

# **Eco-LCA Methodology for Sustainability Assessment of Bio-WWTs Focused on Energy Recovery**

**Metodología Eco-ACV para Evaluación de Sostenibilidad de  
Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales (Bio-STARs)  
enfocados en recobro de energía**

**ALEXANDER MENESES JÁCOME**

**Ph.D. en Ingeniería de Sistemas Energéticos**

**M.Sc. Química del Ambiente y la Energía**



# 1. NEXUS “AGUA – ENERGÍA”: SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STARs)

## 1.1 Potencial energético de las aguas residuales: una perspectiva estratégica

Potencial de la energía química presente en los efluentes domésticos en Colombia



13.5 – 14.7 kJ / gDQO

1.43 TWh / año



# 1. NEXUS “AGUA – ENERGÍA”: SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STARs)

## 1.1 Potencial energético de las aguas residuales: una perspectiva estratégica

- Países Bajos (*Wilsenach et al. Water Sci. Technol. 2003;48*) → Recobro de recursos
- Declaración universal del Agua y la Energía. 2009 – (*IWA*) → Principio de sostenibilidad
- Nueva Zelanda (*Heubeck et al., Wat. Sci. Technol. 2011, 63*) → Inventario Efluentes Agro-industria
- Malasia (*Lim & Lam. Renew. & Sust. Energy Rev. 2014; 29*) → MDL (Palma de aceite)

# 1. NEXUS “AGUA – ENERGÍA”: SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STARs)

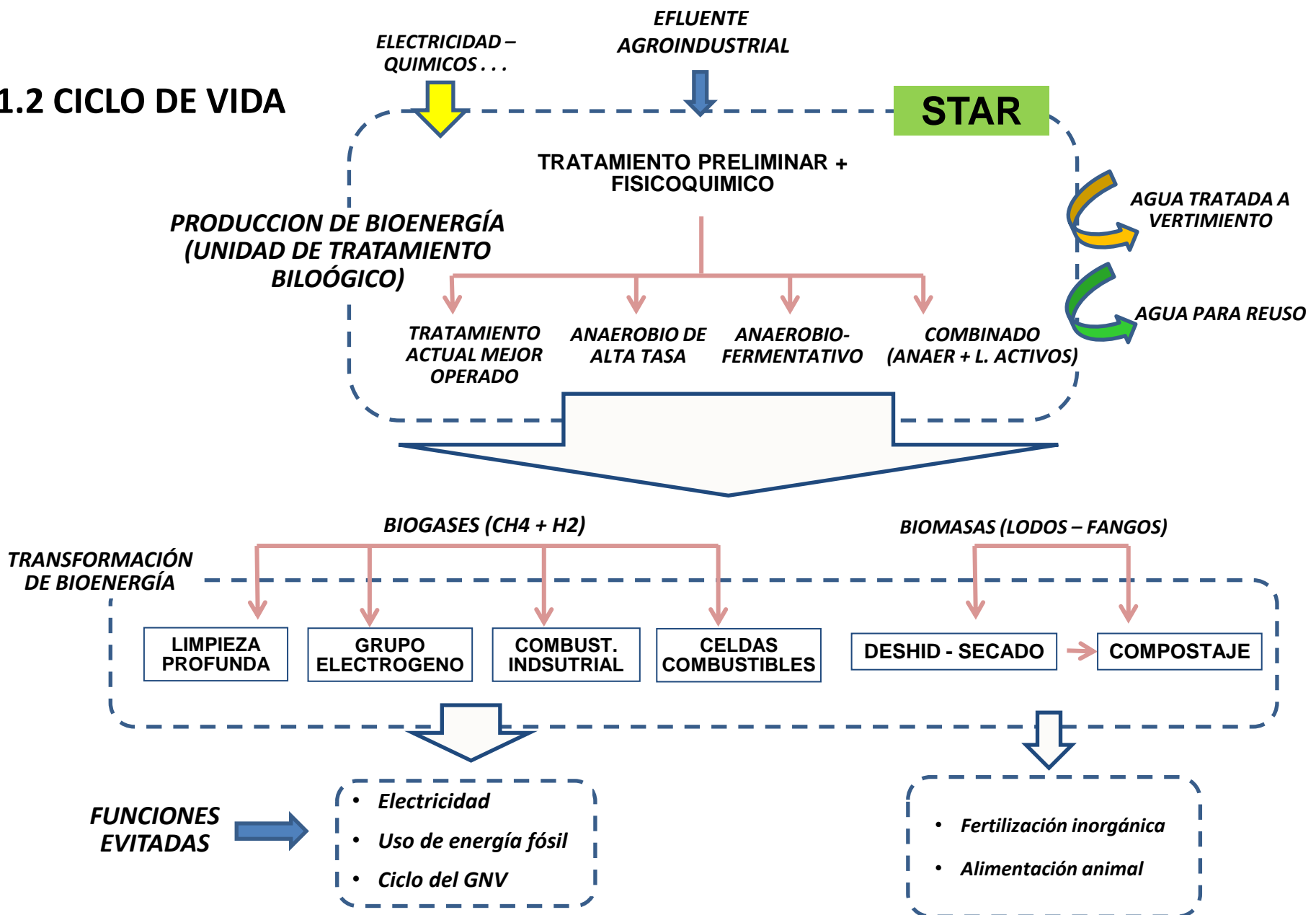
## 1.1 Potencial energético de las aguas residuales: una perspectiva estratégica

- Dispersión de las fuentes
- Baja calidad y cobertura del tratamiento proveído reduce el potencial energético aprovechable
- Limitaciones del **biogás** y los **lodos residuales** como “portadores” de energía
- Parámetros de vertimiento **NO ARMONIZADOS CON EL METABOLISMO PRODUCTIVO** ↔ Mayor demanda de energía y esfuerzo tecnológico



