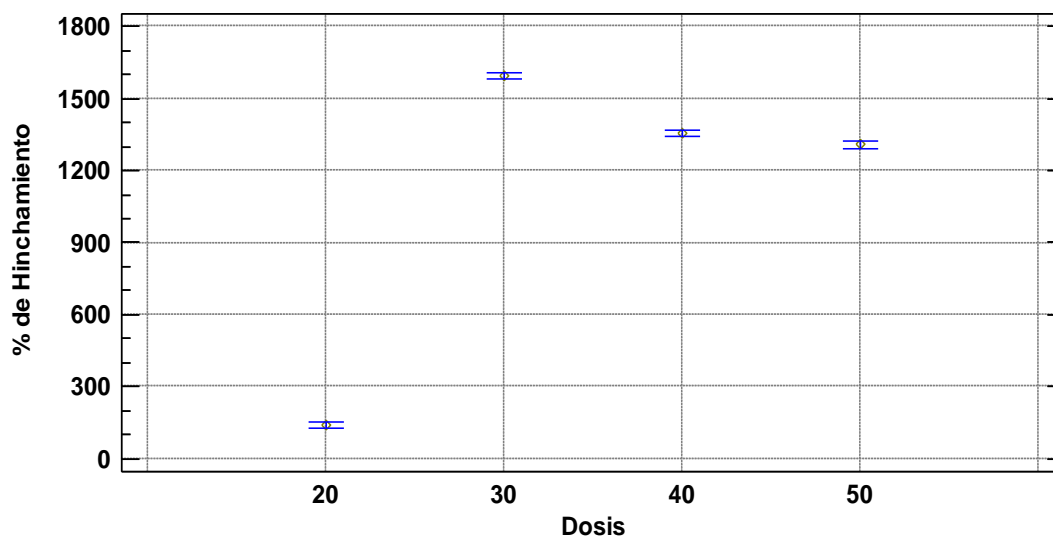


**Figura FTIII.2** Diagrama de Pareto estandarizado para el porcentaje de hinchamiento en los hidrogeles de Inu-AAm



**Figura FTIII.3** Superficie de respuesta de los hidrogeles de Inu-AAM, porcentaje de hinchamiento en función de la dosis de radiación y la relación Inu:AAM

**Medias y 95,0% de Fisher LSD**



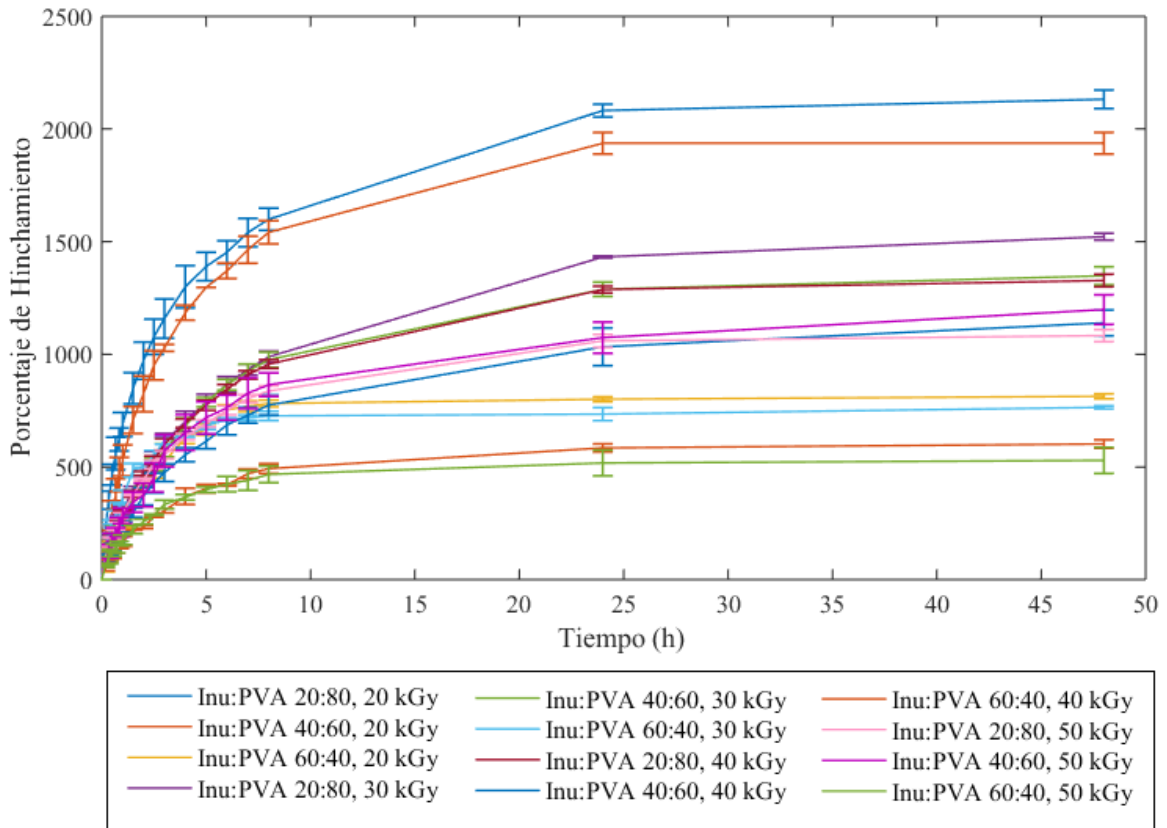
**Figura FTIII.4** Gráfica de medias de Fisher LSD del porcentaje de hinchamiento en función de la dosis para los hidrogeles de Inu-AAM

Se determinó la dosis de 30 kGy como la más adecuada puesto que se reducen los costos de radiación y se obtienen porcentajes de hinchamiento más elevados. Debido a que a la dosis de 20 kGy no se forman los hidrogeles en varias composiciones, se produce un desplazamiento del máximo real en la gráfica de superficie de respuesta hacia el valor de 44,37 kGy.

**Hidrogeles de Inu-PVA:** Para este estudio se dejó constante la concentración de PVA en un valor del 7,5 % (w/w), pues este valor se consideró como el mejor durante pruebas pre-experimentales. Se utilizó un diseño experimental factorial mixto 4 x 3, en el que se tomó como variables de diseño a la dosis de radiación y la relación Inu:PVA. Se tomó como variable de respuesta al porcentaje de hinchamiento. Se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI para realizar los análisis estadísticos correspondientes.

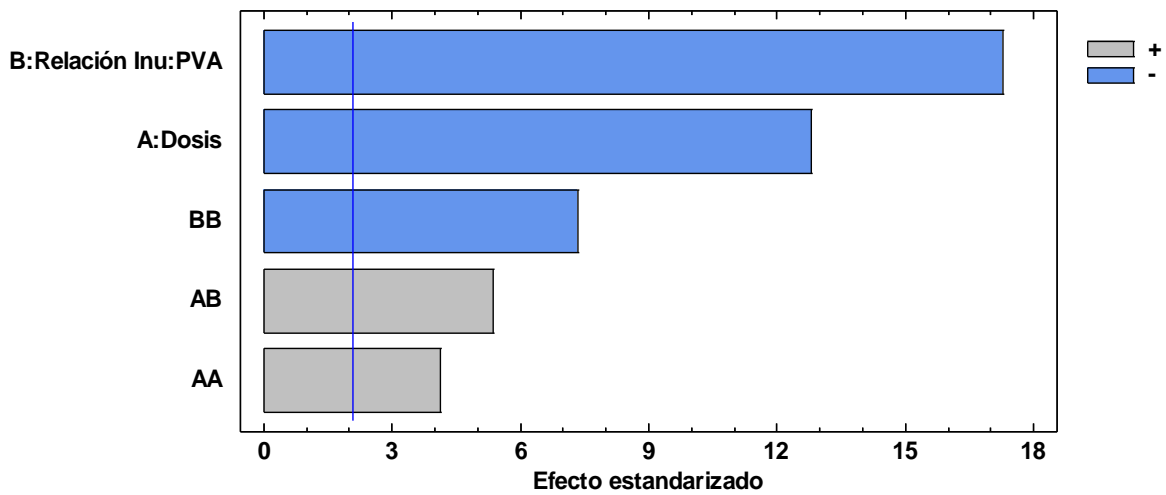
**Tabla FTIII.2** Datos del porcentaje de hinchamiento a las diferentes dosis y composiciones de los hidrogeles de Inu-PVA sintetizados

Dosis de radiación (kGy)	Relación Inu:PVA	Porcentaje de Hinchamiento (%) Primera repetición	Porcentaje de Hinchamiento (%) Segunda repetición	Porcentaje de Hinchamiento (%) Promedio
20	20:80	2 161	2 103	2 132
	40:60	1 971	1 903	1 937
	60:80	821	806	813,5
30	20:80	1 511	1 533	1 522
	40:60	1 320	1 377	1 348,5
	60:80	760	789	774,5
40	20:80	1 308	1 347	1 327,5
	40:60	1 099	1 180	1 139,5
	60:80	615	589	602
50	20:80	1 064	1 102	1 083
	40:60	1 152	1 245	1 198,5
	60:80	488	570	529

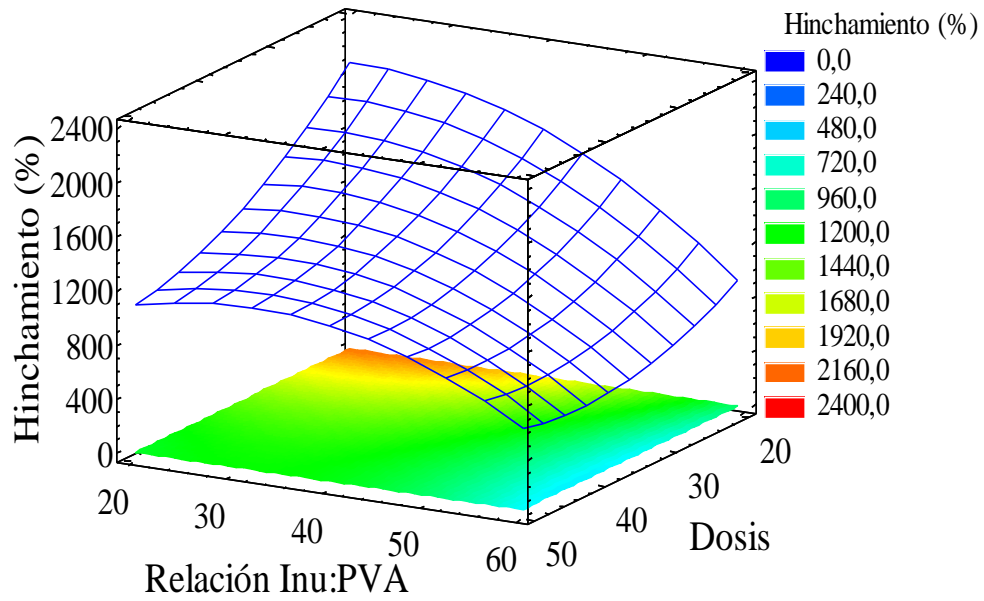


**Figura FTIII.5** Porcentaje de hinchamiento en función del tiempo de los hidrogeles de Inu-PVA sintetizados a las diferentes dosis y composiciones

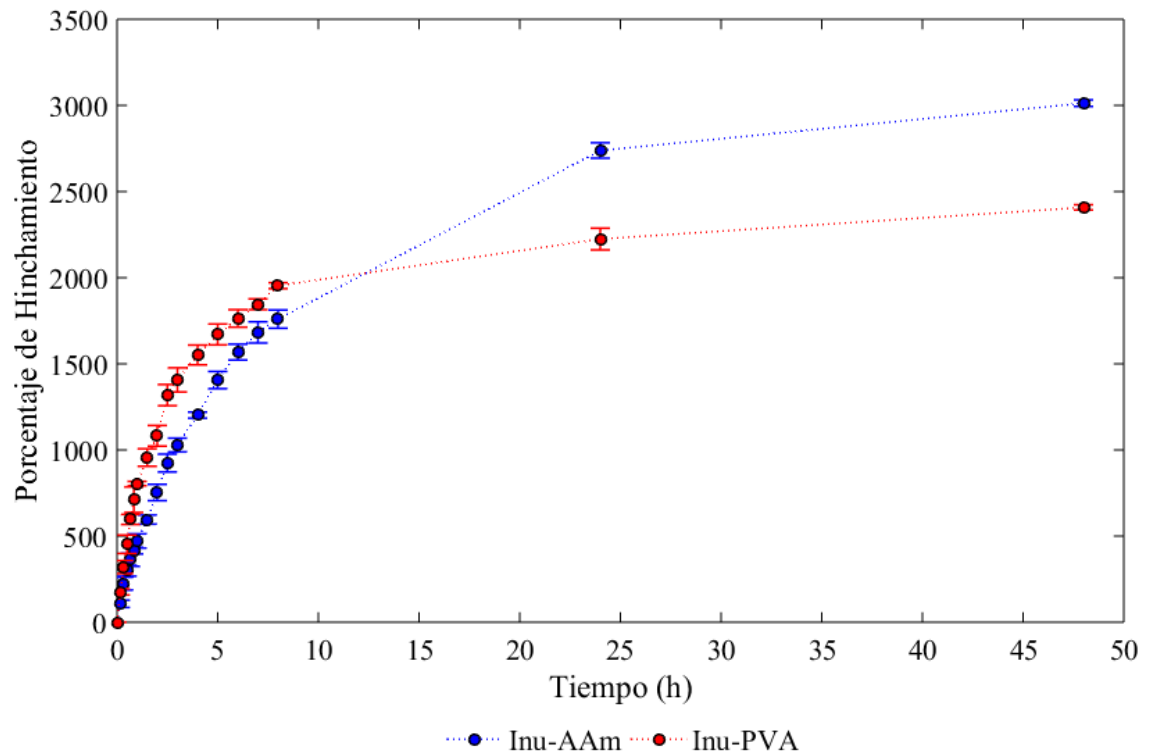
**Diagrama de Pareto Estandarizada para % de Hinchamiento**



