



UADY

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE YUCATÁN

SEMINARIO PERMANENTE DE INVESTIGACIÓN FIQ

MESA PANEL BIORREFINERIAS

“Aprovechamiento integral de lodos residuales en la generación de hidrocarburos con hierro y su aplicación en la generación de biogás.”

Dr. Juan Enrique Ruiz Espinoza

Abril, 2025

Facultad de Ingeniería Química



Generación de lodos residuales (LR)

- Los LR son producto del tratamiento de aguas residuales.
- El crecimiento excesivo de los microorganismos forma lodo biológico.
- Tienen alto contenido de materia orgánica, metales pesados, macro y microelementos.
- En Yucatán se estima que la producción anual supera las 118,649 toneladas de lodos (secos) al año de 26 plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Se estima una producción mundial anual de lodos residuales de 45 millones de toneladas secas.

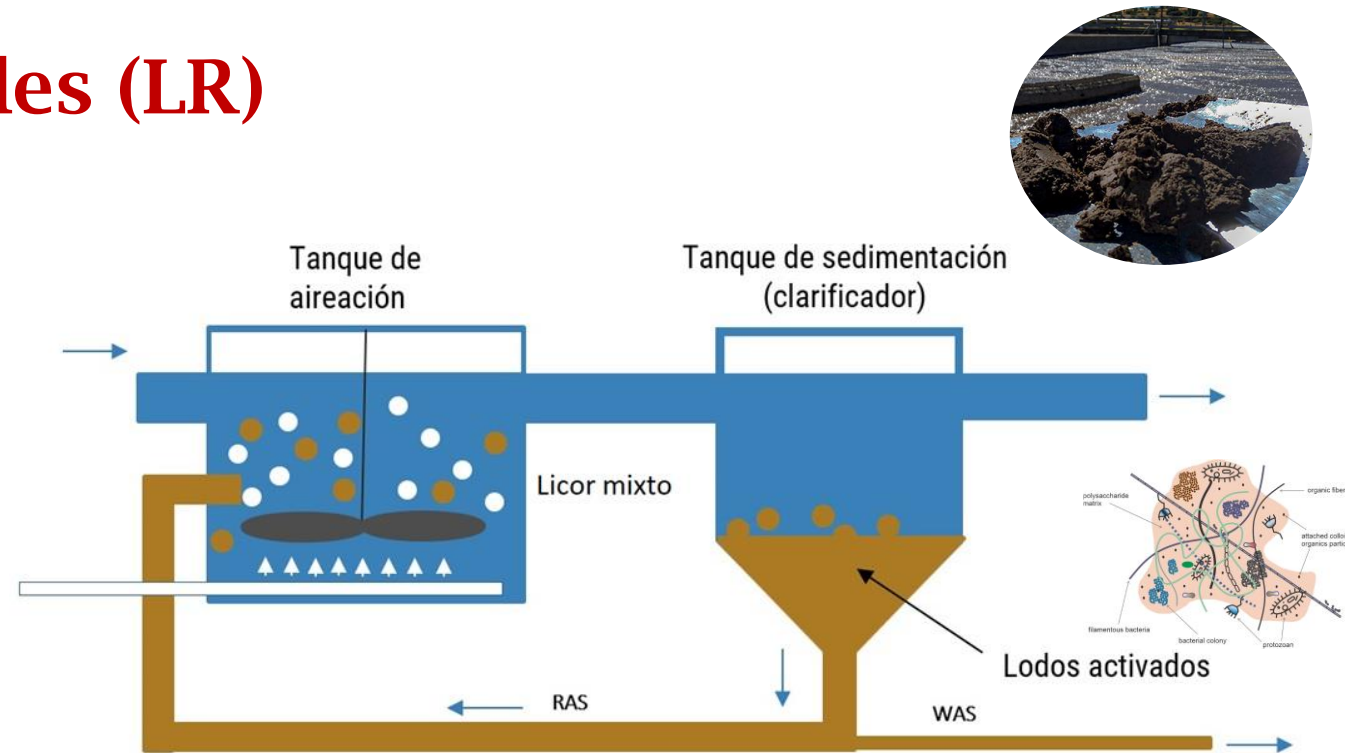
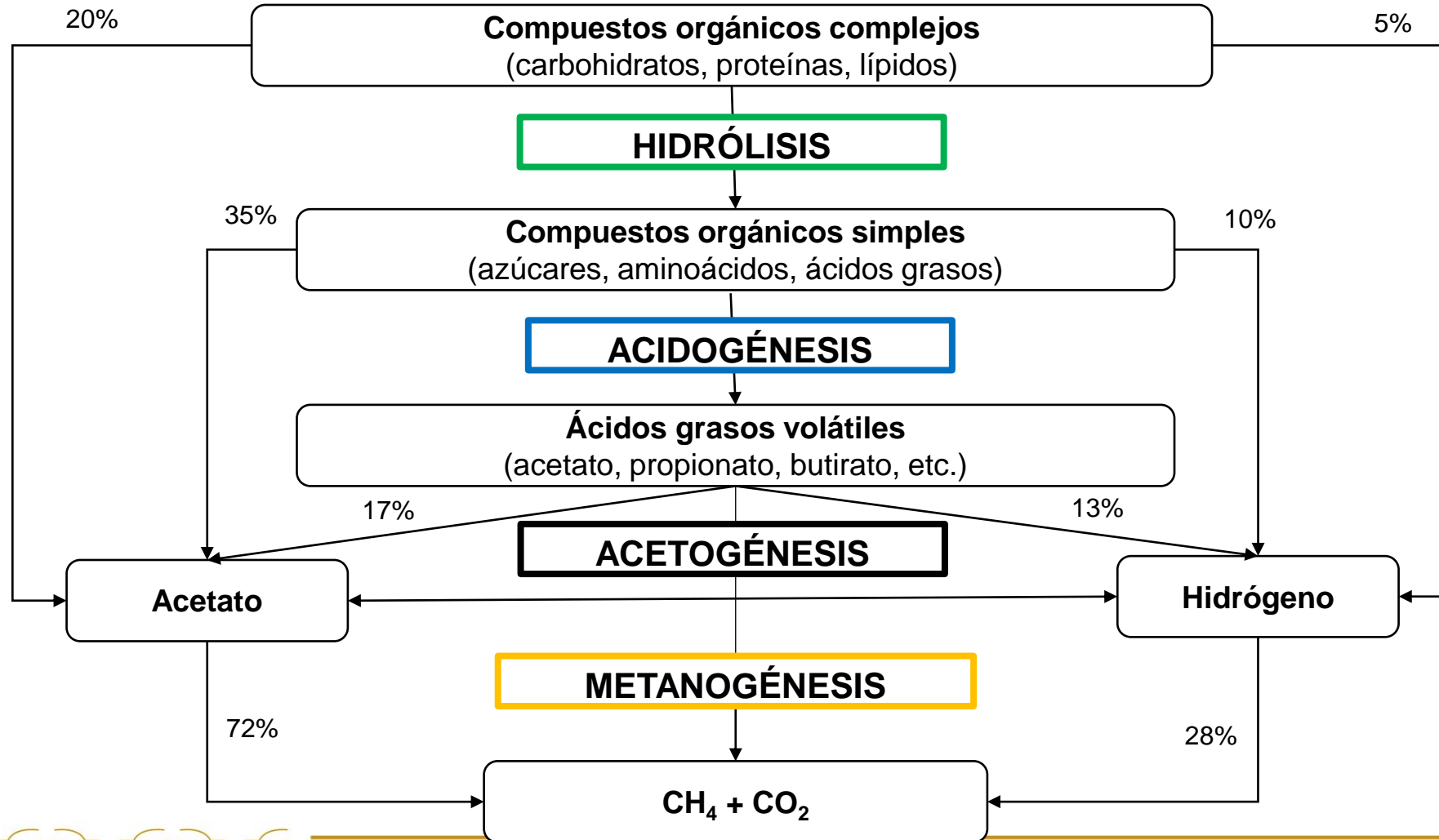