# 1. NEXUS "AGUA – ENERGÍA": SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (STARs)

## 1.2 CICLO DE VIDA



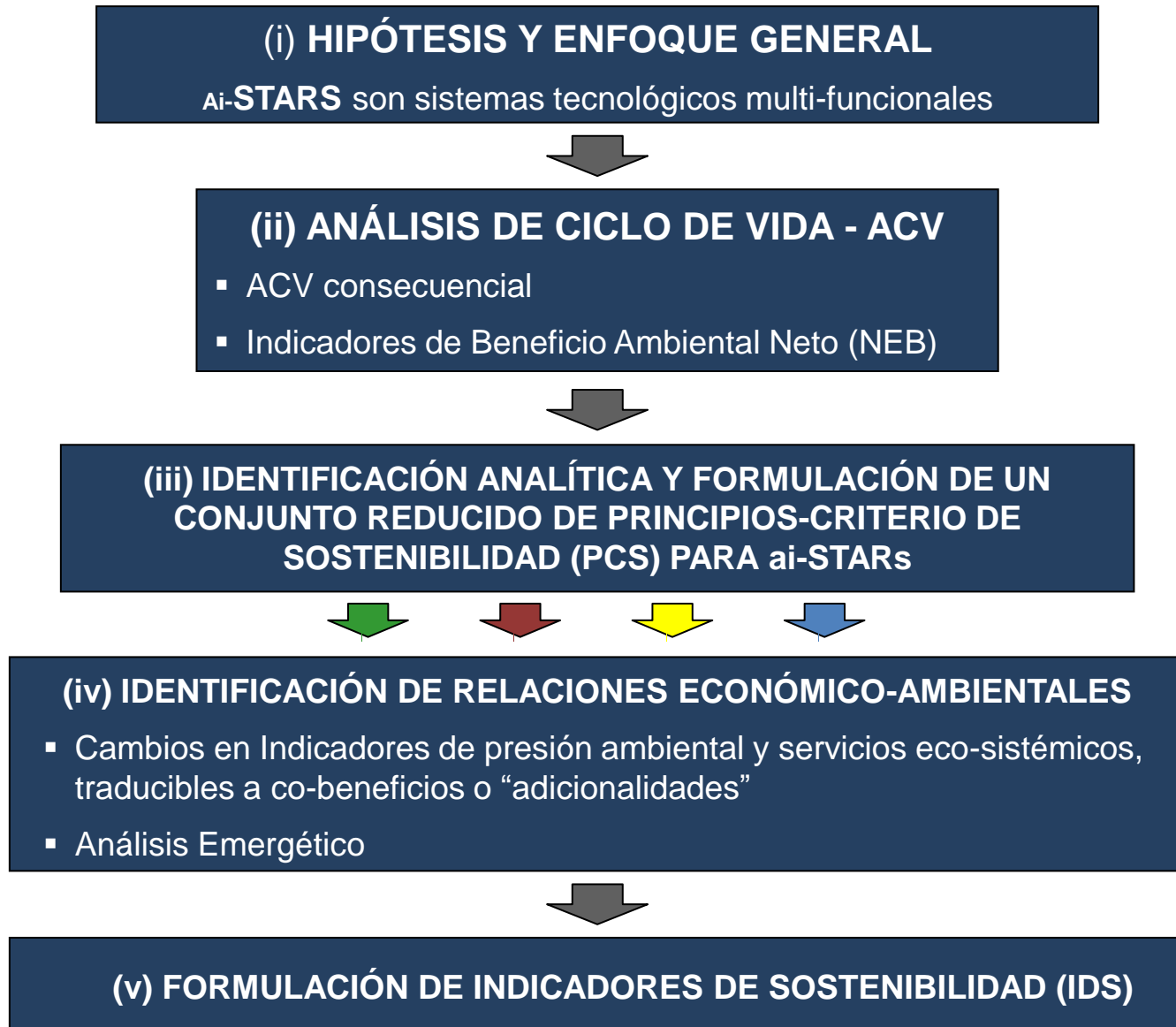
## 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

- *Como fomentar un mayor nivel de explotación de la bioenergía derivada de la operación de STARs biológicos (Bio-STARs) ?*
- *Cuál(es) ruta(s) o modo(s) de valorización de la bioenergía derivada de sistemas de tratamiento de efluentes agroindustriales, son ambientalmente más compatibles y pueden contribuir de una manera más sostenible a los objetivos de desarrollo sectorial, local o regional?*
- *Como realizar una valoración aceptable o razonable de las condiciones de sostenibilidad de este nexo agua-energía?*

### 3. EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE STARs: ANTECEDENTES

- 1997 **INTRODUCCIÓN DEL ACV AL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES – STAR** - *Roeleveld et al. Wat. Sci. Technol.* 35(10), 221-228
- 2010 **ACOPLAMIENTO DE ACV CON MÉTODOS DE ECONOMÍA-ECOLÓGICA (ECO-LCA)**  
*Zhang, Y. et al. Environmental Science & Technology*, 44(7), 2232-2242.
- 2011 **REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL ACV DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA**  
*Cherubini & Stromman. Bioresource Technology*, 102(2), 437-451.
- 2012 **INTRODUCCIÓN DEL INDICADOR NEB - NET ENVIRONMENTAL BENEFIT**  
*Godin et al. Wat. Sci. Technol.* 65(9), 1624-1631.
- 2012 **INTRODUCCIÓN DE METODOLOGIAS ANALITICAS DE FORMULACION DE INDICADORES EN SISTEMAS DE PRODUCCION DE ENERGÍA (BIO)** - *Grunwald & Rosch. Energy, Sustainability and Society*, 1(1), 3.
- 2013 **REVISIÓN DEL ESTADO DE LA EVOLUCIÓN METODOLÓGICA DEL ACV EN APLICACIONES A DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE STAR** - *Corominas et al. Water Research*, 47(15), 5480-5492.
- 2014 **1era APLICACIÓN DE ACV + ANALISIS EMERGÉTICO EN LA EVALUACIÓN DE UN STAR “AGRO”**  
*Zhang, X. et al. Resources Conservation and Recycling*, 92, 95-107.