**Figura FTIII.6** Diagrama de Pareto estandarizado para el porcentaje de hinchamiento en los hidrogeles de Inu-PVA

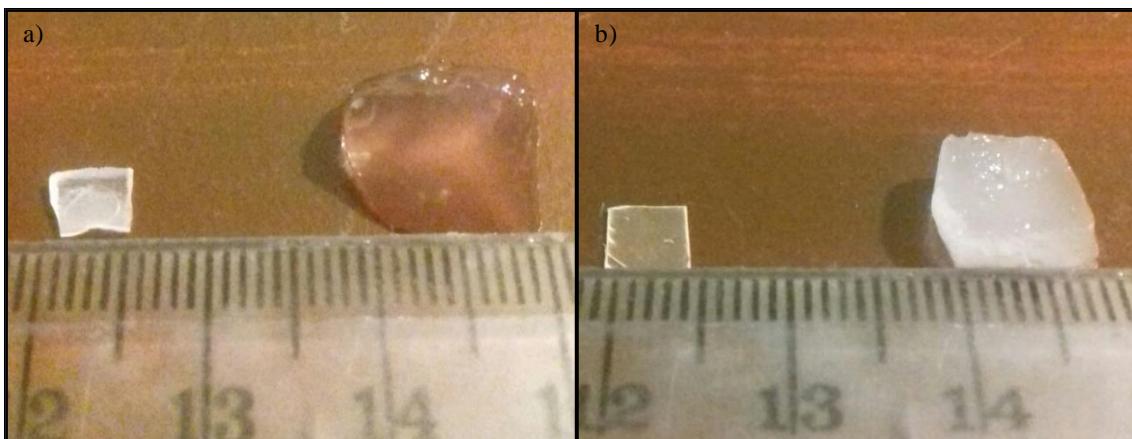


**Figura FTIII.7** Superficie de respuesta para el porcentaje de hinchamiento en los hidrogeles de Inu-PVA



**Figura FTIII.8** Porcentaje de hinchamiento en función del tiempo de los hidrogeles de Inu-AAm e Inu-PVA sintetizados a la dosis y composición más adecuadas





**Figura FTIII.9** Imagen de los hidrogeles hinchados en un tiempo de 48 horas a) hidrogel de Inu-AAm b) hidrogel de Inu-PVA

## FICHA TÉCNICA IV

### ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DOSIS DE RADIACIÓN Y LA COMPOSICIÓN EN EL CONTENIDO DE AGUA EN EQUILIBRIO

**Muestra:** Hidrogeles sintetizados de Inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico a diferentes dosis de radiación y composición

**Objetivo:** Determinar el efecto de la radiación y composición en el contenido de agua en equilibrio

**Tabla FTIV.1** Datos del conteido de agua en equilibrio a las diferentes dosis y composiciones de los hidrogeles de Inu-AAm sintetizados

Dosis de radiación (kGy)	Relación Inu:AAM	Contenido Agua en equilibrio (%) Primera repetición	Contenido Agua en equilibrio (%) Segunda repetición	Contenido Agua en equilibrio (%) Promedio
20	20:80	0	0	0
	40:60	0	0	0
	60:80	80,66	80,92	80,79
30	20:80	96,73	96,66	96,70
	40:60	94,51	94,59	94,55
	60:80	80,24	79,76	80,00
40	20:80	95,95	95,99	95,97
	40:60	93,05	93,26	93,15
	60:80	76,85	76,02	76,44
50	20:80	95,86	95,83	95,85
	40:60	93,03	93,14	93,09
	60:80	73,26	72,22	72,74

**Ejemplo de cálculo:**

$$\% \text{ C. Agua en equilibrio} = \frac{W_H - W_S}{W_H} \times 100 \quad [\text{FTIV. 1}]$$

Donde:

$W_H$ : es el peso del hidrogel hinchado en un tiempo t

$W_S$ : es el peso del xerogel en el tiempo inicial

$$\% \text{ C. Agua en equilibrio} = \frac{0,0517\text{g} - 0,01\text{g}}{0,0517\text{g}} \times 100$$

$$\% \text{ C. Agua en equilibrio} = 80,66 \%$$

$$\% \text{ C. Agua en equilibrio promedio} = \frac{80,66 + 80,92}{2}$$

$$\% \text{ C. Agua en equilibrio promedio} = 80,79 \%$$

**Tabla FTIV.2** Datos del contenido de agua en equilibrio a las diferentes dosis y composiciones de los hidrogeles de Inu-PVA sintetizados

Dosis de radiación (kGy)	Relación Inu:PVA	Contenido Agua en equilibrio (%) Primera repetición	Contenido Agua en equilibrio (%) Segunda repetición	Contenido Agua en equilibrio (%) Promedio
20	20:80	95,58	95,46	95,52
	40:60	95,17	95,01	95,09
	60:80	89,14	88,96	89,05
30	20:80	93,79	93,88	93,83
	40:60	92,96	93,23	93,09
	60:80	88,37	88,49	88,43
40	20:80	92,90	93,09	92,99
	40:60	91,66	92,19	91,92
	60:80	86,01	85,49	85,75
50	20:80	91,41	91,68	91,54
	40:60	92,01	92,57	92,29
	60:80	82,99	85,07	84,03

**Tabla FTIV.3** Datos del porcentaje de agua en equilibrio para los mejores hidrogeles de Inu-AAm e Inu-PVA

Tipo de Hidrogel	Relación Inu:AAM Inu:PVA	Número de repetición	Porcentaje de Agua en equilibrio (%)	Contenido de Agua en equilibrio (%) Promedio
Inu-AAM	20:80	1	96,78	96,79
		2	96,81	
		3	96,77	
Inu-PVA	20,78:79,22	1	96,03	96,01
		2	96,02	
		3	95,99	

## FICHA TÉCNICA VIV

### ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DOSIS Y COMPOSICIÓN EN EL PORCENTAJE DE GELACIÓN

**Muestra:** Hidrogeles sintetizados de Inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico a diferentes dosis de radiación y composición

**Objetivo:** Determinar el efecto de la radiación y composición en el porcentaje de gelación

**Tabla FTV.1** Datos experimentales determinados para calcular el porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-AAM cuando la dosis de radiación permanece constante a 30 kGy

Relación Inu:AAM	Masa de xerogel antes del proceso (g)	Masa de xerogel después del proceso (g)	Porcentaje de gelación
20:80	0,1008	0,0736	73,02
40:60	0,1008	0,0576	57,14
60:40	0,1009	0,0394	39,05

**Tabla FTV.2** Datos experimentales determinados para calcular el porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-AAM cuando la relación Inu:AAM permanece constante a 20:80

Dosis de radiación (kGy)	Masa de xerogel antes del proceso (g)	Masa de xerogel después del proceso (g)	Porcentaje de gelación
30	0,1008	0,0736	73,02
40	0,1002	0,0695	69,36
50	0,1005	0,0703	69,95

**Ejemplo de cálculo:**

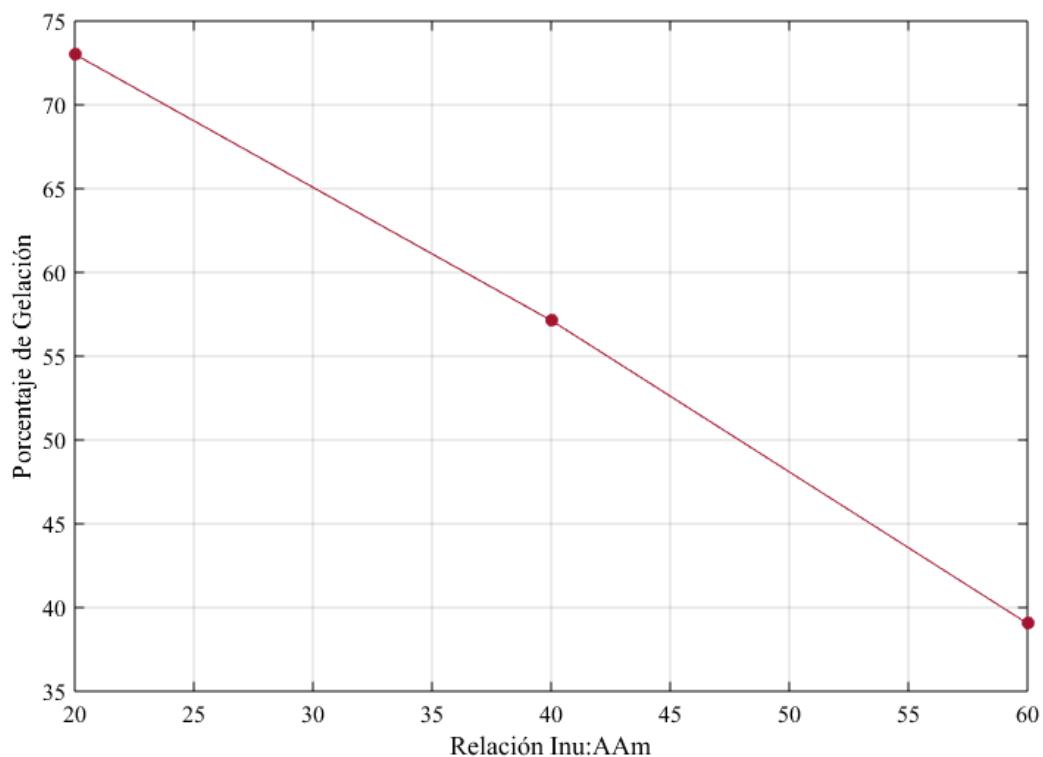
$$\% \text{Gelación} = \frac{W_{HS}}{W_S} \times 100 \quad [\text{FTV. 1}]$$

Donde:

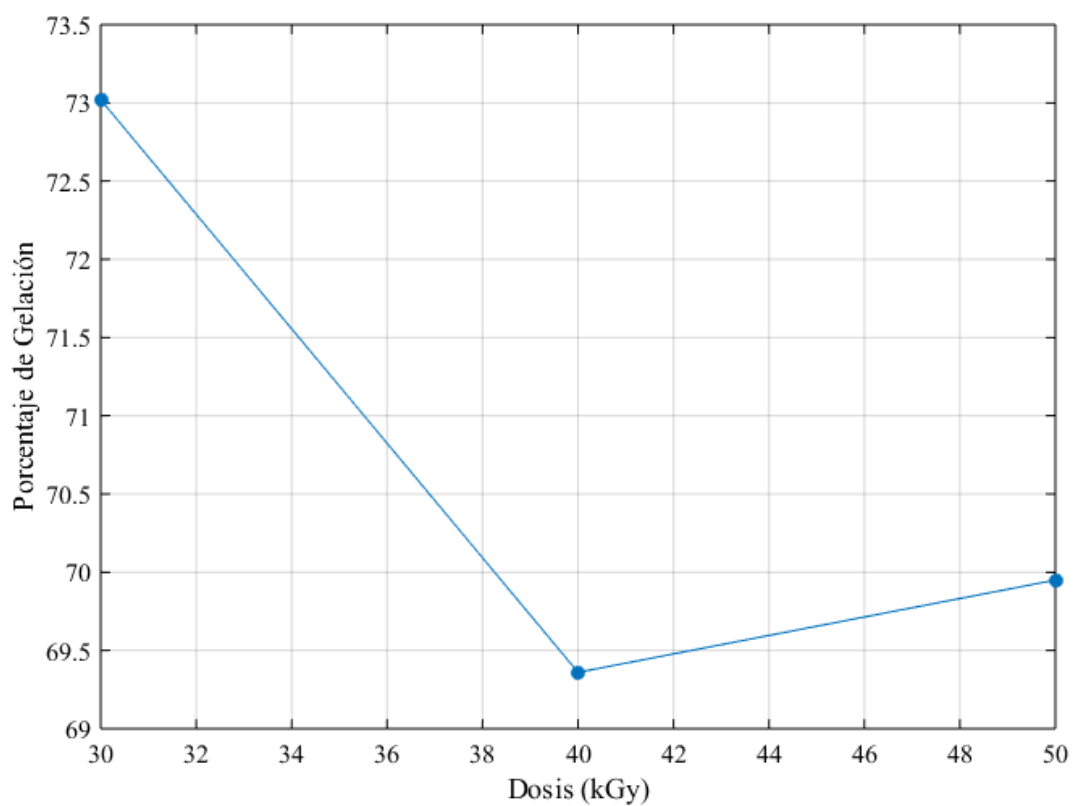
$W_{HS}$ : es el peso del hidrogel seco luego del proceso

$W_S$ : es el peso del hidrogel seco antes del proceso

$$\% \text{ Gelación} = \frac{0,1008 - 0,0736}{0,1008} \times 100 = 73,02 \%$$



**Figura FTV.1** Porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-AAm en función de la relación de Inu:AAM a la dosis de 30 kGy