Figura 1. Proceso de lodos activados.

Fuente: <https://croipaia.com>



DIGESTIÓN ANAEROBIA



Limitaciones

- **Hidrólisis limitada**
- **Bajos rendimientos de biogás**
- **Altos TRH**
- **Inestabilidad a altas cargas**
- **Inhibición**

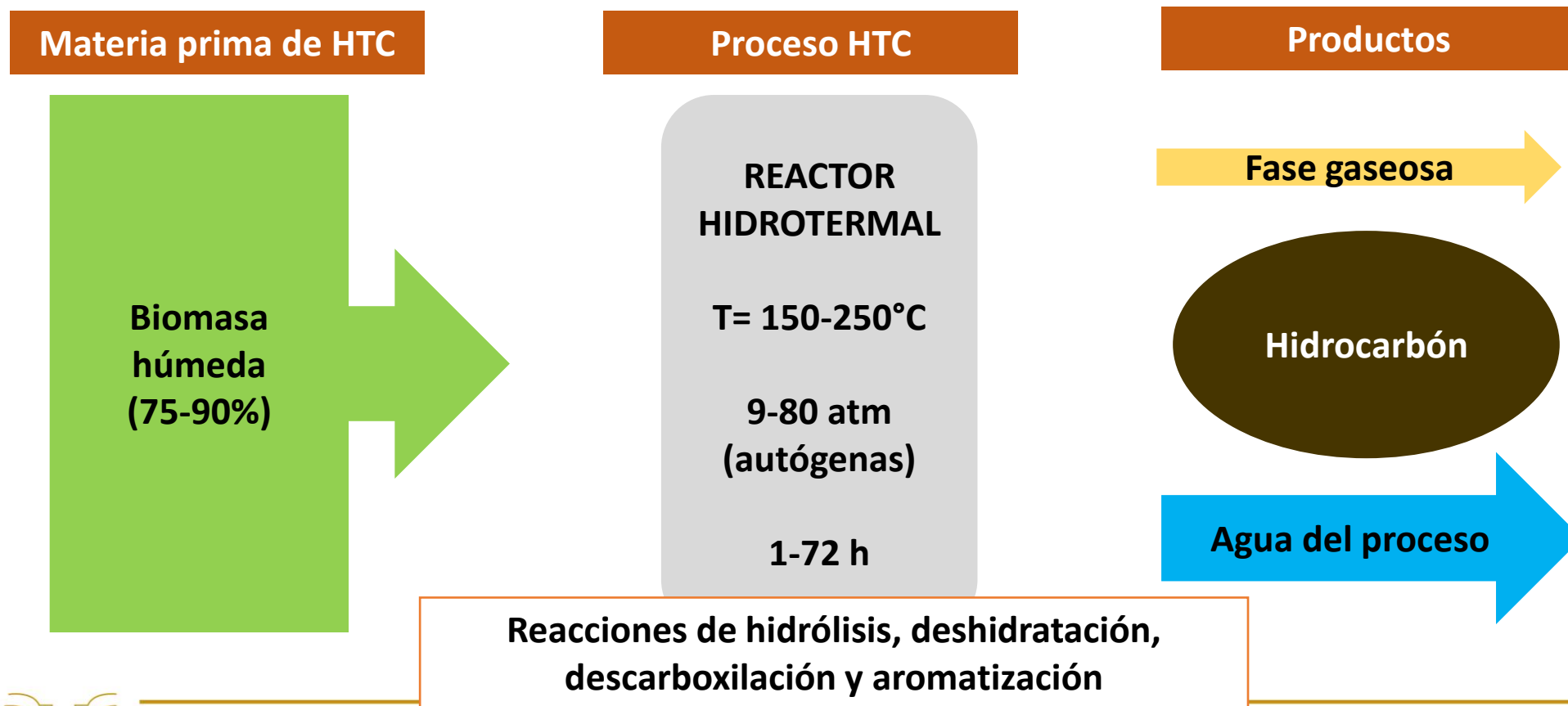
Fuente: AINIA (2015)

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia.