## 4. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA





# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA

**TABLA 1. “FORMULACIÓN ANALÍTICA DE PRINCIPIOS-CRITERIO DE SOSTENIBILIDAD (PCS)”**

| PCS  | Análisis de impacto ambiental por ACV                  |                                 |                      |                                       |                      | Ruta para evaluar la dimensión “Eco- económica”                                   |
|--|--|---------------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|---|
|  | Indicadores de “mid-point”                             |                                 |                      | Indicadores del enfoque consecuencial |                      |   |
|  | Descripción  | Indicador (Unit)                | Método               | NEB <sub>i</sub>                      | IAM <sub>i</sub>     |   |
| Uso del medio ambiente como sumidero                       | Contaminación orgánica y por nutrientes en el efluente | EP<br>(kg PO <sub>4-eq</sub> )  | CML2001              | NEB <sub>EP</sub>                     | IAM <sub>EP</sub>    | Servicios ecosistémicos por dilución de la descarga en el cuerpo de agua receptor |
|  | Emisiones atmosféricas locales                         | AP<br>(kg SO <sub>2-eq</sub> )  | CML2001              | NEB <sub>AP</sub>                     | IAM <sub>AP</sub>    | Servicios ecosistémicos por dilución de emisiones en el aire                      |
|  |  | Respl<br>(kg PM <sub>eq</sub> ) | Impact 2002+         | NEB <sub>Respl</sub>                  | IAM <sub>Respl</sub> | Potencial afectación a la salud   |
|  | Emisiones de gases efecto invernadero - GEI            | GWP<br>(kg CO <sub>2-eq</sub> ) | IPCC <sub>100a</sub> | NEB <sub>GWP</sub>                    | IAM <sub>GWP</sub>   | Cambios en la capacidad de captura de emisiones de CO <sub>2-eq</sub> .           |
| Uso sostenible de los recursos renovables y no renovables. | Uso de energías renovables y uso de energía fósil      | NRE<br>(MJ <sub>PE</sub> )      | Impact 2002+         | NEB <sub>NRE</sub>                    | IAM <sub>NRE</sub>   | Desplazamiento de fuentes convencionales de energía, renovables y no renovables   |
|  |  |                                 |                      |                                       |                      | Cambios en el consumo de químicos y otros recursos de origen mineral              |

# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA

## (i) HIPÓTESIS Y ENFOQUE GENERAL

Ai-STARs son sistemas tecnológicos multi-funcionales



## (ii) ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA - ACV

- ACV consecucional
- Indicadores de Beneficio Ambiental Neto (NEB)

### Indicadores tipo NEB: adaptación para obtener el término ambiental de los IDS

- a. Evaluación para al menos **dos escenarios o posibles ciclos de vida** del STAR con diferentes rutas de recobro y uso de la energía.
- b. **Condiciones de expansión de fronteras en el enfoque ACV consecucional:**
  - Operación del ai-STAR o Etapa de producción de bioenergía.
  - Producción de bioenergía + Etapa de utilización de la energía.
  - Producción de bioenergía + Utilización + Desplazamiento de Funciones Energéticas.

# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA

## (ii) ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA - ACV

- ACV consecucional
- Indicadores de Beneficio Ambiental Neto (NEB)

**Indicadores tipo NEB: adaptación para obtener el término ambiental de los IDS**

**c. Formulación de indicadores tipo NEB (Beneficio Ambiental Neto):**

$$NEB_{i,n} = \text{Impacto Ambiental Potencial Sin STAR (IIAPS)}_i - \text{Impacto Ambiental Potencial con STAR (IIAPC)} \quad (1)$$

*Godin et al. 2012. Wat. Sci. Technol. 65(9), 1624-1631)*

**d. Normalización del NEB:**

$$NNEB_{i,n} = \frac{NEB_{i,n}}{\max (IIAPS_i, IIAPC_{i,1} \dots IIAPC_{i,n}, NEB_{i,1} \dots NEB_{i,n})} \quad (2)$$

**e. Indicadores de Influencia Ambiental Media (IAM<sub>i</sub>):**

$$IAM_i = \frac{NNEB_{i,2} - NNEB_{i,1}}{2} \quad (3)$$

# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA

## INDICADORES DE VALOR AÑADIDO O DE ADICIONALIDAD “VEA”

Servicios eco-sistémicos del cuerpo de agua receptor por dilución de la descarga final:  $VEA_{dw}$

Zhang, X., et al. 2014. *Resources Conservation and Recycling*, 92, 95-107.

Energía implicada en la captura de emisiones de  $CO_{2-eq.}$ :  $VEA_{CO2}$

Buonocore et al. 2014. *Ecological Modelling*, 271, 10-20.

### (iv) IDENTIFICACIÓN DE RELACIONES ECONÓMICO-AMBIENTALES

- Cambios en Indicadores de presión ambiental y servicios eco-sistémicos, traducibles a co-beneficios o “adicionalidades”
- **Análisis Emergético**

Servicios eco-sistémicos del aire para dilución de emisiones atmosféricas locales:

$$VEA_{Atm} = VEA_{dA} + VEA_S$$

Zhang, X., et al. 2014. *Resources Conservation and Recycling*, 92, 95-107.

Energía relacionada con el uso de recursos:  $VEA_{ET}$

Ukidwe & Bakshi. 2007. *Energy*, 32(9), 1560-1592.

# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA

## NORMALIZACIÓN DE LOS INDICADORES “ VEA ”

$$VAN_{dw} = \frac{VEA_{dw}}{Em_{ef}} \quad (11)$$

$$VAN_{CO_2} = \frac{VEA_{CO_2}}{Em_{ef}} \quad (13)$$

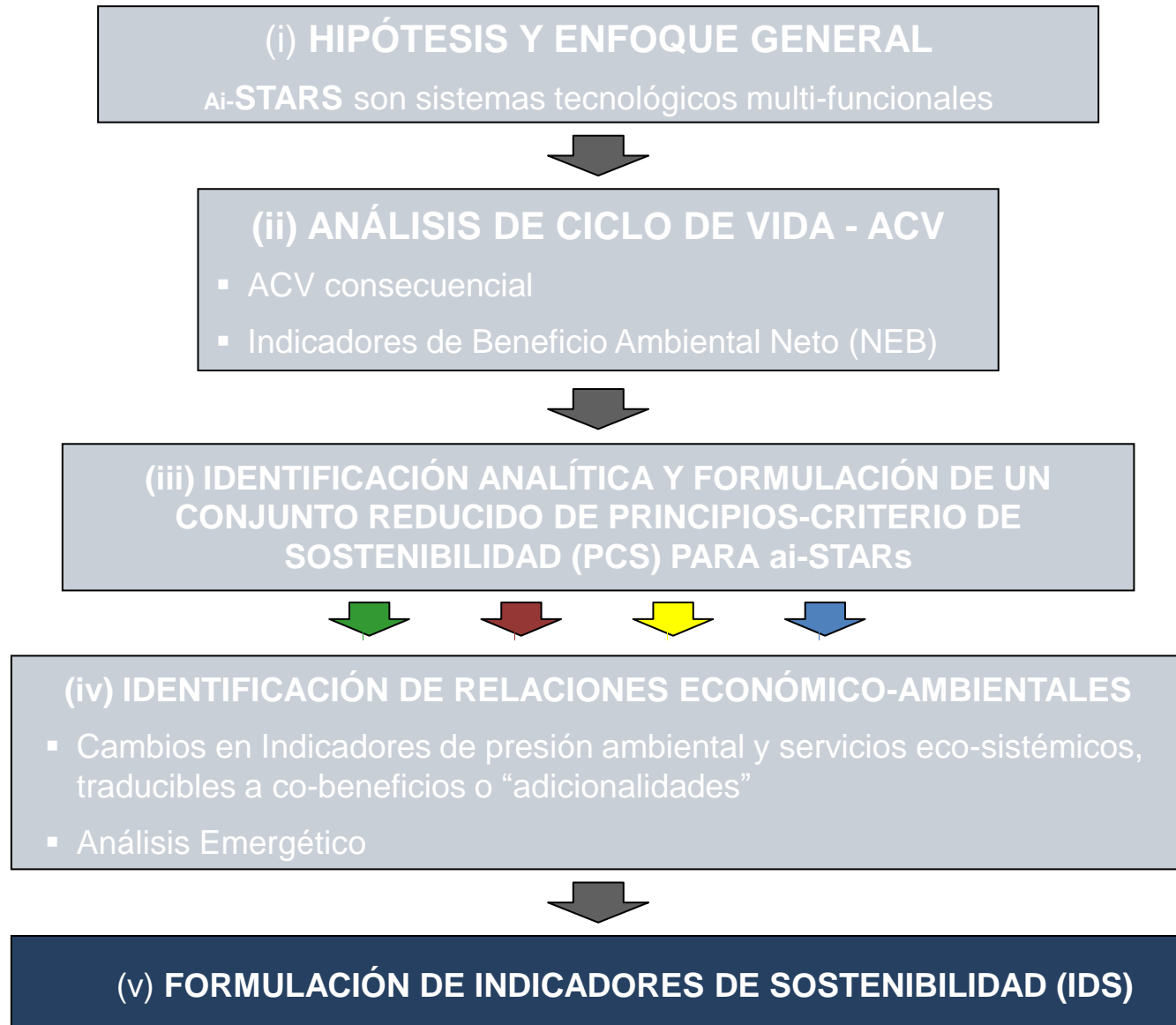
$$VAN_{Atm} = \frac{VEA_{Atm}}{Em_{ef}} \quad (12)$$

$$VAN_{ET} = \frac{VEA_{ET}}{Em_{ef}} \quad (14)$$

$Em_{ef}$ : Emergía del efluente crudo, calculada según los lineamientos dados por:

- *Bjorklund, Geber & Rydberg. 2001. Resources Conservation and Recycling, 31(4), 293-316.*
- *Vassallo, Paoli & Fabiano. 2009. Ecological Engineering, 35(5), 687-694.*

### 3. METODOLOGÍA: INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD – IDS (10/12)



# 5. CONTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA



## (v) FORMULACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD (IDS)

| PCS                                     | Término Ambiental    |  | Termino eco-económico | IDS                                     |  |
|---|----------------------|--|-----------------------|---|--|
|   | IAM <sub>i</sub>     | Agregación Primaria                      | VAN <sub>i</sub>      | EE <sub>i</sub>                         | Expresión del criterio evaluado            |
| Uso del medio ambiente como sumidero    | IAM <sub>EP</sub>    | IAM <sub>EP</sub>                        | VAN <sub>dw</sub>     | $EE_{RH} = \frac{VAN_{dw}}{IAM_{EP}}$   | Calidad del recurso hídrico                |
|   | IAM <sub>AP</sub>    | $IAM_{Atm} = \sum_{i=1}^2 (p_i * IAM_i)$ | VAN <sub>Atm.</sub>   | $EE_{AL} = \frac{VAN_{Atm}}{IAM_{Atm}}$ | Calidad del ambiente local                 |
|   | IAM <sub>Respl</sub> |  |                       |   |  |
|   | IAM <sub>GWP</sub>   | IAM <sub>GWP</sub>                       | VAN <sub>CO2</sub>    | $EE_{CC} = \frac{VAN_{CO2}}{IAM_{GWP}}$ | Capacidad de respuesta al cambio climático |
| Uso sostenible de los recursos (R y NR) | IAM <sub>NRE</sub>   | IAM <sub>NRE</sub>                       | VAN <sub>ET</sub>     | $EE_{SR} = \frac{VAN_{ET}}{IAM_{NRE}}$  | Uso sostenible de los recursos             |

$$IAM_P = \sum_{i=1}^4 (w_i * IAM_i)$$

$$VAN_T = \sum_{i=1}^4 VAN_i$$

$$EE_T = \frac{VAN_T}{IAM_p}$$

# 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

## CASO I. SECTOR AVÍCOLA

- Procesadora de vísceras de pollo
- STAR Combinado (**EGSB** + Lodos Activos)
- Baja disponibilidad de energía en el STAR
- Biogás recuperable en la unidad primaria EGSB
- Lodo no comprometido en recuperación energética

## CASO II. SECTOR MALTAS Y CERVEZAS

- Aguas del proceso de la cerveza
- STAR Combinado (**EGSB-IC**+ MBBR)
- Alta disponibilidad de energía en el STAR
- Biogás recuperado en la unidad primaria EGSB-IC (uso establecido)
- Lodo no comprometido en recuperación energética