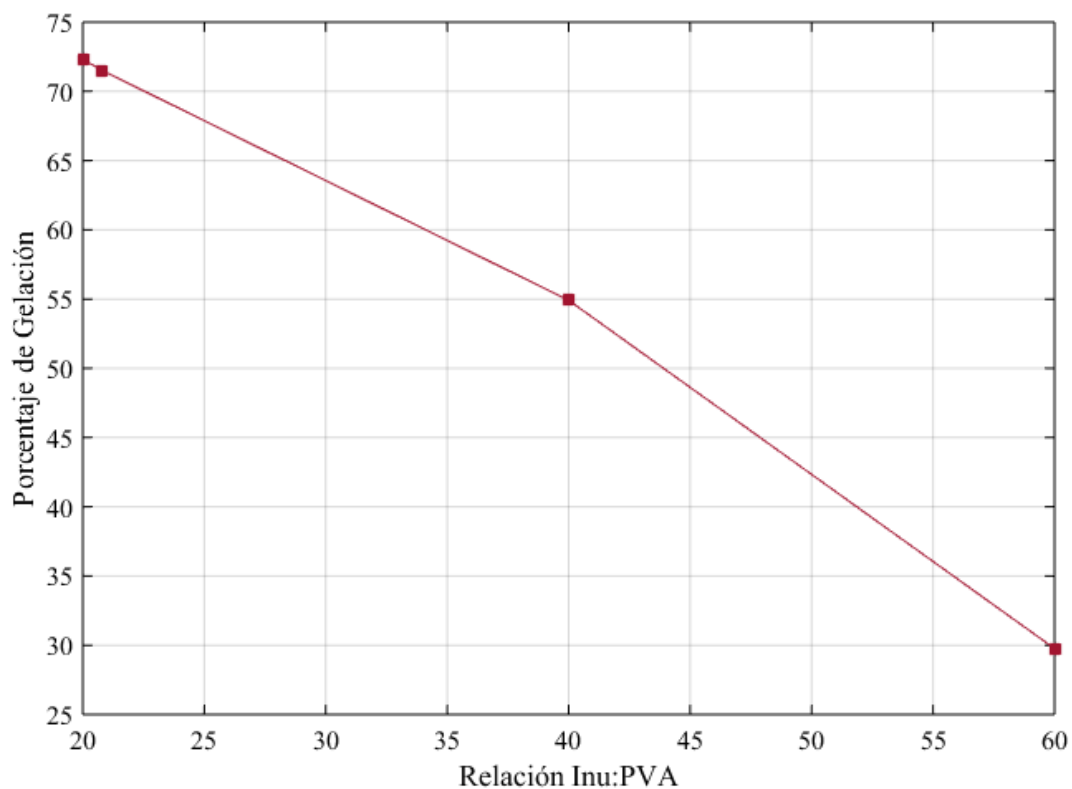
**Figura FTV.2** Porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-AAm en función de la dosis a la relación Inu:AAM 20:80

**Tabla FTV.3** Datos experimentales determinados para calcular el porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-PVA cuando la dosis de radiación permanece constante a 20 kGy

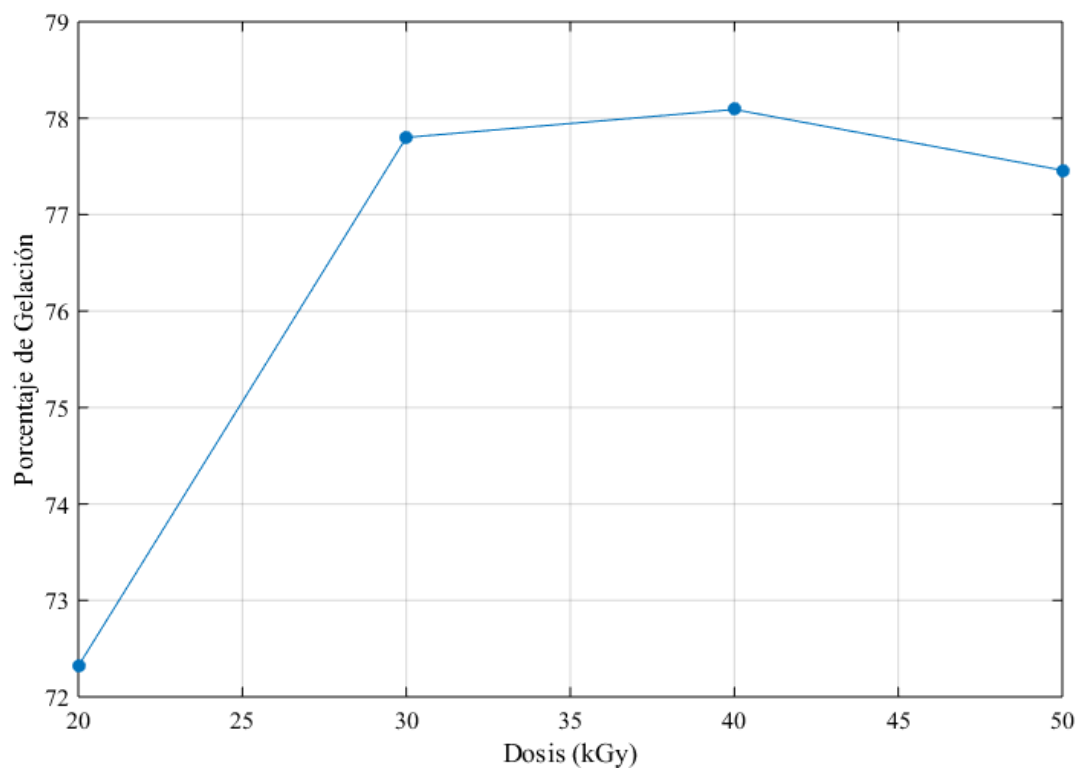
Relación Inu:PVA	Masa de xerogel antes del proceso (g)	Masa de xerogel después del proceso (g)	Porcentaje de gelación
20:80	0,1008	0,0729	72,32
20,78:79,22	0,1008	0,0721	71,53
40:60	0,1009	0,0554	54,91
60:40	0,0998	0,0297	29,76

**Tabla FTV.4** Datos experimentales determinados para calcular el porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-PVA cuando la relación Inu:PVA permanece constante a 20:80

Dosis de radiación (kGy)	Masa de xerogel antes del proceso (g)	Masa de xerogel después del proceso (g)	Porcentaje de gelación
20	0,1008	0,0729	72,32
30	0,1009	0,0785	77,80
40	0,1004	0,0784	78,09
50	0,1007	0,078	77,46



**Figura FTV.3** Porcentaje de gelación de los hidrogeles de Inu-PVA en función de la relación de Inu:PVA a la dosis de 20 kGy



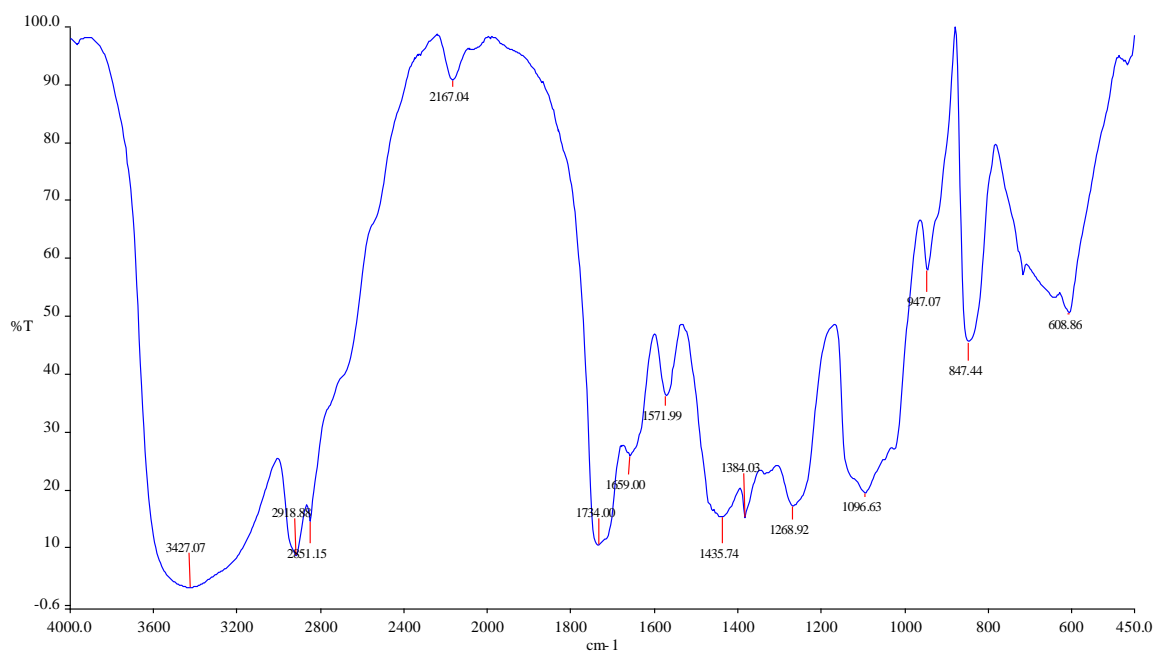
**Figura FTV.4** Porcentaje de gelación de los hidrogel de Inu-PVA en función de la dosis a la realción Inu:PVA 20:80

## FICHA TÉCNICA VI

### ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADAS DE FOURIER

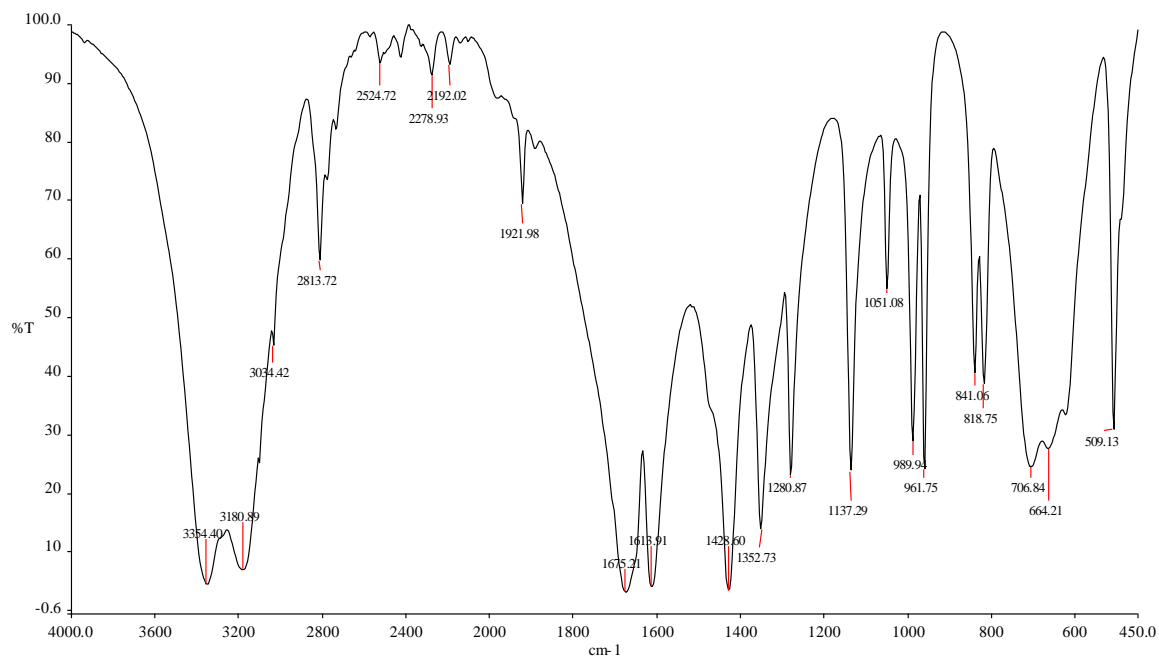
**Muestra:** Xerogeles de inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico pulverizados, acrilamida, alcohol polivinílico e inulina

**Objetivo:** Confirmar la obtención de dos nuevos materiales poliméricos al comprobar las bandas de los grupos funcionales entre los nuevos materiales y sus materias primas correspondientes.