CARBONIZACIÓN HIDROTHERMAL



- Proceso que transforma biomasa en un producto principalmente carbonoso, denominado **hidrocarbón** (*hydrochar*).



HIDROCARBONES MODIFICADOS CON HIERRO

- El Fe^0 puede mejorar la producción de metano, mejorar la transferir electrones directamente en la DA. **Lizama *et al.*, 2019**
- El estudio del hidrocarbón modificado con hierro (HC-Fe) está avanzado en diversas áreas, incluyendo su síntesis, caracterización y remediación ambiental.
- Wang *et al.* (2020) encontraron que el HC-Fe puede reducir la concentración de metales pesados y patógenos potenciales en la DA.

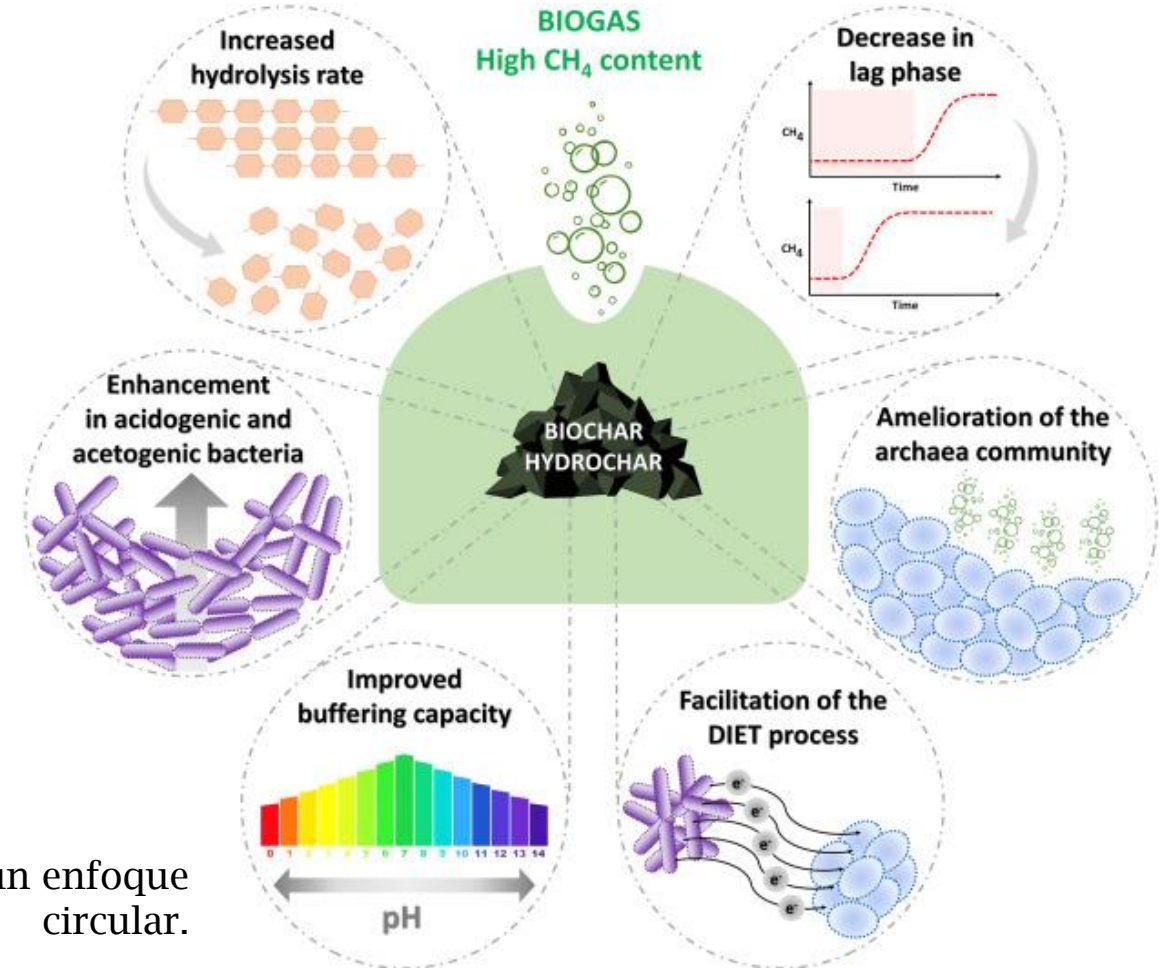


Figura 4. HC en la DA para un enfoque circular.



Síntesis de HC-Fe

Se llevó a cabo en un reactor de acero inoxidable con presión autogenerada y con capacidad de 200 mL. El LR crudo se sometió a un proceso de HTC a 150 °C durante 15 horas.