**UNIDAD FUNCIONAL:** valorización de 1 m<sup>3</sup> de biogás producido en el STAR

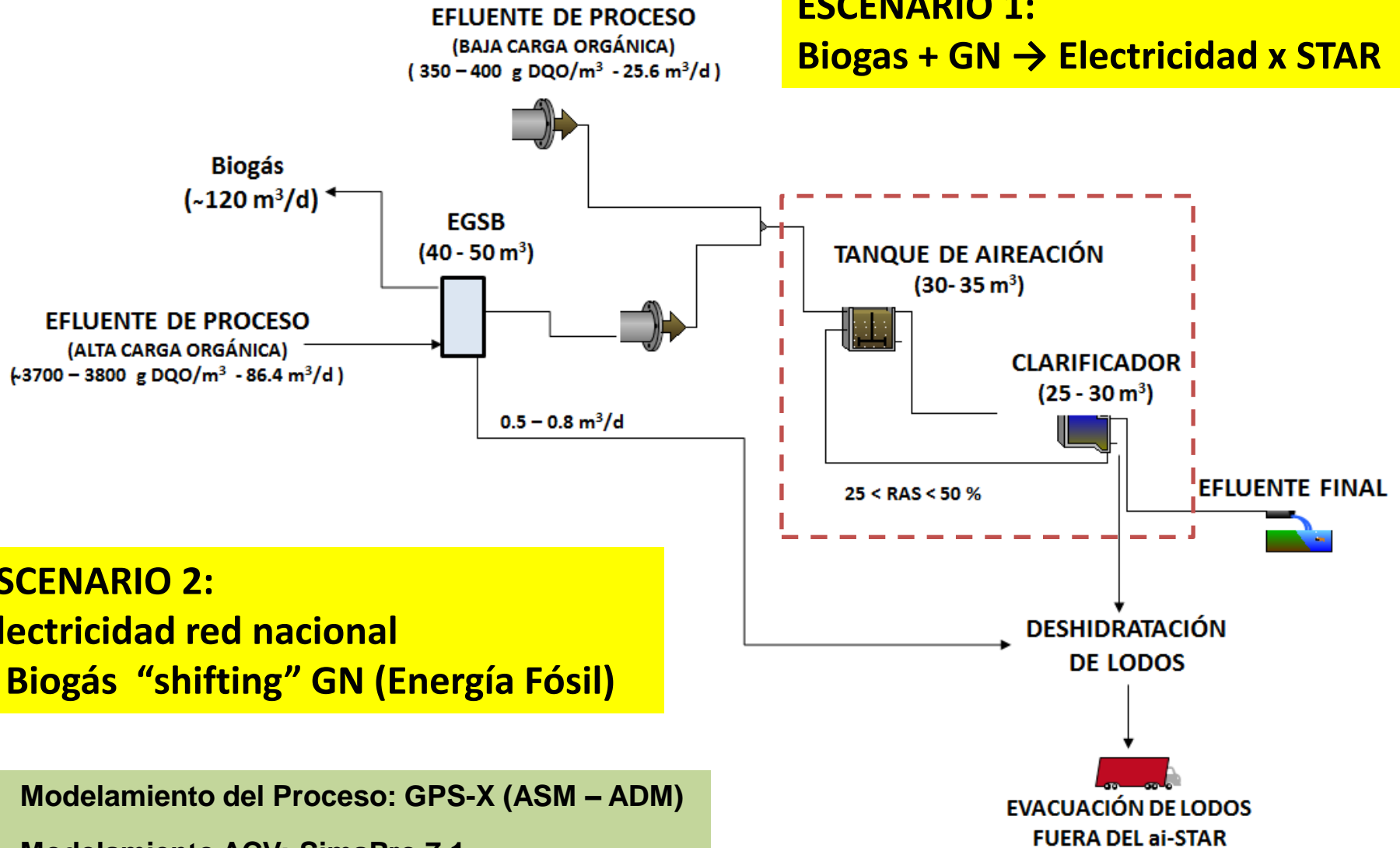
## ACV DEL CONTEXTO TECNOLÓGICO (BACKGROUND)

- Matriz eléctrica colombiana
- Red colombiana de gas natural
- Combustibles B-10
- Procesos Ecoinvent x Químicos



# 5.1 CASO DE ESTUDIO I – PROCESO STAR “AVÍCOLA”

## ESCENARIO 1: Biogas + GN → Electricidad x STAR



## ESCENARIO 2: Electricidad red nacional + Biogás “shifting” GN (Energía Fósil)

- Modelamiento del Proceso: GPS-X (ASM – ADM)
- Modelamiento ACV: SimaPro 7.1

# 5.1 RESULTADOS: CASO I - STAR AVÍCOLA

**Tabla 4. Determinación del término ambiental de los IDS: indicadores  $IAM_i$  (Caso I)**

| "MID-POINTS" E INDICADORES TIPO $NEB_{i,n}$ |          |          |           | INDICADORES AMBIENTALES NORMALIZADOS PARA IDS |              |                 |                 |                            |                         |
|---|----------|----------|-----------|---|--------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| CATEGORIA DE IMPACTO                        | IIAPC    |          | IIAPS     | $NNEB_{i,n}$                                  |              |                 | $IAM_i$         | Esc. 2<br>vs.<br>Esc. nulo | Esc. 2<br>vs.<br>Esc. 1 |
|   | PV1+EVE  | PV2+EVE  | Esc. Nulo | $NNEB_{i,1}$                                  | $NNEB_{i,2}$ | $NNEB_{i,nulo}$ |                 |                            |                         |
| AP<br>(kg $SO_{2-eq}$ )                     | 0,00558  | 0,00363  | 0         | -1  | -0,65062     | 0               | $IAM_{AP} =$    | - 0,32531                  | 0,17469                 |
| Respl<br>(kg $PM_{2.5-eq}$ )                | 0,00079  | 0,00059  | 0         | -1  | -0,73994     | 0               | $IAM_{REspl} =$ | - 0,36997                  | 0,13003                 |
|   |          |          |           |   |              |                 | $IAM_{ATM} =$   | - 0,34764                  | 0,15236                 |
| EP<br>(kg $PO_{4-eq}$ )                     | -0,08459 | -0,09017 | 0,11651   | 0,97302                                       | 1            | -0.56372        | $IAM_{EP} =$    | 0,78186                    | 0,01349                 |
| GWP <sub>100</sub><br>(kg $CO_{2-eq}$ )     | 0,337    | 0,334    | 1,828     | 0,8156  | 0,8173       | -1              | $IAM_{GWP} =$   | 0,90865                    | 0,00085                 |
| NRE<br>(MJ)                                 | -3,75    | -18,81   | 0         | 0,19940                                       | 1            | 0               | $IAM_{NRE} =$   | 0,5                        | 0,40030                 |

*Referidos a la Unidad Funcional: 1 m<sup>3</sup> biogás*

# 5.1 RESULTADOS: CASO I - STAR AVÍCOLA

**Tabla 5. Términos eco-económicos (VAN) y agregación de IDS (Caso I)**

| Conjunto de datos para $VAN_T$ |           |           |           | Conjunto de datos para $IAM_p$ |         |         |         |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Indicador                      | (i)       | (ii)      | (iv)      | Indicador                      | (i)     | (ii)    | (iv)    |
| $VAN_{dW}$                     | 5,272E-2  | 0,0       | 5,272E-2  | $IAM_{EP}$                     | 0,7819  | 0,0135  | 0,7819  |
| $VAN_{Atm}$                    | -6,693E-5 | 2,272E-5  | 2,272E-5  | $IAM_{Atm}$                    | -0,3476 | 0,1524  | 0,1524  |
| $VAN_{CO2}$                    | 1,070E-2  | 2,161E-5  | 2,161E-5  | $IAM_{GWP}$                    | 0,9087  | 0,0009  | 0,0009  |
| $VAN_{ET}$                     | -2,020E-3 | -0,807E-3 | -0,807E-3 | $IAM_{NRE}$                    | 0,5     | 0,4003  | 0,4003  |
| $VAN_T$                        | 0,06133   | -0,00076  | 0,05196   | $IAM_p$                        | 0,46075 | 0,14178 | 0,33388 |

i)  $VAN_i$  determinados con el escenario nulo como línea base.

ii)  $VAN_i$  determinados con el escenario 1 como línea base.

iv) Idem a ii), pero con el  $VAN_{dW}$  calculado con base al escenario nulo para acentuar el NEB.