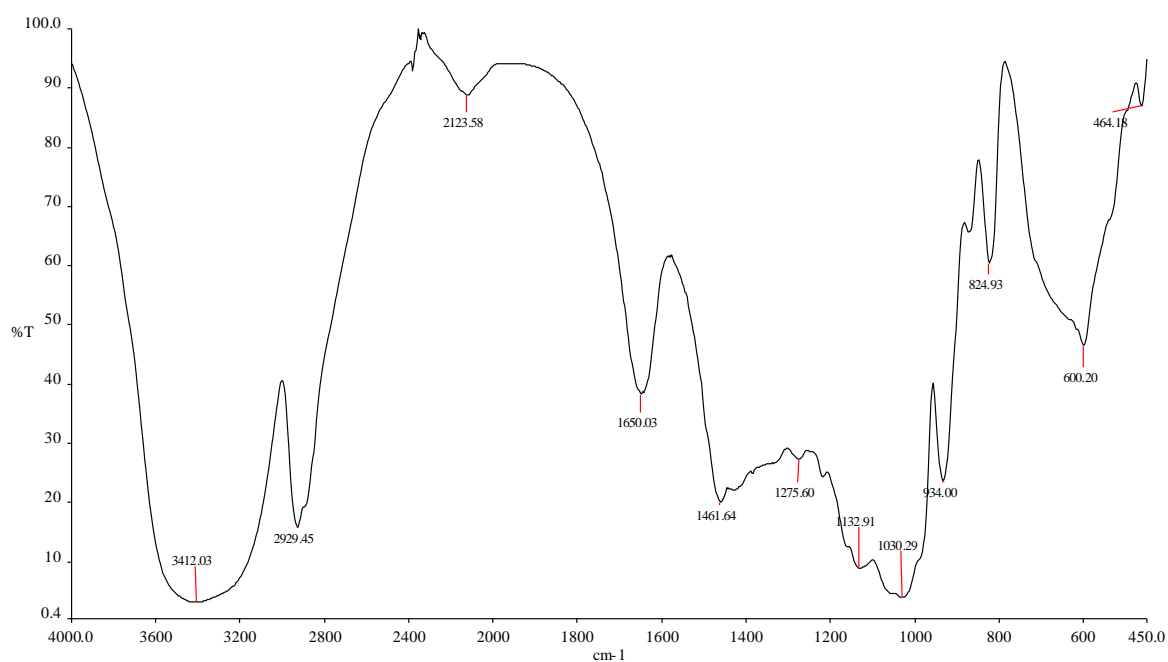


**Figura FTVI.1** Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) del alcohol polivinílico

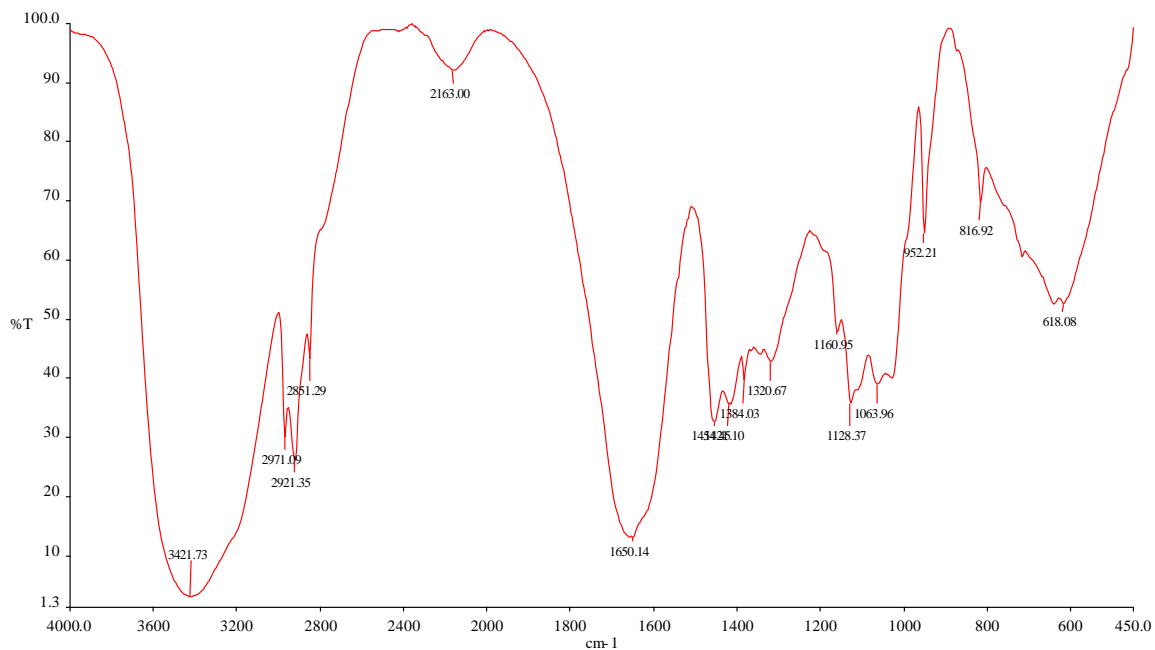




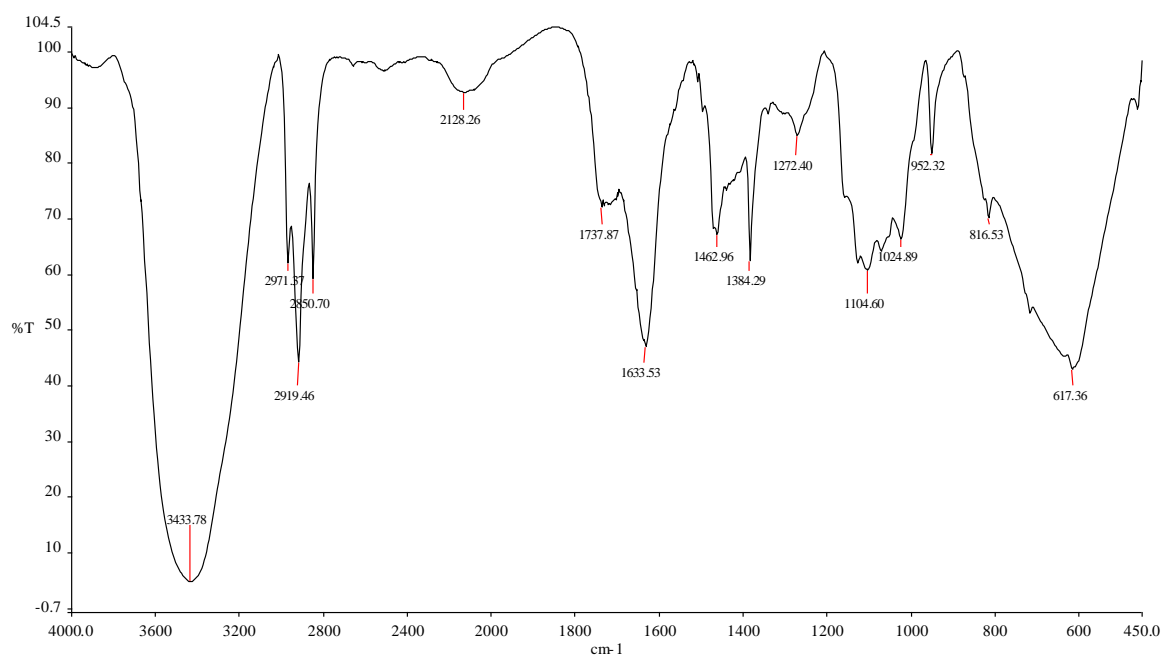
**Figura FTVI.2** Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) de la acrilamida



**Figura FTVI.3** Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) de la inulina



**Figura FTVI.4** Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) del hidrogel Inu-AAM



**Figura FTVI.5** Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) del hidrogel Inu-PVA

## FICHA TÉCNICA VIII

### ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

**Muestra:** Xerogeles de inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico pulverizados, acrilamida, alcohol polivinílico e inulina

**Objetivo:** Determinar las temperaturas de degradación de los hidrogeles y las materias primas. Conocer los intervalos de temperatura en los que se degradan los diferentes componentes de los nuevos materiales poliméricos.