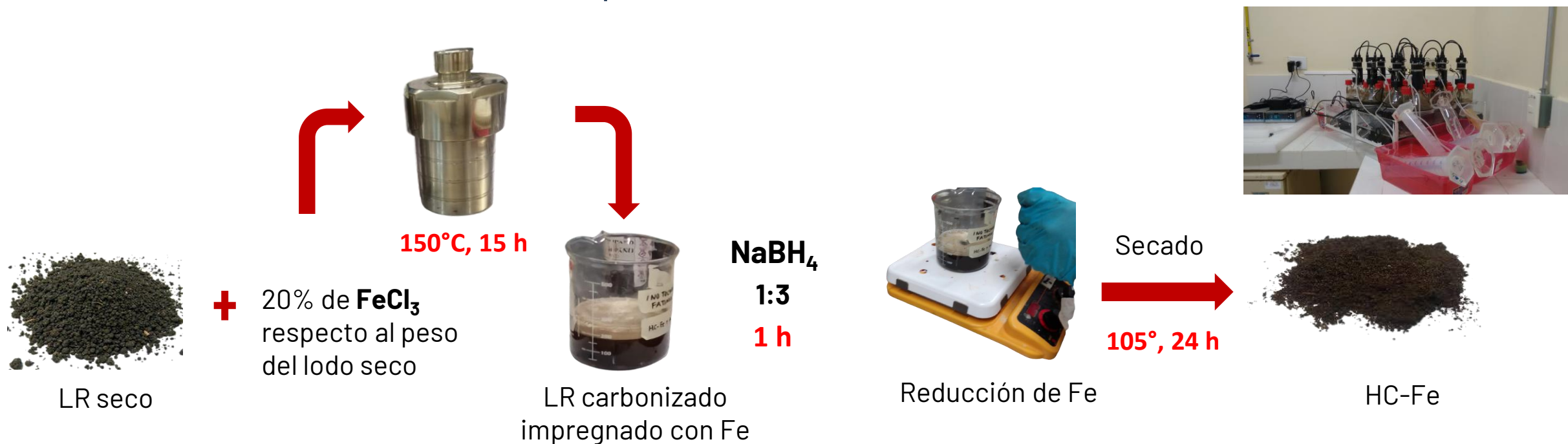


Figura 5. Procedimiento para la síntesis de HC-Fe.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN





La síntesis fue llevada a cabo con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y NaBH_4 , este experimento representa un enfoque para la fabricación de nanomateriales, siendo la reacción de reducción química la metodología más ampliamente adoptada para este propósito.



Figura 6. Propiedad combinacional: estructura núcleo-capa.





Análisis de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)

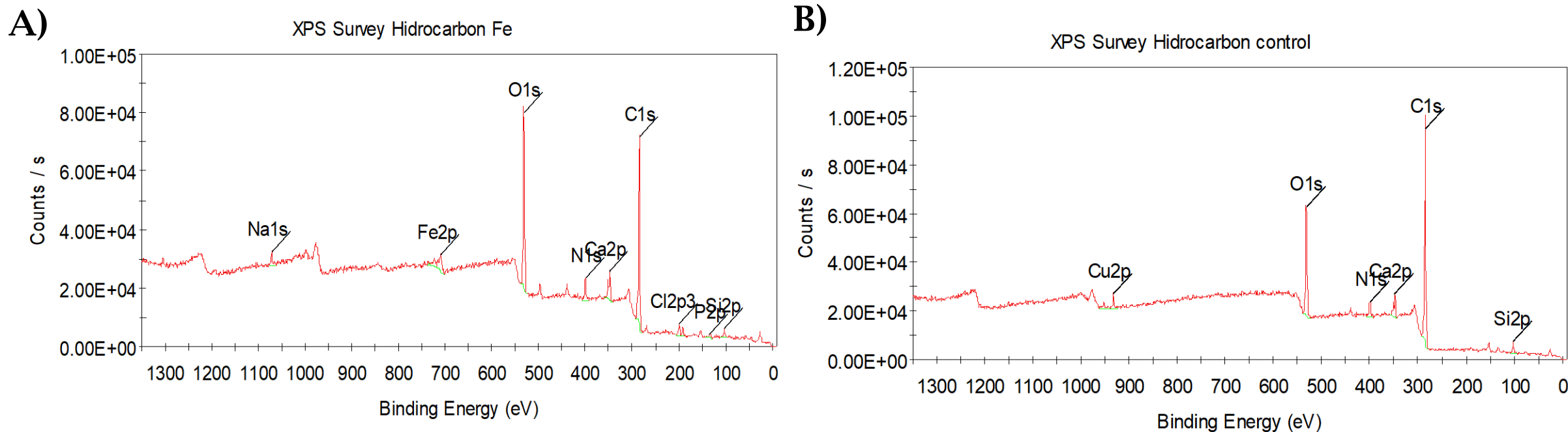


Figura 6. Barridos XPS A) HC-Fe. B) HC





- Se encontró que coexistían diversos tipos de hierro, Fe^0 , Fe^{+2} y Fe^{+3} .
- Los picos a 706.8 eV indicaron la presencia de ZVI.
- Los picos intensos corresponden a las energías de unión $2p_{3/2}$ de $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}(\text{OH})\text{O}$ y a las energías de unión $2p_{1/2}$ de los compuestos $\text{FeOOH}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ respectivamente