**Obs. 1.** Aunque los indicadores ambientales  $IAM_i$  sean positivos, no necesariamente esto se refleja en un indicador de valor agregado  $VAN_i$  positivo

# 5.1 RESULTADOS: CASO I - STAR AVÍCOLA

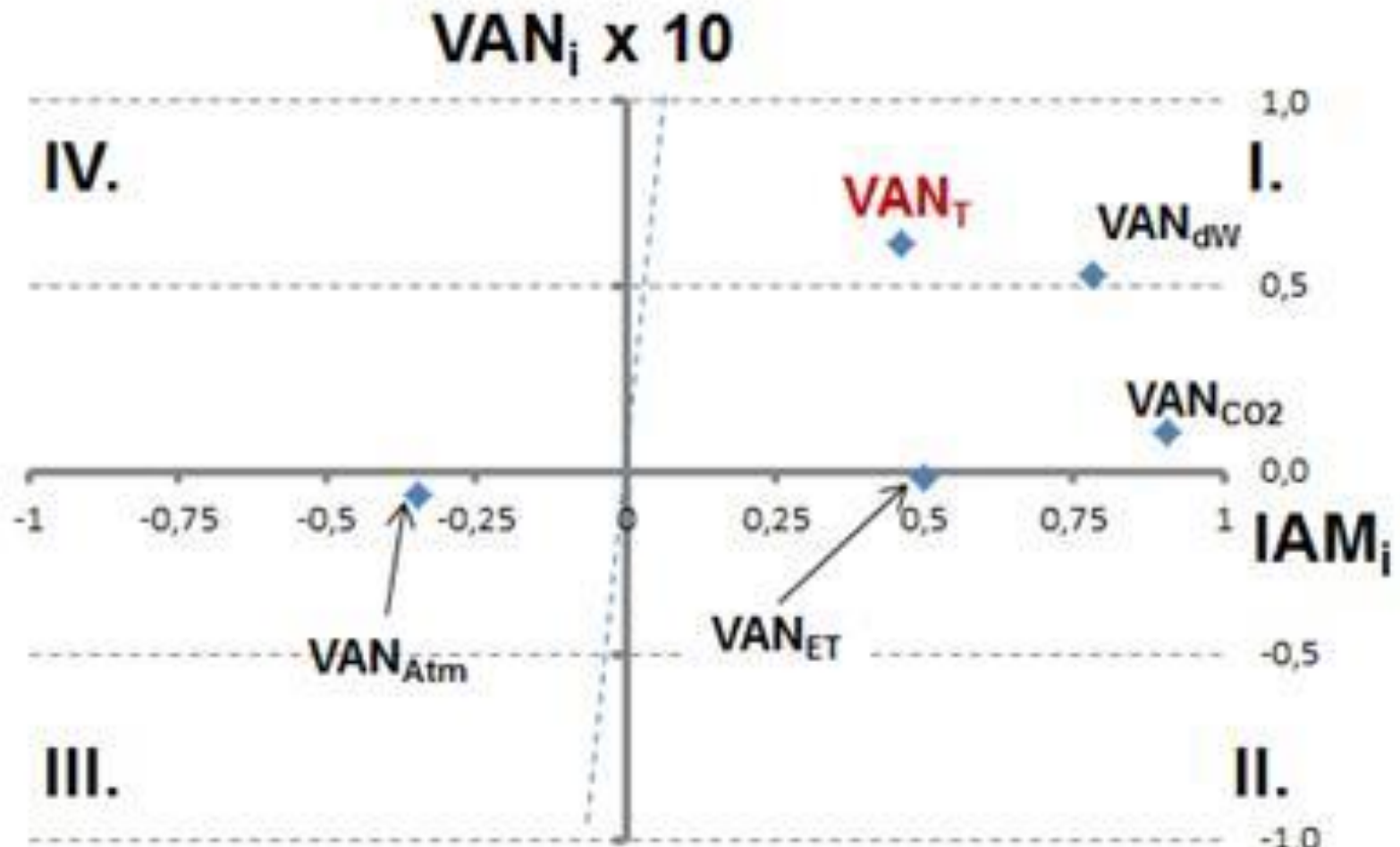
**Tabla 5. Términos eco-económicos (VAN) y agregación de IDS (Caso I)**

| Conjunto de datos para $VAN_T$ |           |           |           | Conjunto de datos para $IAM_p$ |         |         |         |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Indicador                      | (i)       | (ii)      | (iv)      | Indicador                      | (i)     | (ii)    | (iv)    |
| $VAN_{dW}$                     | 5,272E-2  | 0,0       | 5,272E-2  | $IAM_{EP}$                     | 0,7819  | 0,0135  | 0,7819  |
| $VAN_{Atm}$                    | -6,693E-5 | 2,272E-5  | 2,272E-5  | $IAM_{Atm}$                    | -0,3476 | 0,1524  | 0,1524  |
| $VAN_{CO2}$                    | 1,070E-2  | 2,161E-5  | 2,161E-5  | $IAM_{GWP}$                    | 0,9087  | 0,0009  | 0,0009  |
| $VAN_{ET}$                     | -2,020E-3 | -0,807E-3 | -0,807E-3 | $IAM_{NRE}$                    | 0,5     | 0,4003  | 0,4003  |
| $VAN_T$                        | 0,06133   | -0,00076  | 0,05196   | $IAM_p$                        | 0,46075 | 0,14178 | 0,33388 |

**Obs 2.** El cálculo del indicador agregado  $VAN_T$  por comparación entre escenarios no nulos, puede conducir a un valor negativo expresivo de “no adicionalidad”, debido a que el esfuerzo tecnológico  $VAN_{ET}$  en el cambio de tecnología puede solapar beneficios menores o adicionales marginales en otros indicadores.