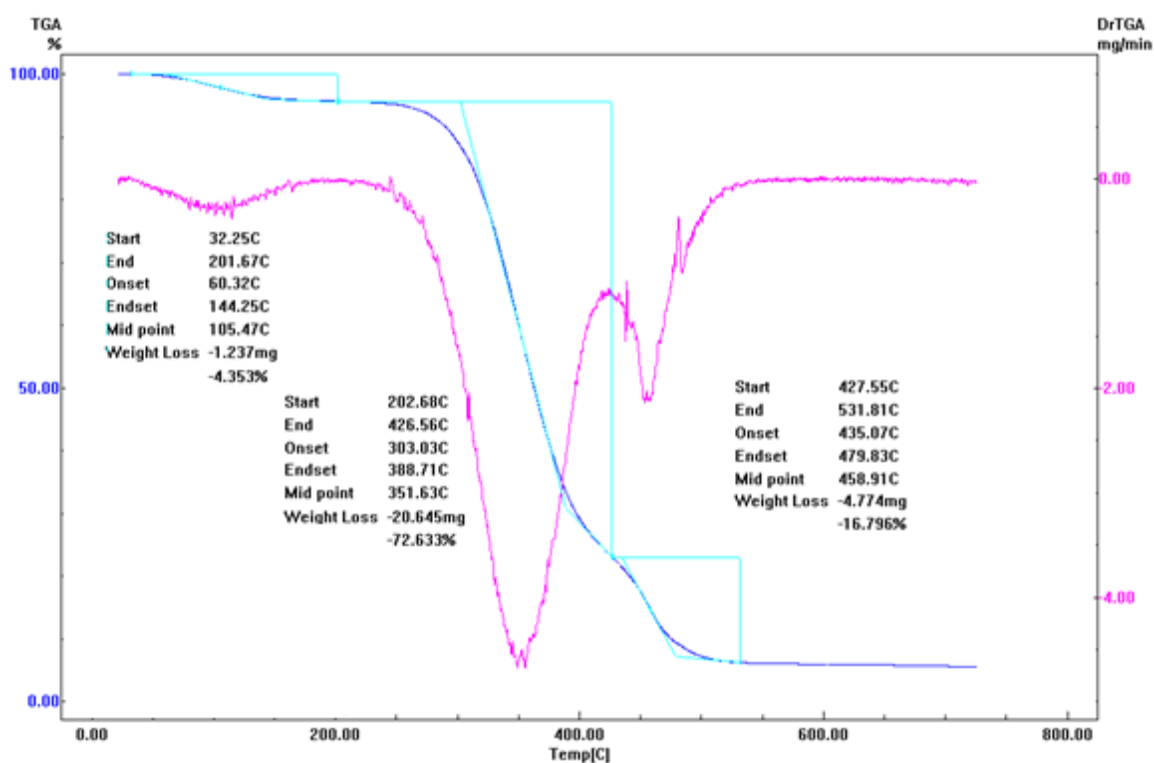


Figura FTVII.1 Análisis termogravimétrico del alcohol polivinílico

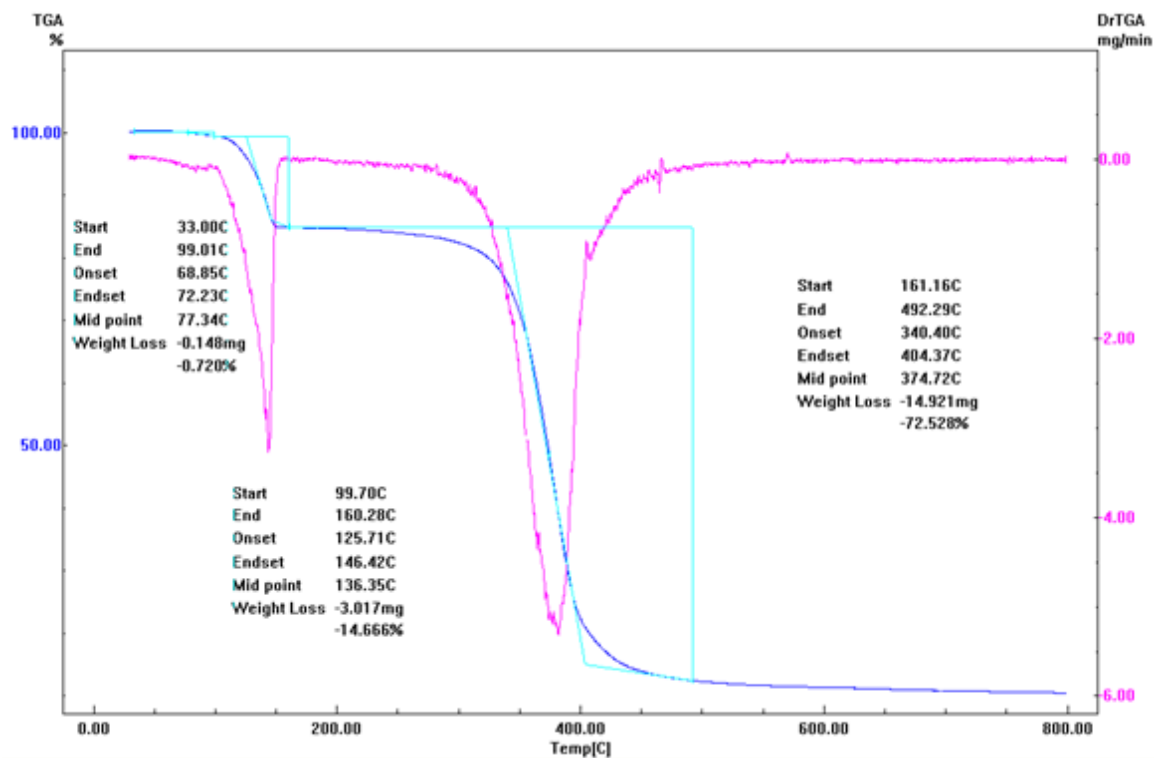


Figura FTVII.2 Análisis termogravimétrico de la acrilamida

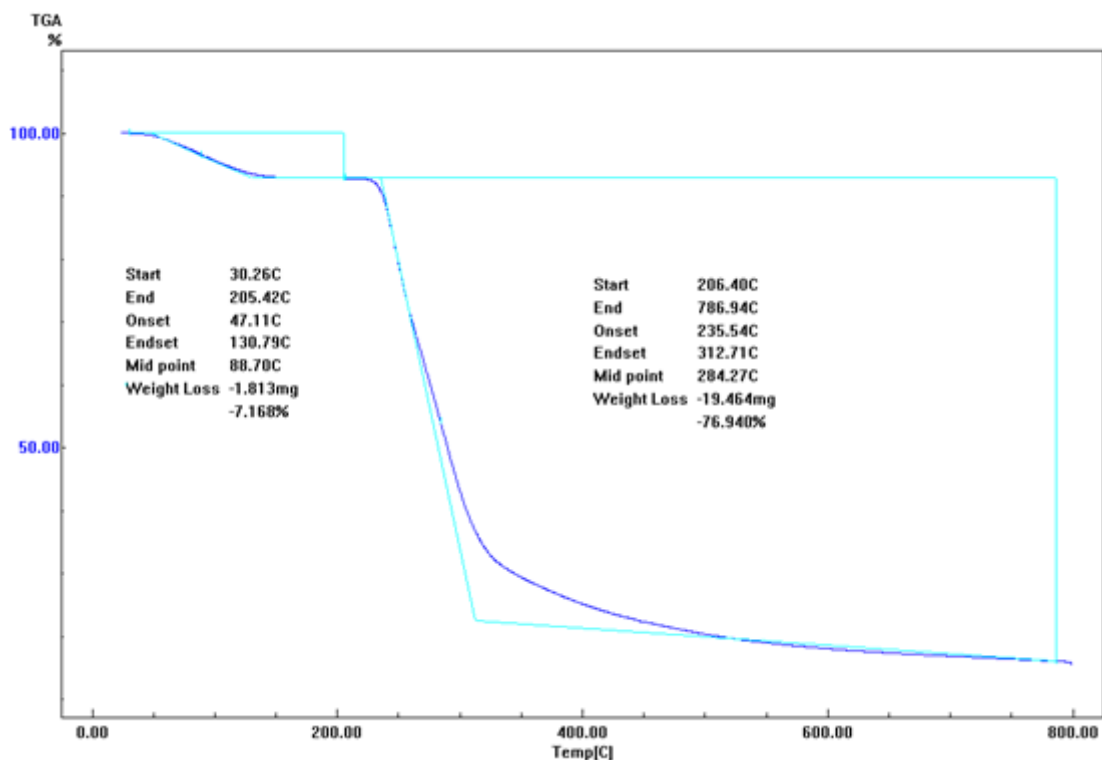


Figura FTVII.3 Análisis termogravimétrico de la inulina

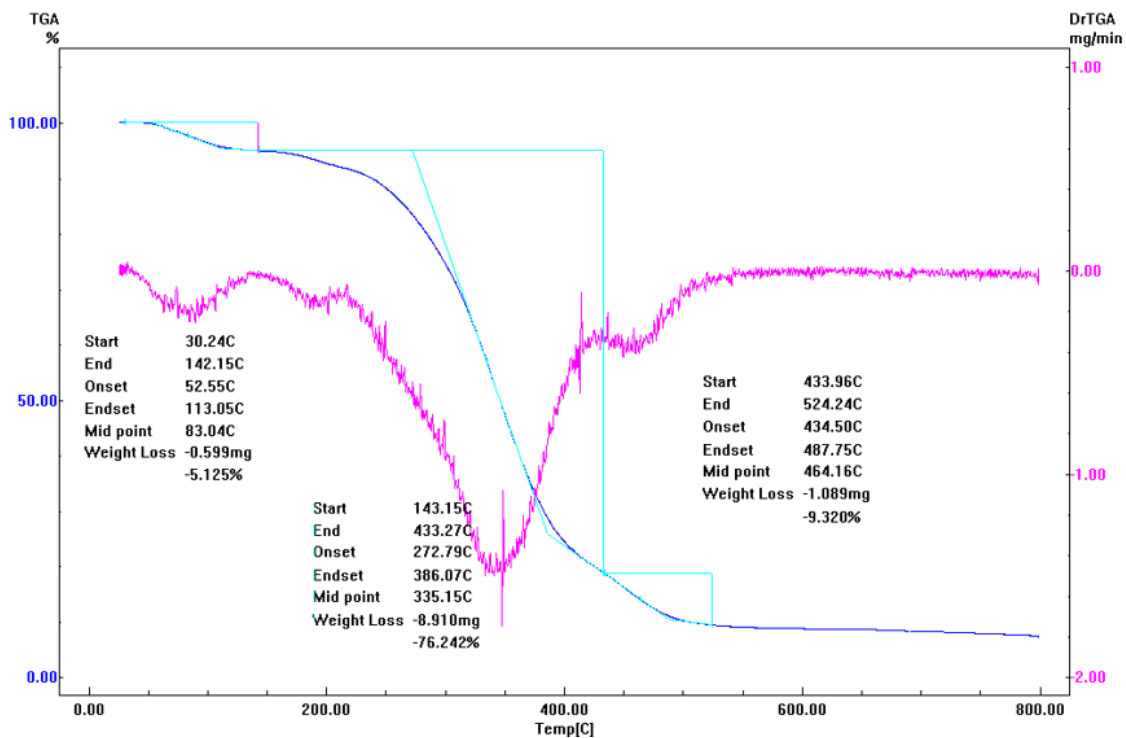


Figura FTVII.4 Análisis termogravimétrico del hidrogel de Inu-PVA

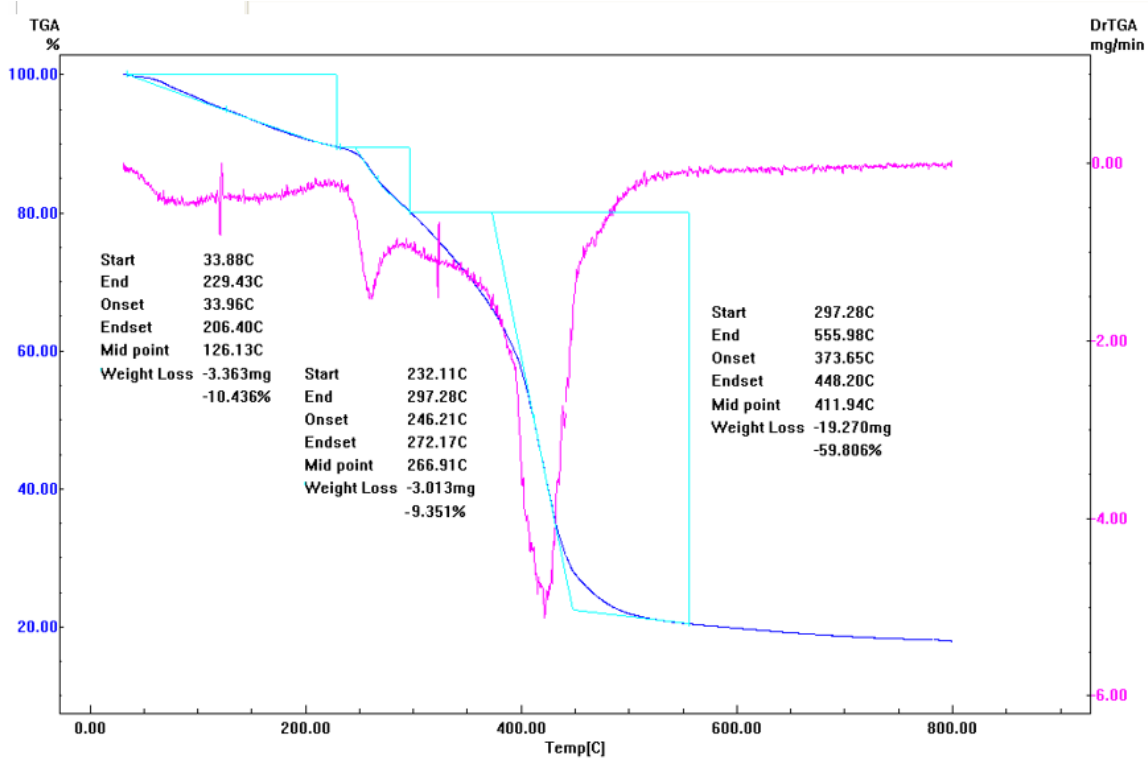


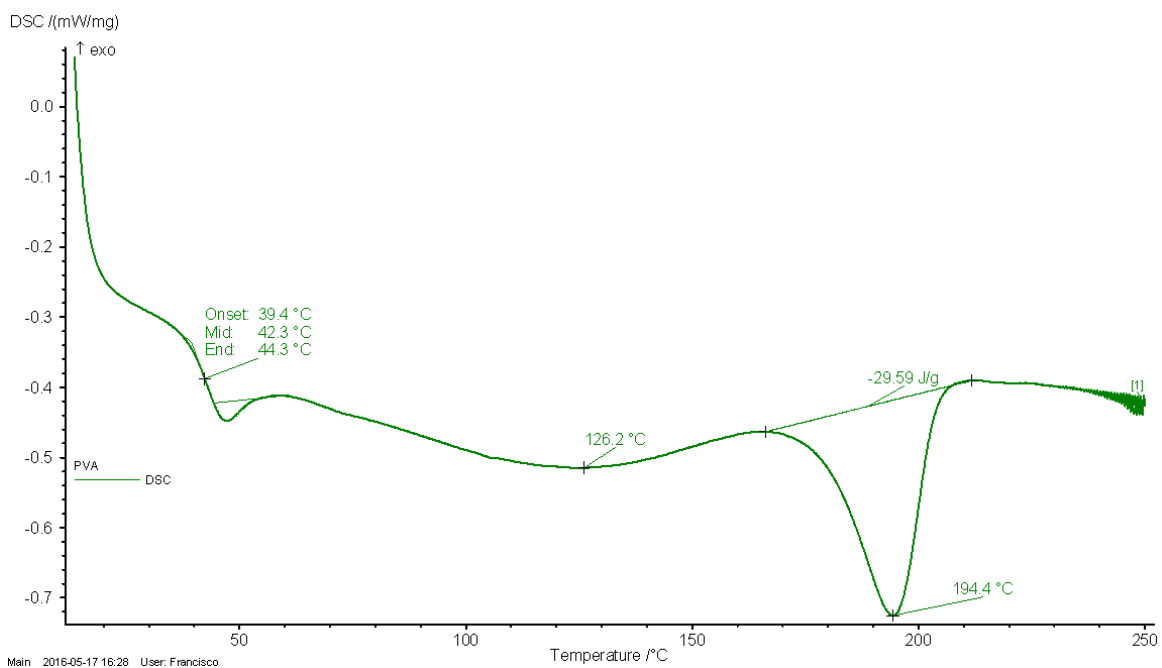
Figura FTVII.5 Análisis termogravimétrico del hidrogel de Inu-AAM

## FICHA TÉCNICA VII

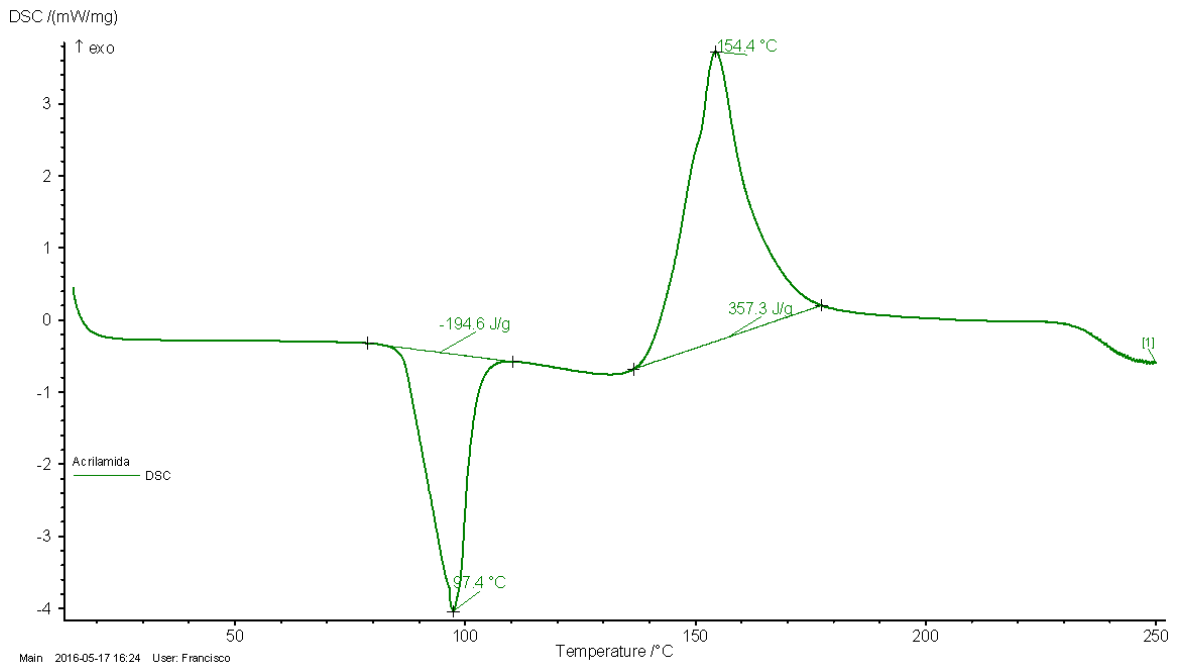
### ANÁLISIS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

**Muestra:** Xerogeles de inulina-acrilamida e inulina-alcohol polivinílico pulverizados, acrilamida, alcohol polivinílico e inulina

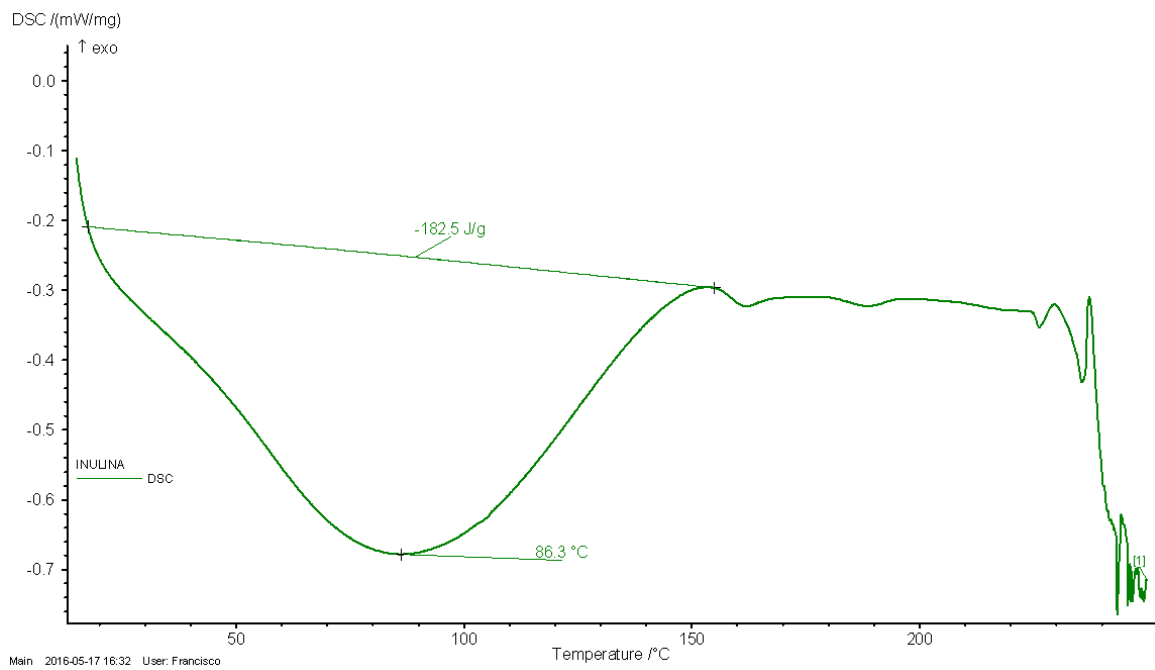
**Objetivo:** Determinar los intervalos de temperatura en los que se producen las transiciones vítreas y la fusión de los hidrogeles y sus materias primas, así como la comprobación de un nuevo material polimérico.