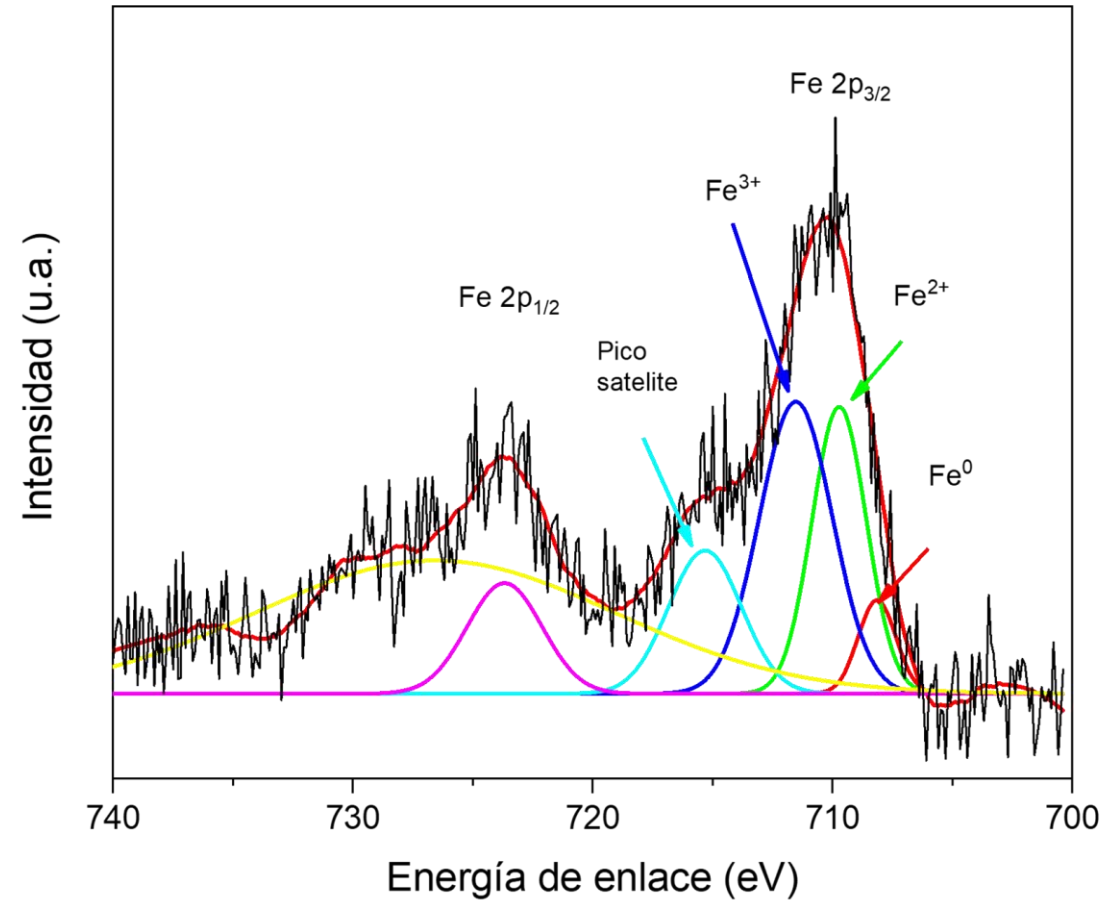


Figura 7. Deconvolución Fe 2p de HC-Fe.





Análisis MP-AES

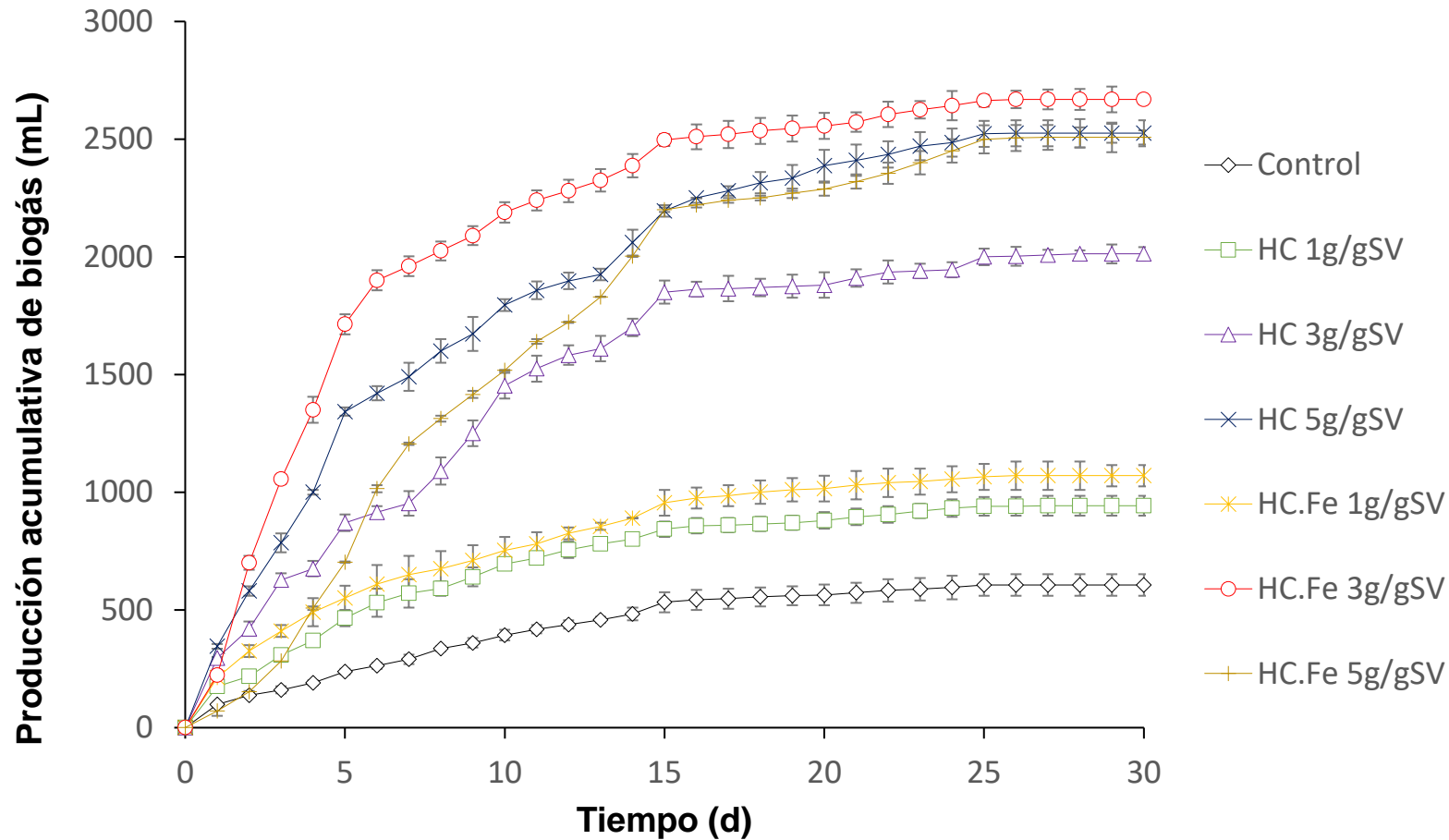
- Se reveló que en 50 g de HC, se impregnaron **1023.75 mg Fe**.
- Representa un **9.91%** de la base seca del lodo.
- Se obtuvo que el rendimiento sólido del HC y HC-Fe fueron de **79.56% y 83.80%**, respectivamente.

Tabla 1. Dosis de hidrocarburos modificados con hierro y hierro..