# 5.1 RESULTADOS: CASO I - STAR AVÍCOLA

Fig. 1. Interpretación grafica de IDS:  
Adicionalidad de escenario 2 vs. escenario nulo

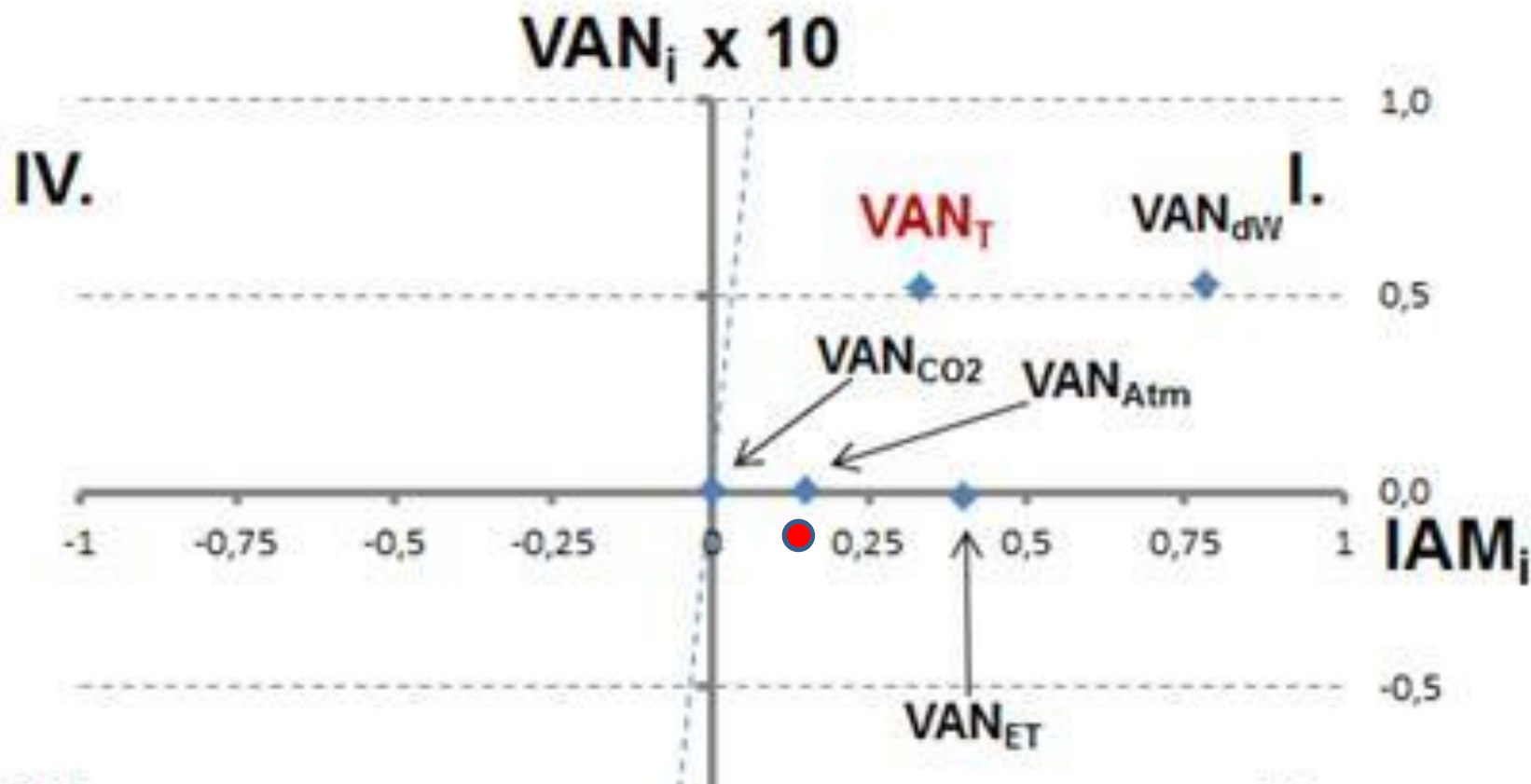


**Obs. 1.** La adicionalidad global es el resultado de la compensación de algunas “no adicionales” individuales y la sinergia entre distintas categorías