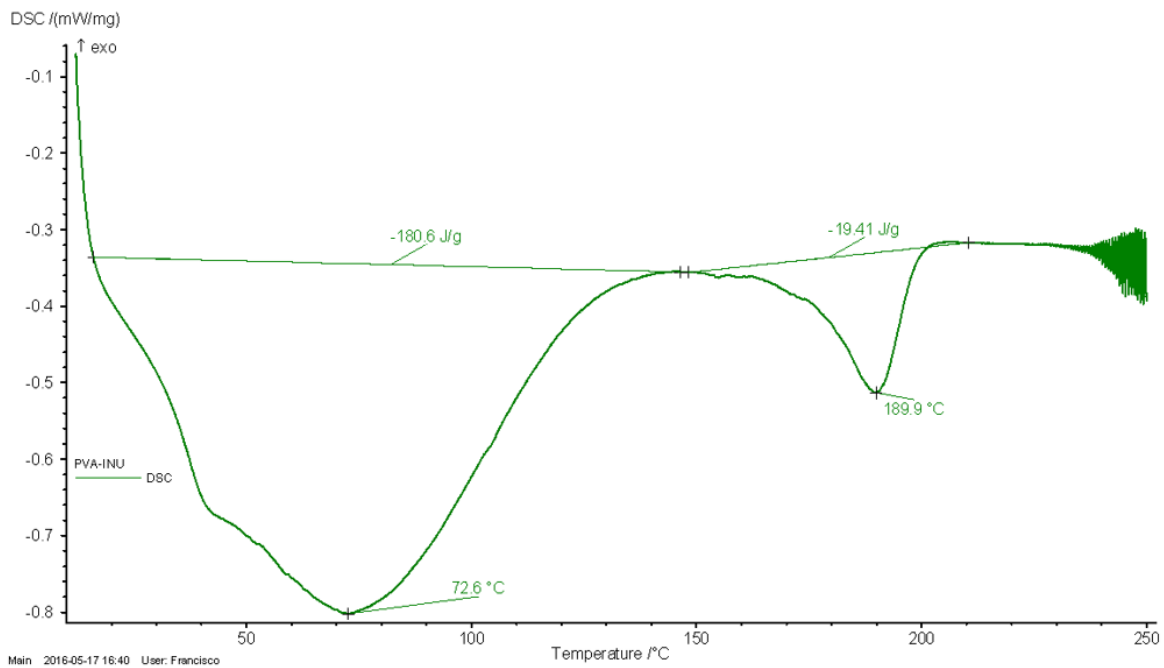
**Figura FTVIII.1** Análisis de calorimetría diferencial de barrido del alcohol polivinílico



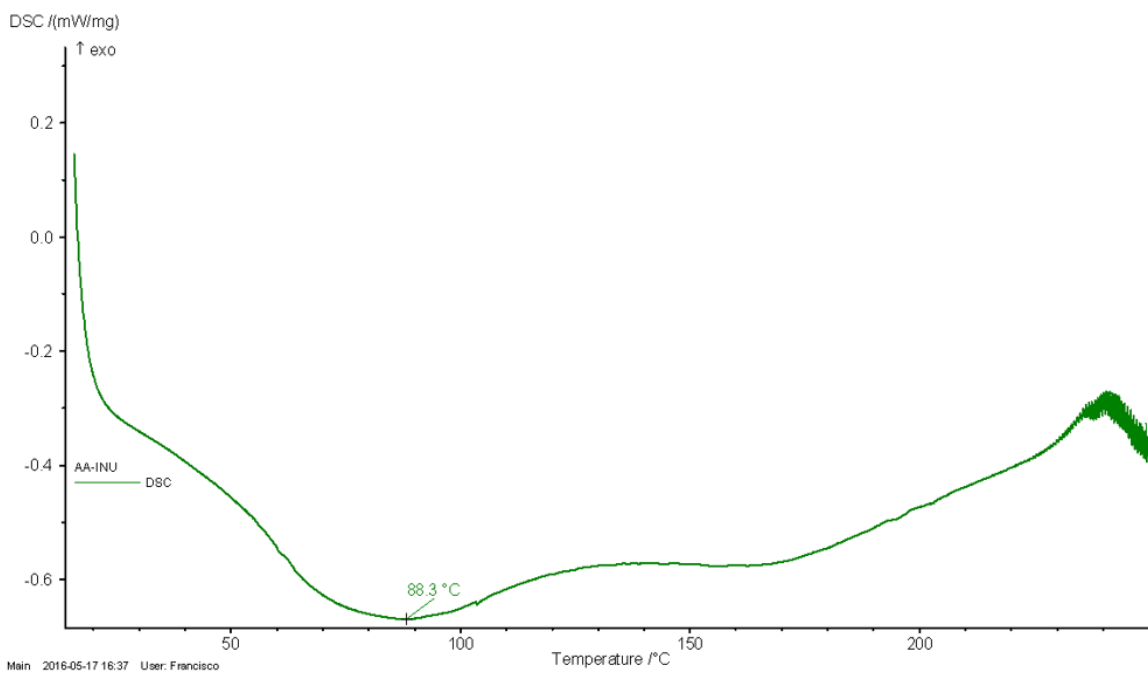
**Figura FTVIII.2** Análisis de calorimetría diferencial de barrido del acrilamida



**Figura FTVIII.3** Análisis de calorimetría diferencial de barrido de la inulina



**Figura FTVIII.4** Análisis de calorimetría diferencial de barrido del hidrogel de Inu-PVA



**Figura FTVIII.5** Análisis de calorimetría diferencial de barrido del hidrogel de Inu-AAm

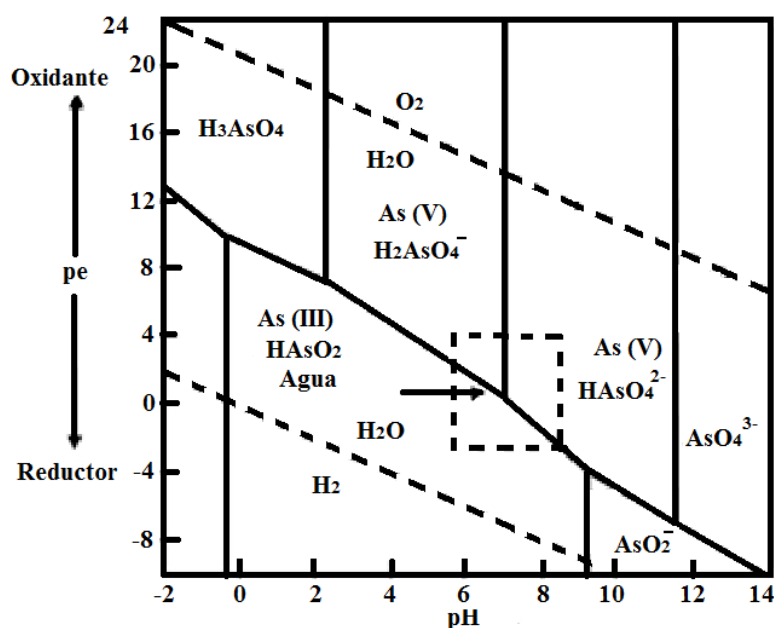


## FICHA TÉCNICA IX

### ESTUDIO DE LA AFINIDAD QUÍMICA ENTRE EL ARSÉNICO Y LOS HIDROGELES

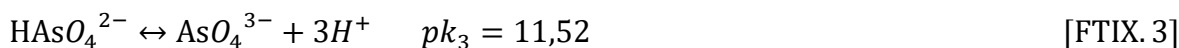
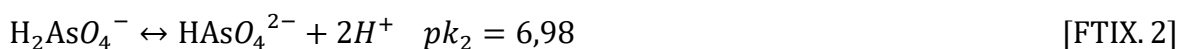
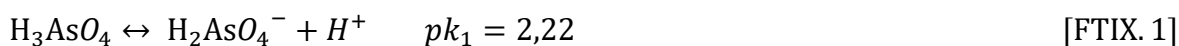
**Muestra:** Solución sintética de arsénico e hidrogeles sintetizados

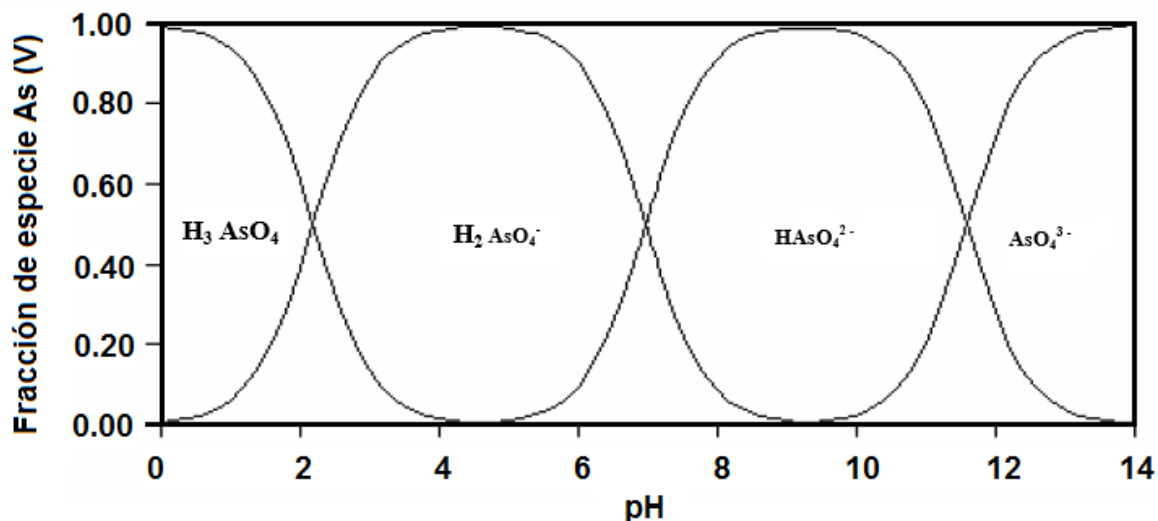
**Objetivo:** Determinar el hidrogel que presente una mayor afinidad química para remover arsénico según bibliografía



**Figura FTIX.1.** Diagrama de Pourbaix para un sistema arsénico agua a 25°C (Cumbal, et al., 2015)

Tomando en cuenta que las soluciones se prepararon a partir de arsenato de sodio heptahidratado [ $\text{Na}_2\text{HAs}_2\text{O}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ] y las condiciones de remoción, el arsénico en la solución se encontró como ácido arsénico. Las reacciones de disociación del ácido arsénico son las que se muestran a continuación

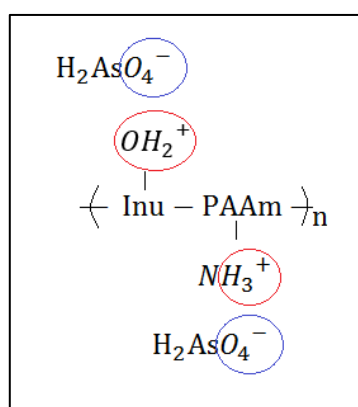




**Figura FTIX.2.** Distribución de especies arsenicales del arsénico (V) en función del pH (Cumbal, et al., 2015)

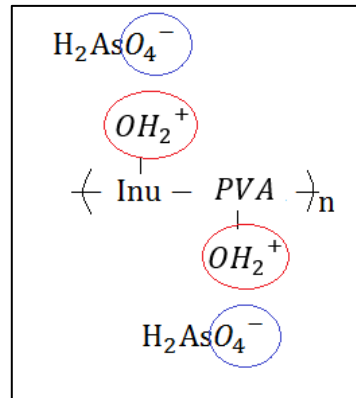
A pH 6 el arsénico tiene carga negativa presentando los dos grupos  $H_2AsO_4^-$  y  $HAsO_4^{2-}$ , con predominancia del grupo  $H_2AsO_4^-$ .

A estas condiciones el hidrogel de Inu-AAm presentará los dos grupos  $OH^-$  y  $OH_2^+$  con predominancia del grupo  $OH_2^+$  por encontrarse en medio ácido. Por otro lado los grupos amida se encuentran protonados a tales condiciones  $NH_3^+$ .



**Figura FTIX.3.** Posible interacción electrostática entre los hidrogel de Inu-AAm y el arsénico durante la remoción

Por otro lado los hidrogel de Inu-PVA tendrán únicamente los grupos  $OH^-$  y  $OH_2^+$  con predominancia del grupo  $OH_2^+$  por encontrarse en medio ácido.



**Figura FTIX.4.** Posible interacción electrostática entre los hidrogeles de Inu-PVA y el arsénico durante la remoción

De acuerdo a las interacciones presentadas entre los hidrogeles y el arsénico se determinó que el hidrogel de Inu-AAM es el más idóneo para la remoción puesto que presenta los grupos  $\text{OH}_2^+$  y  $\text{NH}_3^+$  que hacen sinergia para una mejor remoción del arsénico.