Dosis de HC.Fe (g/gSV)	Dosis de Fe (mg/gSV)
1	20.47
3	61.42
5	102.37



PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON LA ADICIÓN DE HC Y HC-FE



- La producción acumulada de biogás más alta para HC fue de 2525 mL y para la dosis HC-Fe 3 g/gSV fue de 2668.8 mL.
- Se obtuvo una producción de 2507.5 mL de biogás para la dosis 5g/gSV de HC-Fe, representando un valor **menor** a lo esperado.

Figura 8. Biogás acumulativo de la DA de LR con la adición de HC y HC-Fe.



RENDIMIENTO DEL METANO CON ADICIÓN DE HC Y HC-FE



Tabla 2. Producción de biogás y metano con la adición de HC y HC-Fe.

Dosis (g/gSV)	Biogás acumulativo (mL)	Contenido de metano (%)	Incremento de biogás (%)	Incremento de metano (%)	Rendimiento de biogás (mL biogás/gSV _{rem} *)	Rendimiento de metano (mL CH ₄ /gSV _{rem} *)
0	606 ± 46	55.87	-	-	112.30	63.28
1 HC	942.5 ± 42	57.14	55.53	2.26	164.10	93.76
1 HC-Fe	1070 ± 45	58.89	76.57	5.39	210.07	123.70
3 HC	2012.5 ± 28	63.50	232.10	13.65	243.46	167.06
3 HC-Fe	2668.5 ± 21	79.95	340.35	43.10	266.74	213.19
5 HC	2525 ± 55	77.65	316.67	38.98	176.80	137.29
5 HC-Fe	2507.5 ± 30	64.95	313.78	16.24	281.36	188.51

*gSV_{rem}: sólidos volátiles removidos.





- El valor promedio en el control fue de **31.88 $\mu\text{g INT}_{\text{red}} / \text{mg d.}$**
- El valor promedio de HC 5g/gSV fue de **85.42 $\mu\text{g INT}_{\text{red}} / \text{mg d.}$**
- El valor promedio de HC-Fe 5g/gSV fue de **54.63 $\mu\text{g INT}_{\text{red}} / \text{mg d.}$**

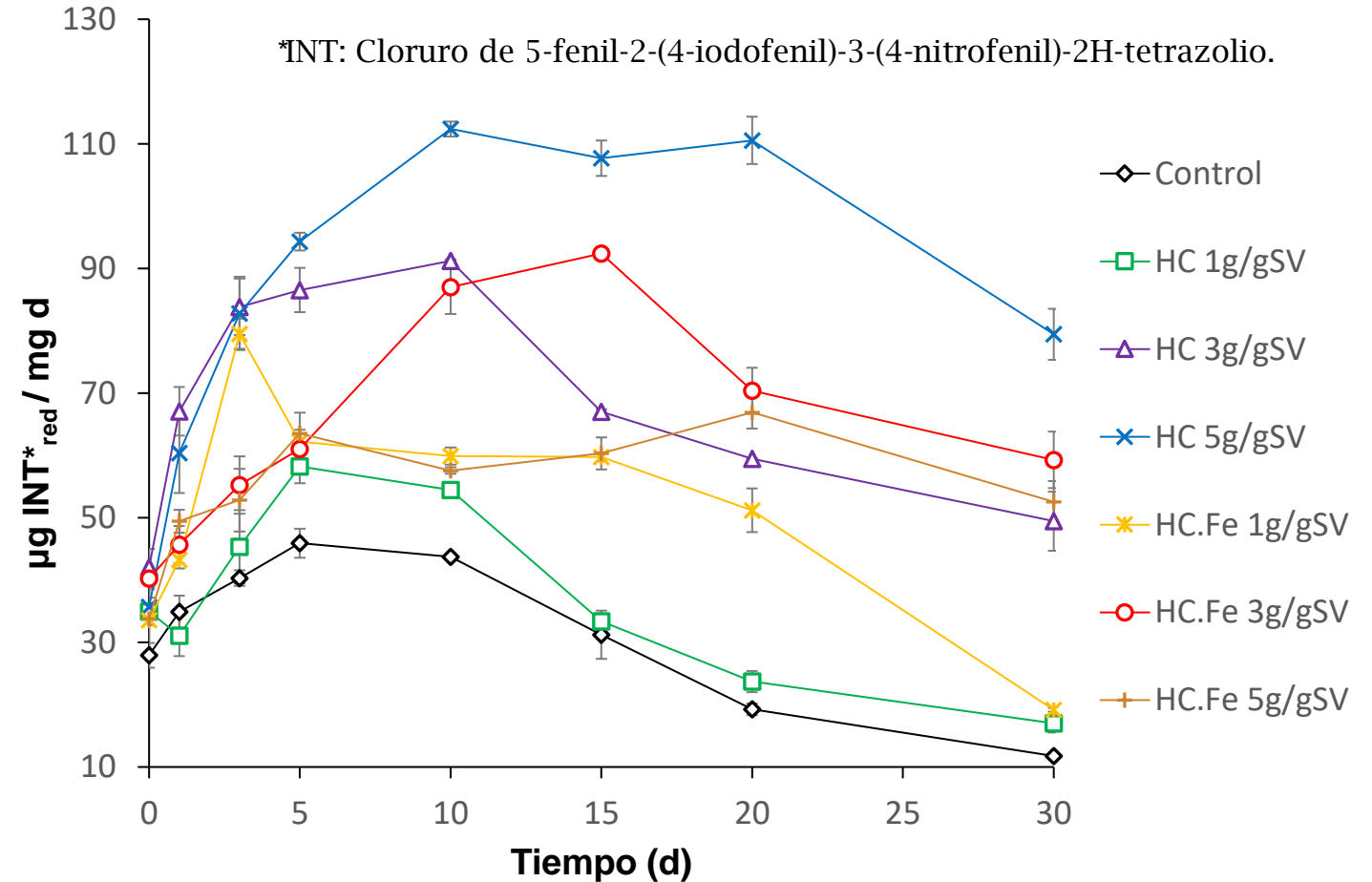
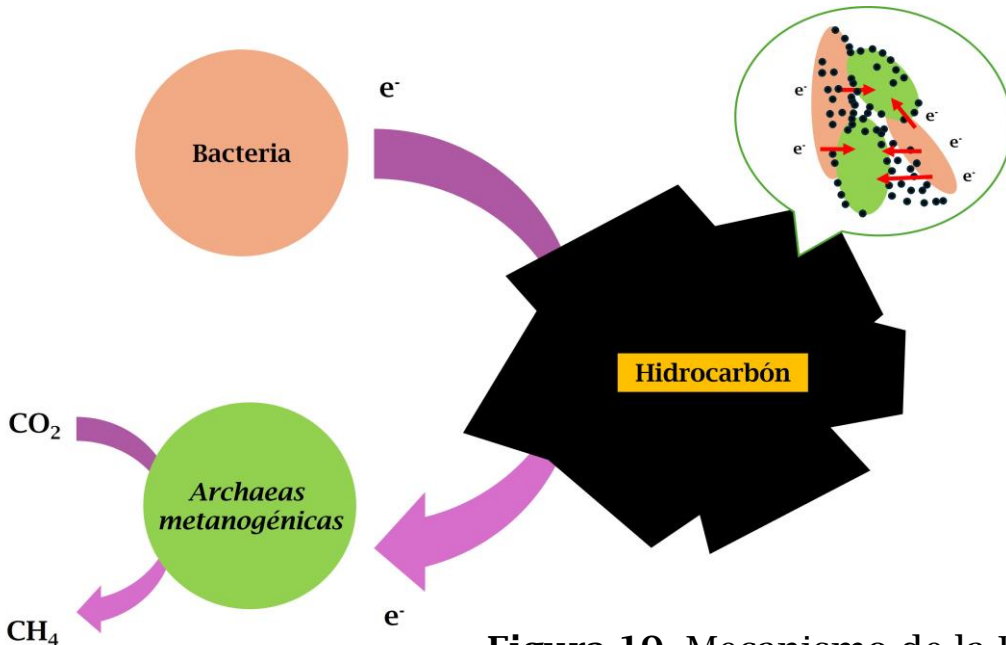
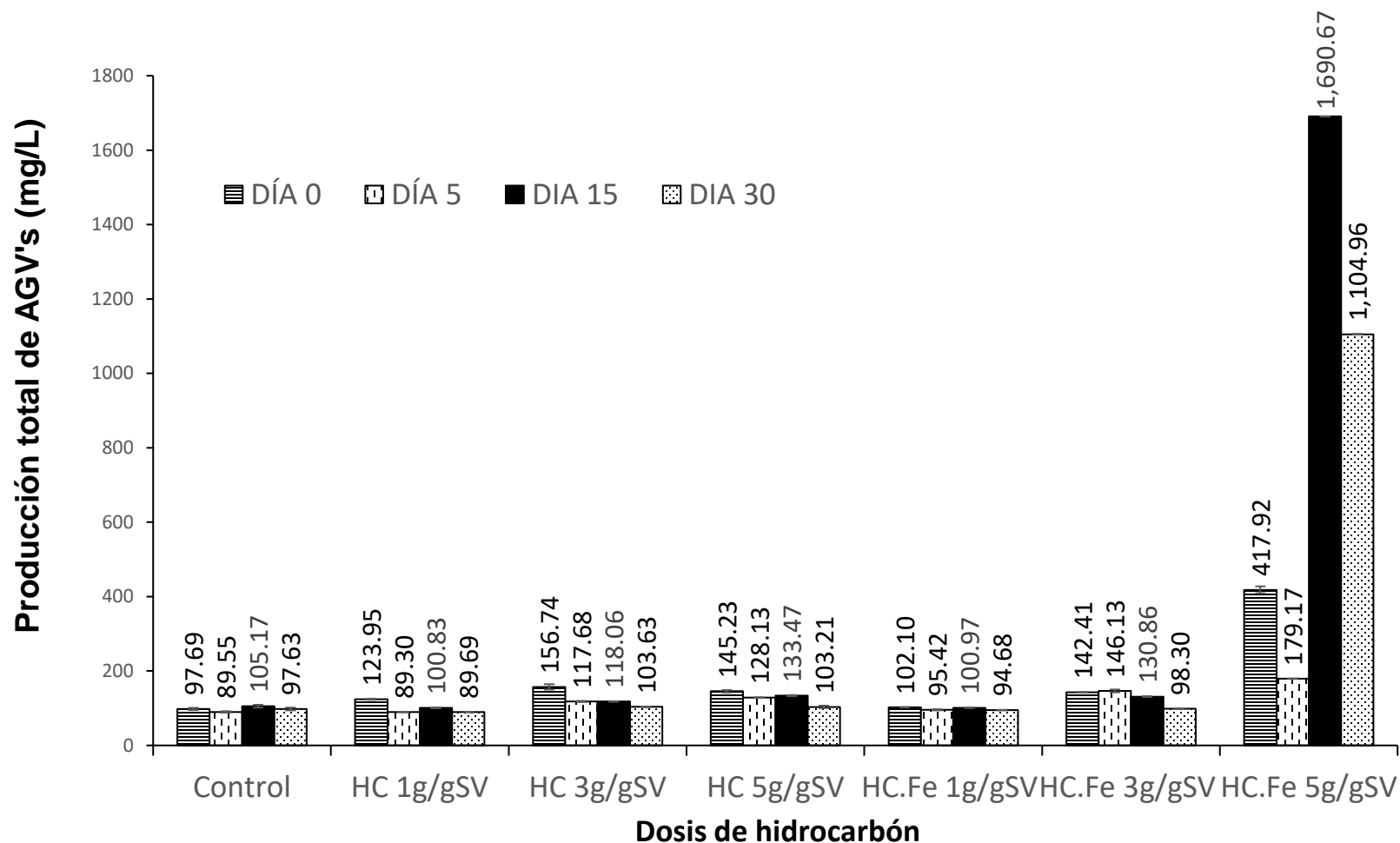


Figura 19. Cambios del ETS con la adición de HC y HC-Fe.