## FICHA TÉCNICA X

### DETERMINACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

**Muestra:** Solución sintética de arsénico

**Objetivo:** Construir las isotermas de adsorción para el arsénico con los hidrogeles de Inulina-Acrilamida

**Tabla FTX.1** Datos obtenidos para construir las isotermas de adsorción del arsénico con los hidrogeles de Inu-AAM a pH 6

Concentración inicial (mg/L)	Volumen de solución (L)	Masa de xerogel (g)	Concentración final (C <sub>e</sub> ) (mg/L)	q <sub>e</sub> ( $\frac{\text{mg As}}{\text{g xerogel}}$ )	C <sub>e</sub> /q <sub>e</sub>	Ln C <sub>e</sub>	Ln q <sub>e</sub>
0,338	0,2	0,0197	0,145	1,9594	0,0740	-1,9310	0,6726
0,338	0,2	0,1996	0,132	0,2064	0,6395	-2,0250	-1,5779
0,338	0,2	0,5017	0,106	0,0925	1,1461	-2,2443	-2,3807
0,338	0,2	1,0009	0,099	0,0478	2,0730	-2,3126	-3,0416
0,338	0,2	1,4993	0,091	0,0329	2,7619	-2,3969	-3,4128
0,338	0,2	2,999	0,069	0,0179	3,8463	-2,6736	-4,0208

#### Ejemplo de cálculo:

Para determinar el mecanismo de adsorción del proceso, se estudiaron los modelos de las isotermas de Langmuir y Freundlich según las ecuaciones FTX.1 y FTX.2, respectivamente.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{1}{q_{\max}} C_e \quad [\text{FTX. 1}]$$

Donde:

q<sub>e</sub>: Cantidad de arsénico adsorbido en el equilibrio en el hidrogel ( $\frac{\text{mg As}}{\text{g xerogel}}$ )

q<sub>max</sub>: Cantidad máxima de arsénico adsorbido en el hidrogel

K<sub>L</sub>: Constante de equilibrio del modelo de Langmuir

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad [\text{FTX. 2}]$$

Donde:

K<sub>f</sub>: Constante de equilibrio del modelo de Freundlich

n: intensidad de adsorción

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad [\text{FTX. 3}]$$

Donde:

C<sub>o</sub>: Concentración inicial (mg/L)

C<sub>e</sub>: Concentración de equilibrio (mg/L)

V: Volumen de la solución (L)

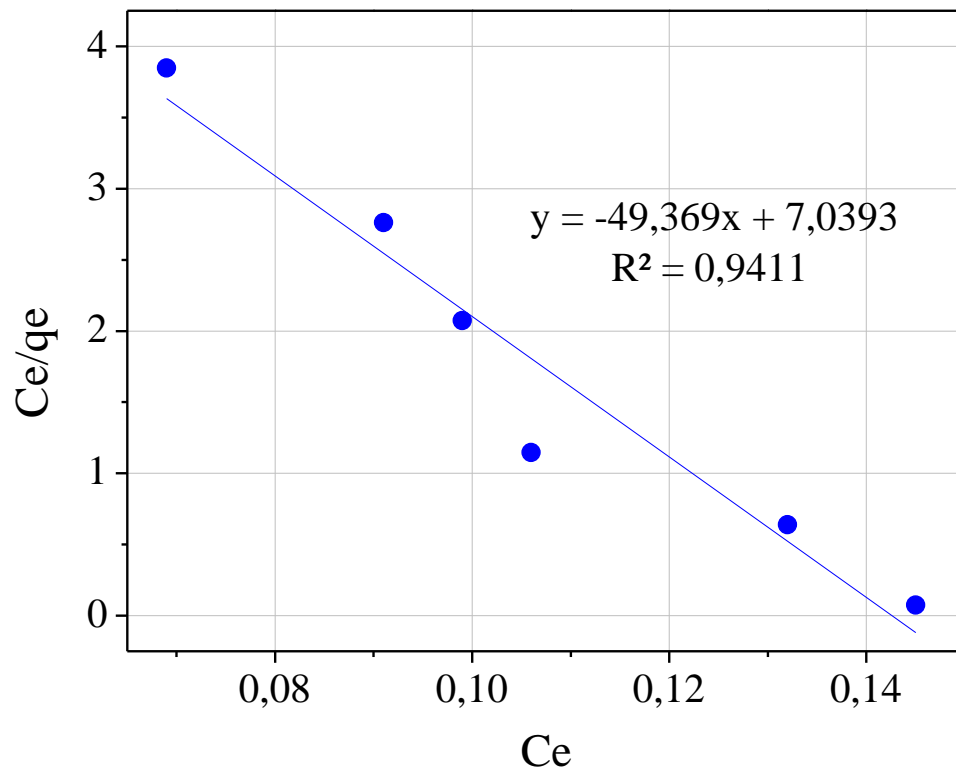
m: Masa de xerogel (g)

$$q_e = \frac{(0,338 - 0,145) \times 0,02}{0,0197}$$

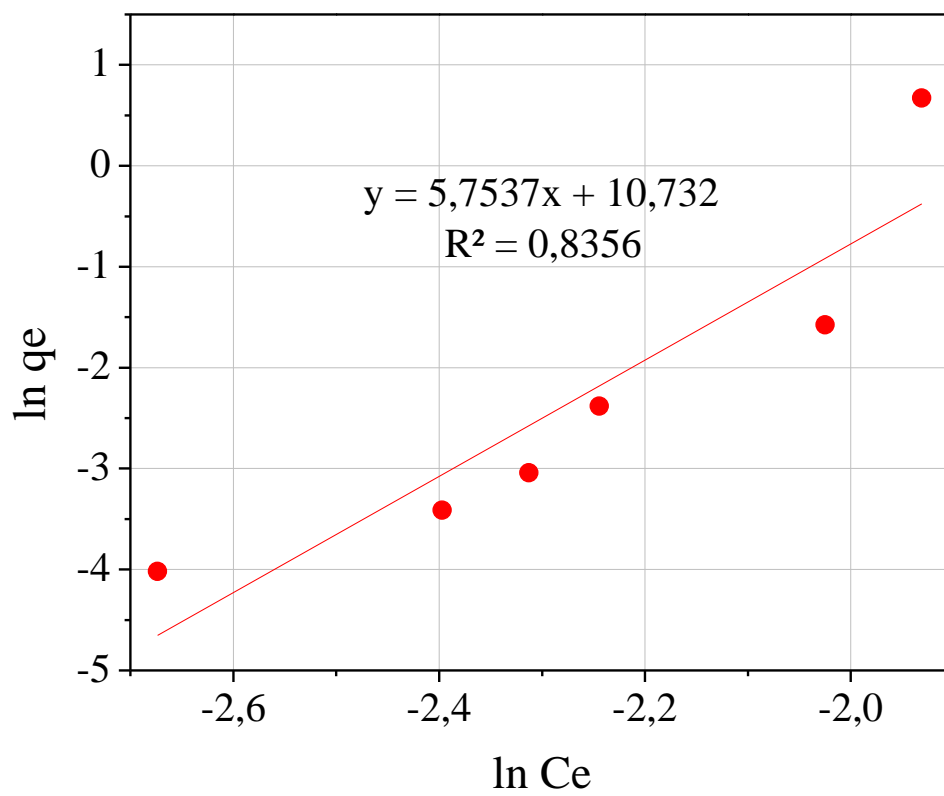
$$q_e = 1,9594 \left( \frac{\text{mg As}}{\text{g xerogel}} \right)$$

**Tabla FTX.2.** Comparación de los parámetros obtenidos según los modelos estudiados

Parámetro	Modelo de Freundlich	Modelo de Langmuir
n	0,2582	-
k <sub>F</sub>	464,29	-
q <sub>máx</sub>	-	-0,0203
k <sub>L</sub>	-	-7,0133
R <sup>2</sup>	0,9421	0,9411



**Figura FTX.1** Linealización de la isoterma de Langmuir con los hidrogeles de Inu-AAm



**Figura FTX.2** Linealización de la isoterma de Freundlich con los hidrogeles de Inu-AAm

Al analizar los resultados obtenidos de las isothermas, se observó que la isoterma de Langmuir no describe el modelo puesto que las constantes obtenidas en la linealización tienen un valor negativo. El modelo de Freundlich por otro lado tiene un  $r^2$  un poco bajo, por ello se analizó estadísticamente la posibilidad de la eliminación de algún punto. Para ello se utilizó el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI y se realizó un análisis de residuos atípicos para el modelo multiplicativo que describe la ecuación de Freundlich.

El modelo multiplicativo se describe con la ecuación

$$Y = a * X^b \quad \text{[FTX. 4]}$$

Con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados

Coefficiente de Correlación = 0,914114

R-cuadrada = 83,5604 porciento

La ecuación del modelo multiplicativo ajustado para describir la relación entre  $q_e$  y  $C_e$  es:

$$q_e = \exp(10,7323 + 5,75368 * \ln(C_e)) \quad \text{ó}$$

$$\ln(q_e) = 10,7323 + 5,75368 * \ln(C_e)$$

Con el análisis de residuos atípicos se enlistan todos los residuos estudentizados con un valor mayor a 2 en valor absoluto. Los residuos estudentizados miden cuántas desviaciones estándar se desvía cada valor observado de  $q_e$  con respecto al modelo ajustado. En este caso hay un residuo atípico con un valor mayor que 3.

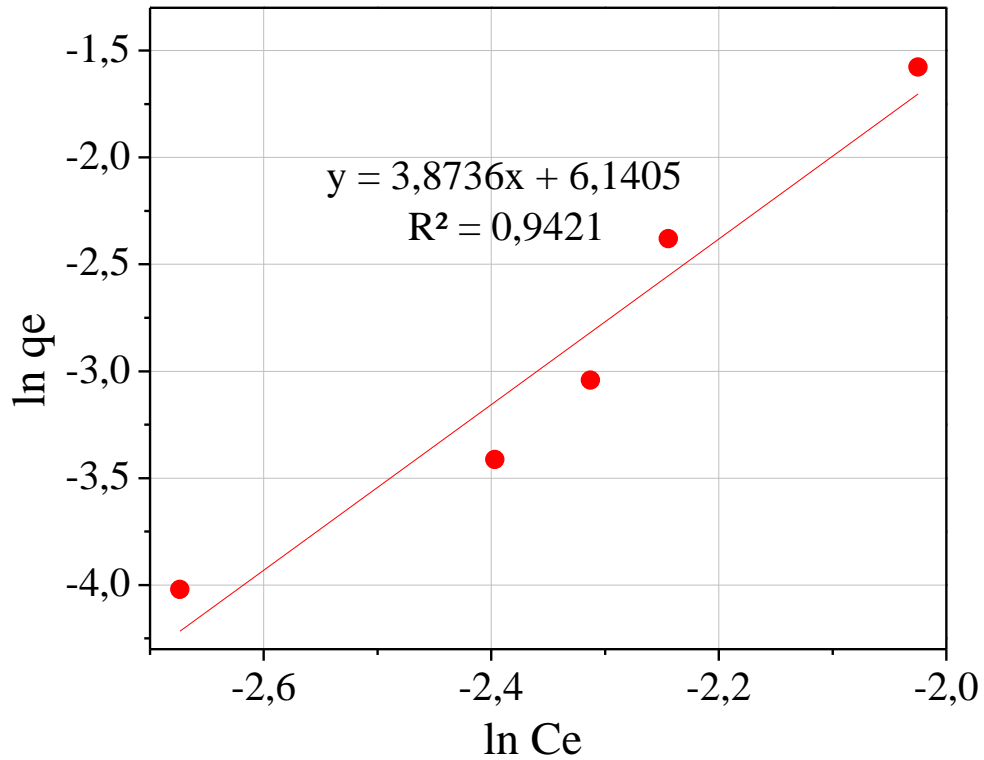
**Tabla FTX.3.** Tabla de residuos estudentizados para el modelo multiplicativo

			Predicciones		Residuos
Fila	X	Y	Y	Residuos	Studentizados
1	0,145	1,95939	0,685108	1,27428	5,55

De acuerdo al análisis estadístico el primer punto con una concentración de equilibrio de 0,145 mg/L debe ser eliminado, esto concuerda con la posibilidad de que este punto es en el cual experimentalmente se utilizó la menor cantidad de

hidrogel para la remoción de arsénico y debido a la pequeña cantidad de hidrogel utilizada y a las bajas concentraciones de medición pudo haberse generado un error en la correcta medición del valor de arsénico en la solución.

Al realizar la eliminación del punto mencionado se obtiene los siguientes datos de linealización de acuerdo con la isoterma de Freundlich



**Figura FTX.3** Linealización de la isoterma de Freundlich con los hidrogeles de Inu-AAm con la eliminación del primer punto

Al analizar los resultados obtenidos se justifica la eliminación de este punto puesto que el valor del coeficiente de correlación al cuadrado mejoró notablemente.



## FICHA TÉCNICA XI

### DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN

**Muestra:** Solución sintética de arsénico

**Objetivo:** Determinar la cinética de adsorción del arsénico en los hidrogeles de Inulina-Acrilamida

**Tabla FTXI.1** Datos utilizados para determinar la cinética de adsorción del arsénico con los hidrogeles de Inu-AAM obtenidos con una concentración inicial de 0,272 mg/L y pH 6

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Masa de xerogel (g)	Concentración final (mg/L)	Remoción As (%)	$q_t$ ( $\frac{\text{mg As}}{\text{g xerogel}}$ )	t/q <sub>t</sub>	Log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0,00	0,2	0	0,272	0	-	-	-0,7375
0,17	0,2	0,2000	0,152	44,12	0,1200	1,3889	-1,2007
0,33	0,2	0,2001	0,108	60,29	0,1639	2,0335	-1,7194
0,50	0,2	0,1999	0,117	56,99	0,1551	3,2242	-1,5540
1,00	0,2	0,2001	0,132	51,47	0,1399	7,1464	-1,3658
2,00	0,2	0,1998	0,105	61,40	0,1672	11,9641	-1,8004
4,00	0,2	0,2000	0,101	62,87	0,1710	23,3918	-1,9208
8,00	0,2	0,1999	0,104	61,76	0,1681	47,5952	-1,8263
24,00	0,2	0,2000	0,089	67,28	0,1830	131,1475	-

#### Ejemplo de Cálculo

Para la determinación del perfil cinético de adsorción se calculó el porcentaje de remoción de arsénico en el tiempo. Se utilizó la ecuación FTXI.1

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \quad [\text{FTXI. 1}]$$

Donde:

C<sub>o</sub>: es la concentración de arsénico inicial

C<sub>t</sub>: es la concentración de arsénico final a un tiempo t

$$\% \text{Remoción} = \frac{0,272 - 0,152}{0,272} \times 100$$

$$\% \text{Remoción} = 44,12$$

Para determinar la cinética de adsorción del proceso, se estudiaron los modelos de Lagergren y Ho según las ecuaciones FTXI.2 y FTXI.3, respectivamente.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{K_L}{2,303} t \quad [\text{FTXI. 2}]$$

Donde:

$q_e$ : es la cantidad de arsénico adsorbido en el equilibrio

$q_t$ : es la cantidad de arsénico adsorbido a un tiempo  $t$

$K_L$ : es la constante del modelo de Lagergren

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 K_H} + \frac{1}{q_e} t \quad [\text{FTXI. 3}]$$

Donde:

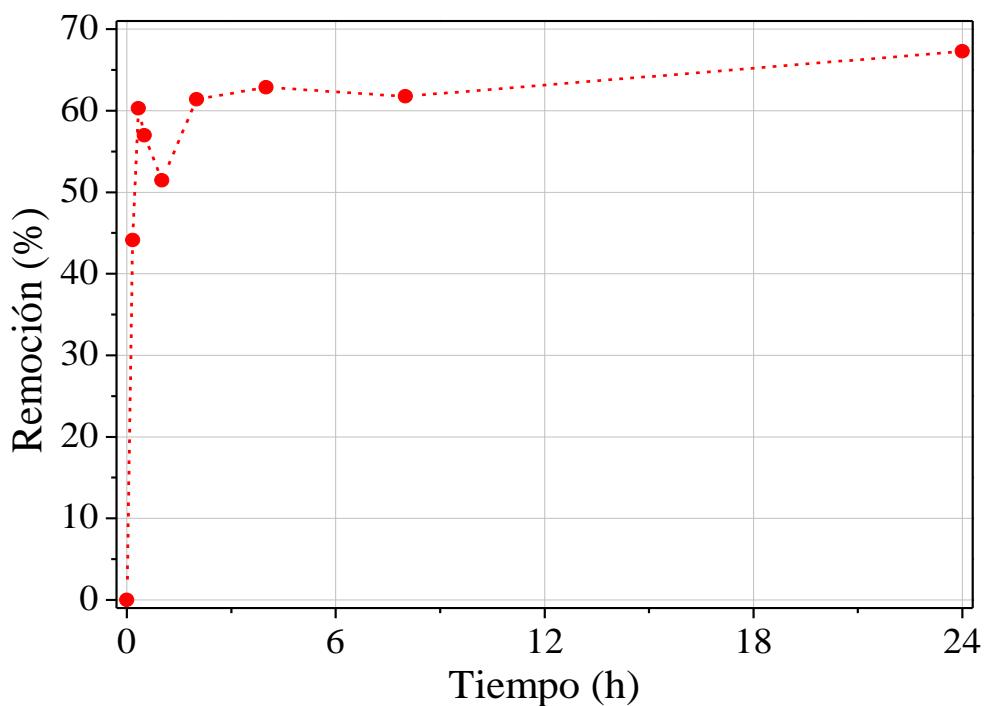
$q_e^2 k_H$ : es la velocidad de adsorción de arsénico inicial

$k_H$ : es la constante del modelo de Ho

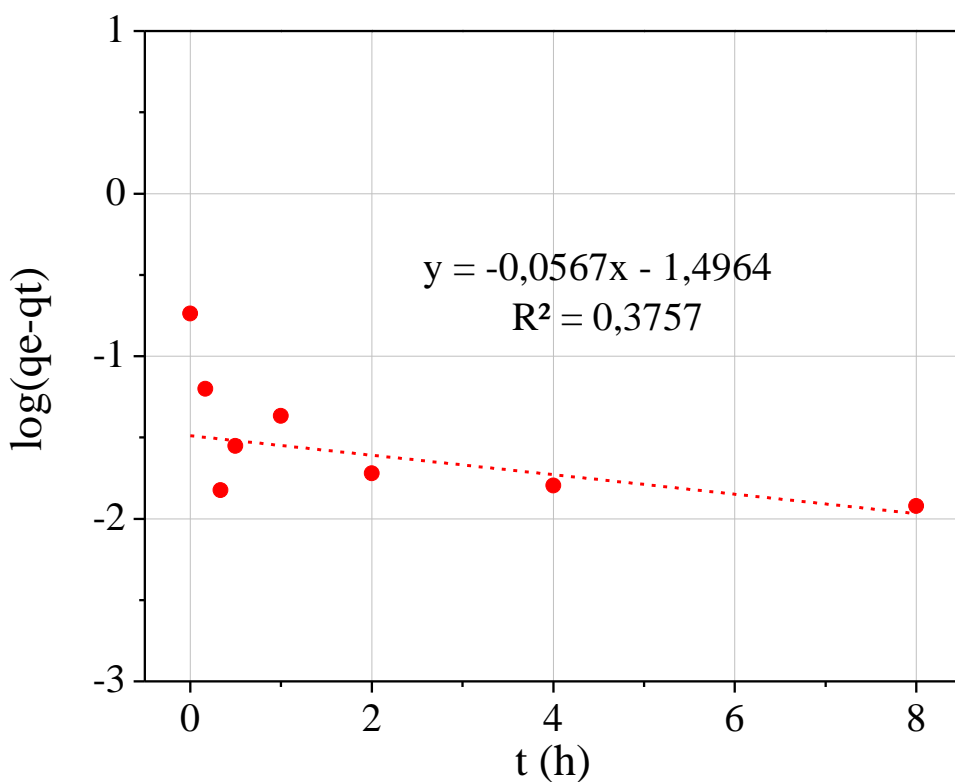
$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m}$$

$$q_e = \frac{(0,272 - 0,089) \times 0,02}{0,0200}$$

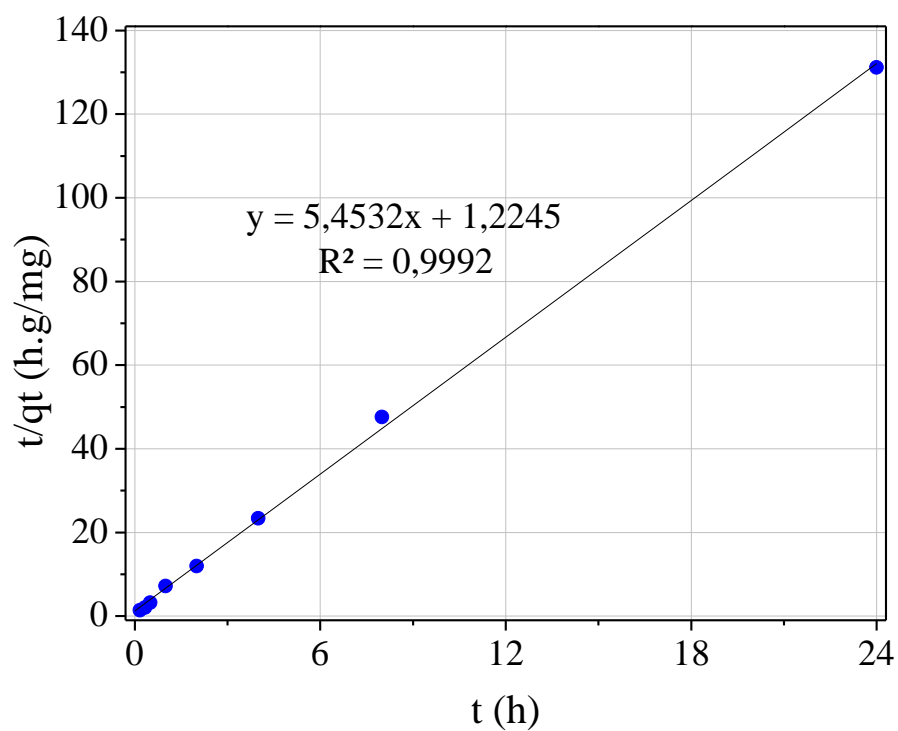
$$q_e = 0,183 \frac{\text{mg As}}{\text{g xerogel}}$$



**Figura FTXI.1** Remoción de arsénico en función del tiempo a una concentración inicial de arsénico de 0,338 mg/L, pH 6 y una masa de xerogel de 0,2 g



**Figura FTXI.2** Cinética de adsorción linealizada según el modelo de Lagergren



**Figura FTXI.3** Cinética de adsorción linealizada según el modelo de Ho

**Tabla FTXI.2.** Comparación de los parámetros obtenidos según los modelos estudiados

Parámetro	Lagergren	Ho	q <sub>e</sub> experimental
q <sub>e</sub> (mg/g)	0,0319	0,1834	0,183
K (h <sup>-1</sup> )	0,1306	24,2853	
R <sup>2</sup>	0,3757	0,9992	

## FICHA TÉCNICA XII

### REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS NATURALES

**Muestra:** Aguas naturales provenientes de la vertiente de Santo Domingo de los Duques ubicada en la Parroquia de Guayllabamba

**Objetivo:** Justificar porque no se determinó la capacidad de remover arsénico con los hidrogeles en aguas naturales

Se realizó el muestreo en la vertiente Santo Domingo de los Duques en la Parroquia de Guayllabamba los días 6 y 8 de septiembre de 2016. Se tomaron dos muestras compuestas, una muestra cada día. Para obtener la muestra compuesta se tomó un litro de agua a cada hora durante cuatro horas hasta completar un galón de muestra. Se siguió la norma INEN 1108 Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras.

**Tabla FTXII.1** Caracterización de las muestras tomadas de las aguas naturales

Muestra	pH	Conductividad (us/cm)	Concentración As (mg/L)
Muestra 1	7,51	1 039,5	<0,01
Muestra 2	7,65	1 116,2	<0,01

**Tabla FTXII.2** Datos experimentales de las muestras de agua natural tratadas con los hidrogeles a pH 6 durante 24 horas de remoción

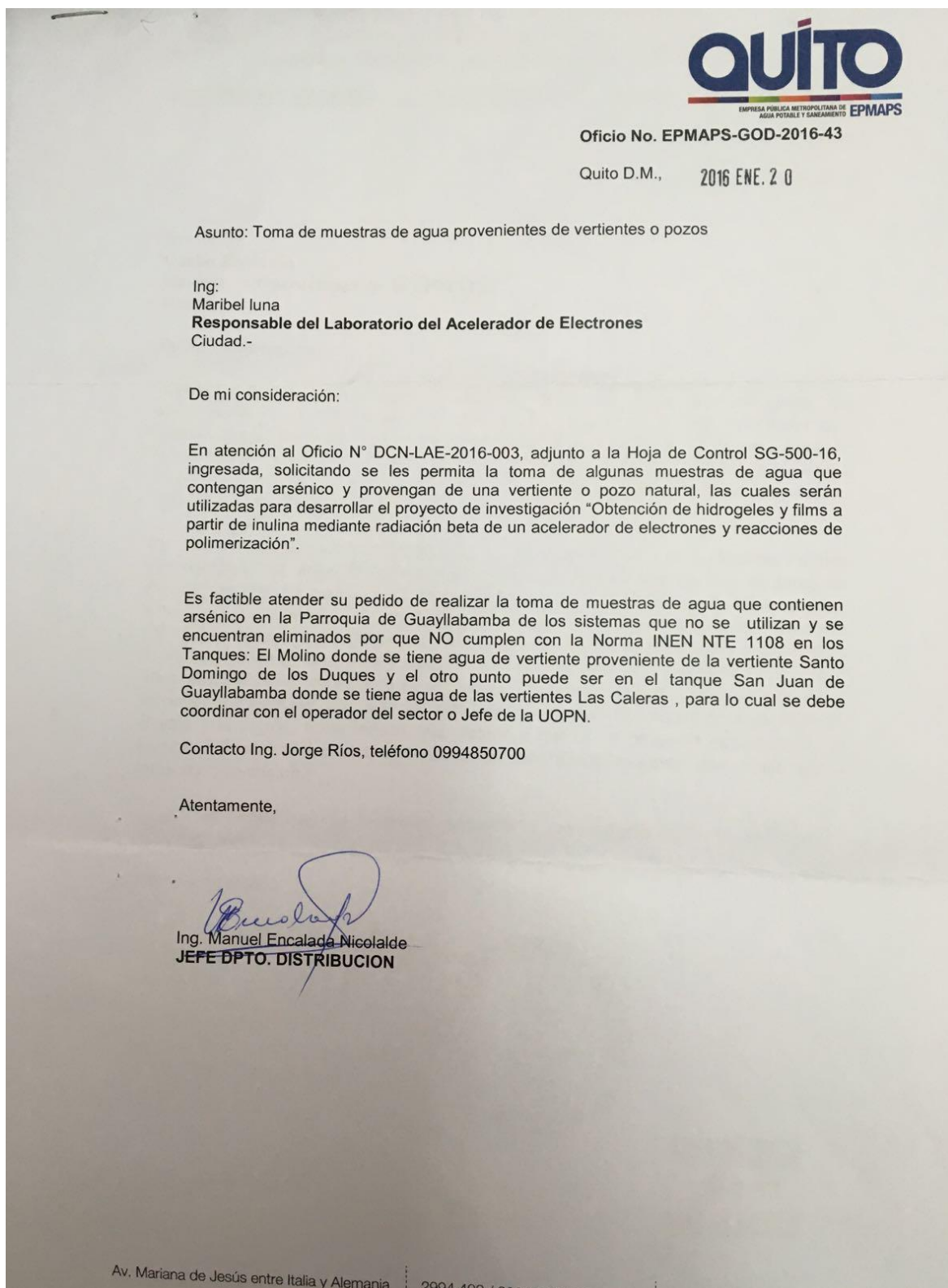
Muestra	Volumen de solución (L)	Masa de xerogel (g)	Concentración As (mg/L)
Remoción M1 0,2	0,2	0,2001	<0,01
Remoción M1 0,5	0,2	0,4998	<0,01
Remoción M2 0,2	0,2	0,2000	<0,01
Remoción M2 0,5	0,2	0,5001	<0,01

En el oficio emitido por la EPMAPS se indica que la concentración de arsénico en el agua de las vertientes no cumple con la norma. Sin embargo, de acuerdo a los resultados emitidos por el laboratorio, las muestras presentaron una

concentración de arsénico menor a 0,01 mg/L, lo que significa que las muestras están dentro de la norma por lo cual no es necesario un tratamiento para reducir el arsénico. Debido a que el límite de detección del equipo es de 0,01 mg/L no se pudo cuantificar la cantidad de arsénico removido por los hidrogeles.



**Figura FTXII.1** Imágenes del muestreo realizado en la vertiente Santo Domingo de los Duques ubicada en la Parroquia de Guayllabamba



**Figura FTXII.2** Imagen del oficio emitido por parte de la EPMAPS para realizar el muestreo de agua en las vertientes naturales