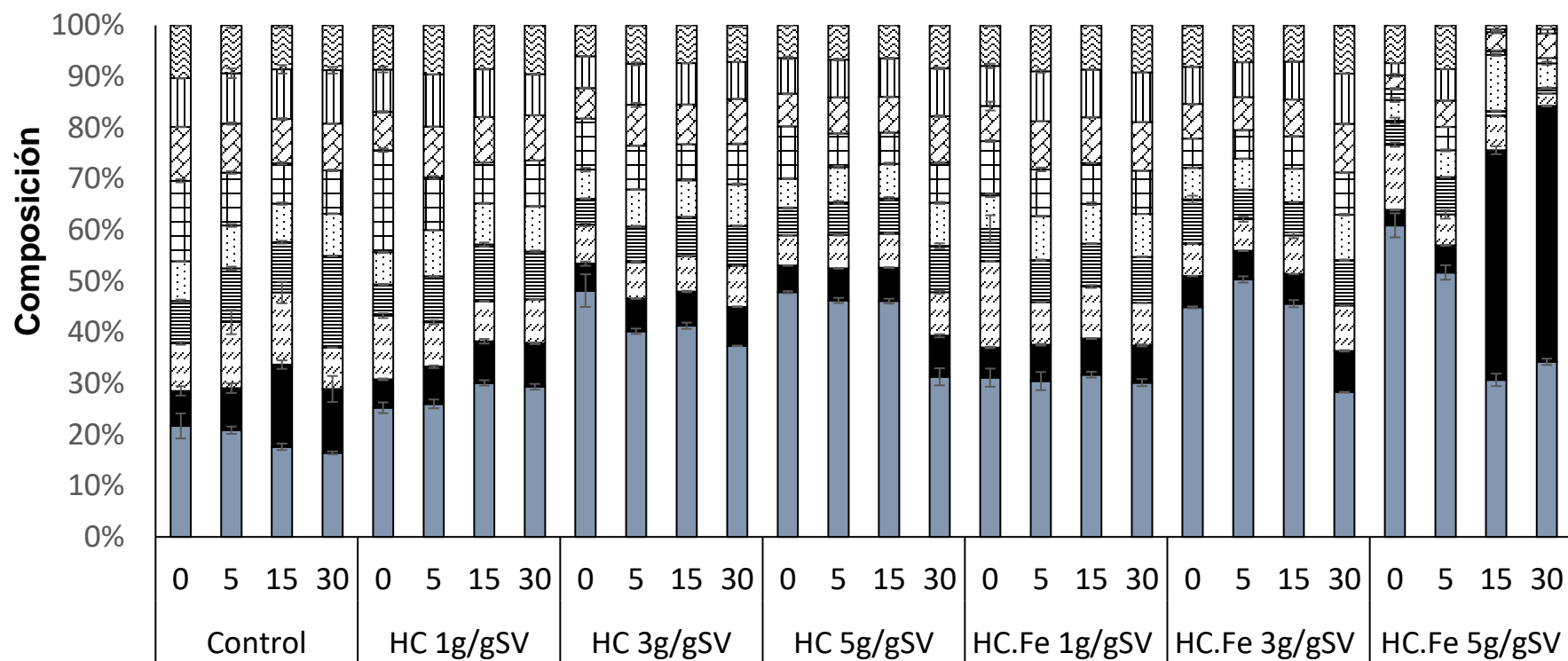
Figura 19. Mecanismo de la DIET con adición de HC y HC-Fe.

EFECTO DE HC Y HC-FE SOBRE LOS AGV



- A medida que disminuye la concentración de AGV, se va produciendo un incremento en el volumen de metano obtenido.
- La dosis HC-Fe 5 g/gSV tuvo una acumulación de **1,690.67 mg/L**, lo que coincide con el rango de pH más bajo (6.9 – 7.5)

Figura 22. Concentración total de AGVT con la adición de HC y HC-Fe.



- La concentración de ácido propiónico de HC-Fe 5g/gSV incrementó significativamente a partir del día 15 (**759.62 mg/L**) y para el día 30 logró disminuir (**552.63 mg/L**).
- Con esto, se puede explicar el contenido bajo de metano (**64.95%**).

Dosis de hidrocarbón

Figura 23. Composición de AGV's con la adición de HC y HC.Fe.



EFECTO DE HC Y HC-FE EN LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES



Tabla 3. Reducción de SV con la adición de HC y HC-Fe.

Dosis (g/gSV)	Reducción SV (%)
0	27.12
1 HC	19.94
1 HC.Fe	28.41
3 HC	59.82
3 HC.Fe	51.17
5 HC	44.63
5 HC.Fe	44.41

- Las dosis HC 3g/gSV y HC.Fe 3 g/gSV alcanzaron las reducciones máximas, siendo **2.20 y 1.88 veces mayor** que el control.
- El efecto de HC y HC-Fe fue estimulante para la DA.
- Méndez J. reporta una reducción máxima de 38% en la DA de lodos residuales en condiciones mesofílicas y sin algún tipo de aditivo.
- Juntupally et. al. obtuvieron una reducción del 71% en la DA de estiércol de ganado usando nanopartículas de Fe_3O_4 con dosis de 12.5 mg/L.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO ACADÉMICO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías

FACULTAD DE QUÍMICA
Campus de Ciencias de la Salud

"Estudio de hidrocarburos modificados con óxidos de hierro
en el mejoramiento de la digestión anaerobia de lodos
crudos"

Tesis presentada por

Fátima Jacqueline González Nahuat

En opción al título de

Licenciada en Química Aplicada

Director de tesis

Dr. Juan Enrique Ruíz Espinoza
Dr. Cristian Carrera Figueiras



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