## 5.2 RESULTADOS: CASO I - STAR AVÍCOLA

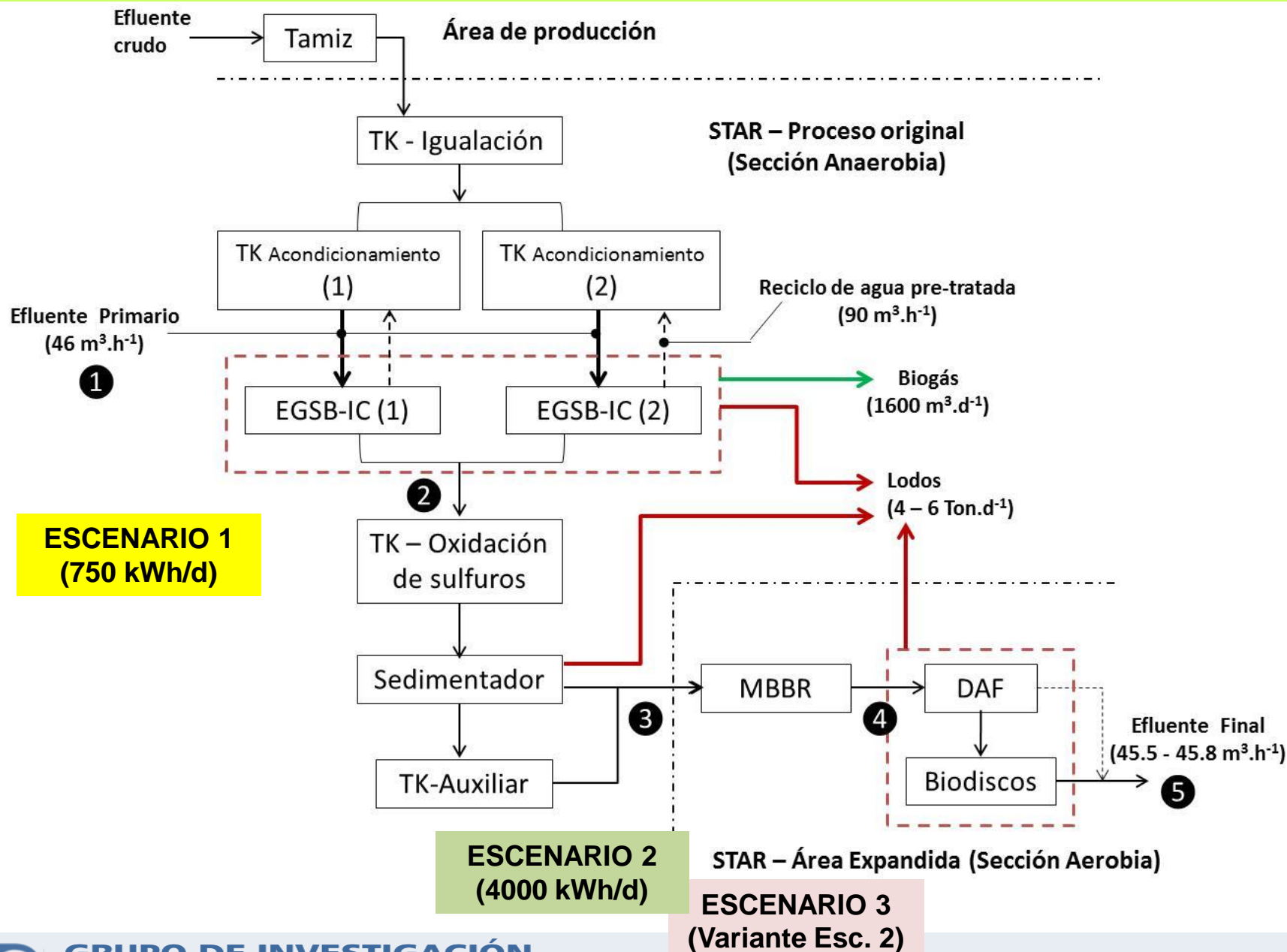
Fig. 2. Interpretación gráfica de IDS:

Adicionalidad de escenario 2 vs. escenario 1 ( $VAN_{dw,nulo}$ )



**Obs. 2.** La “adicionalidad global” depende poco de  $VAN_{CO2}$ . Por consiguiente la su sostenibilidad de estos STAR, no puede condicionarse irrestrictamente a contribuciones a la mitigación del cambio climático, sobretudo en proyectos de mejora de STAR existentes.

# 5.3. CASO DE ESTUDIO II – PROCESO STAR “MALTAS-CERVEZAS”



## 5.3. RESULTADOS: CASO II - STAR “MALTAS Y CERVEZAS”

Tabla 7. Términos eco-económicos (VAN) y agregación de IDS (Caso II)

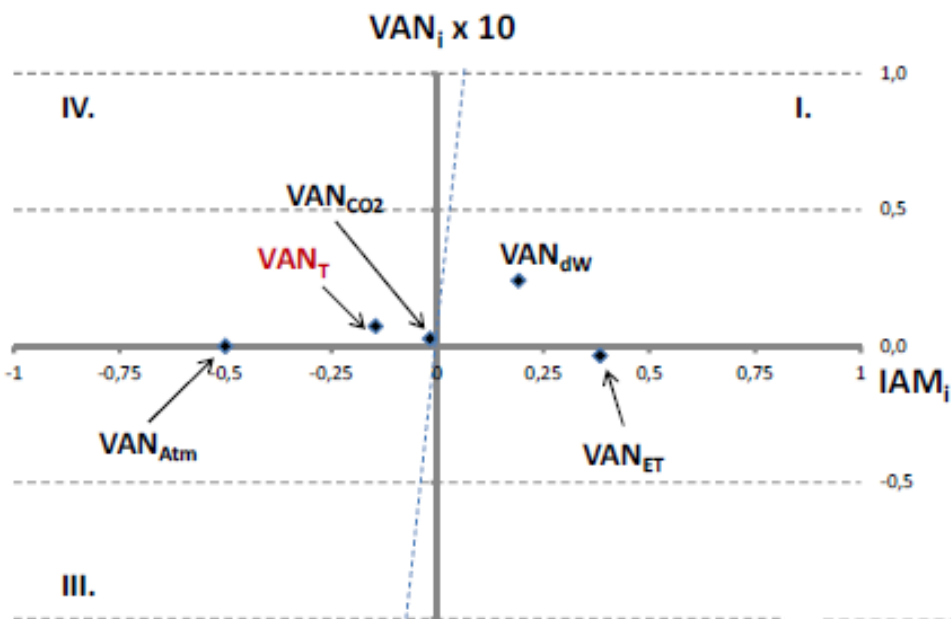
| Términos del IDS             | Escenario 1      |         | Escenario 2    |         | Escenario 3     |         |
|------------------------------|------------------|---------|----------------|---------|-----------------|---------|
|                              | $VAN_i$          | $IAM_i$ | $VAN_i$        | $IAM_i$ | $VAN_i$         | $IAM_i$ |
| $VAN_{dW}$ vs. $IAM_{EP}$    | 0,023            | 0,1681  | 0,024          | 0,1924  | 0,024           | 0,2189  |
| $VAN_{Atm}$ vs. $IAM_{Atm}$  | -2,11E-6         | -0,3640 | -2,85E-6       | -0,5    | -2,60E-6        | -0,3739 |
| $VAN_{CO2}$ vs. $IAM_{GWP}$  | 0,017            | 0,1194  | 0,0073         | -0,1454 | 0,0187          | 0,1578  |
| $VAN_{ET}$ vs. $IAM_{NRE}$   | -0,49E-3         | 0,5     | -0,0035        | 0,3844  | -0,0035         | 0,3861  |
| $VAN_T$                      | 0,0395           |         | 0,027          |         | 0,0392          |         |
| $IAM_p$                      |                  | 0,1059  |                | -0,0172 |                 | 0,0972  |
| $IAM_p^*$                    |                  | 0,1877  |                | 0,1392  |                 | 0,1871  |
| $EE_T = \frac{VAN_T}{IAM_p}$ | 0,3730 (0,2104*) |         | C.N.A (0,1940) |         | 0,4033 (0,2095) |         |

- $w_{EP} = 0,558$ ,  $w_{Atm} = 0,122$ ,  $w_{GWP} = 0,057$  y  $w_{NRE} = 0,263$ , donde  $\sum w_i = 1$

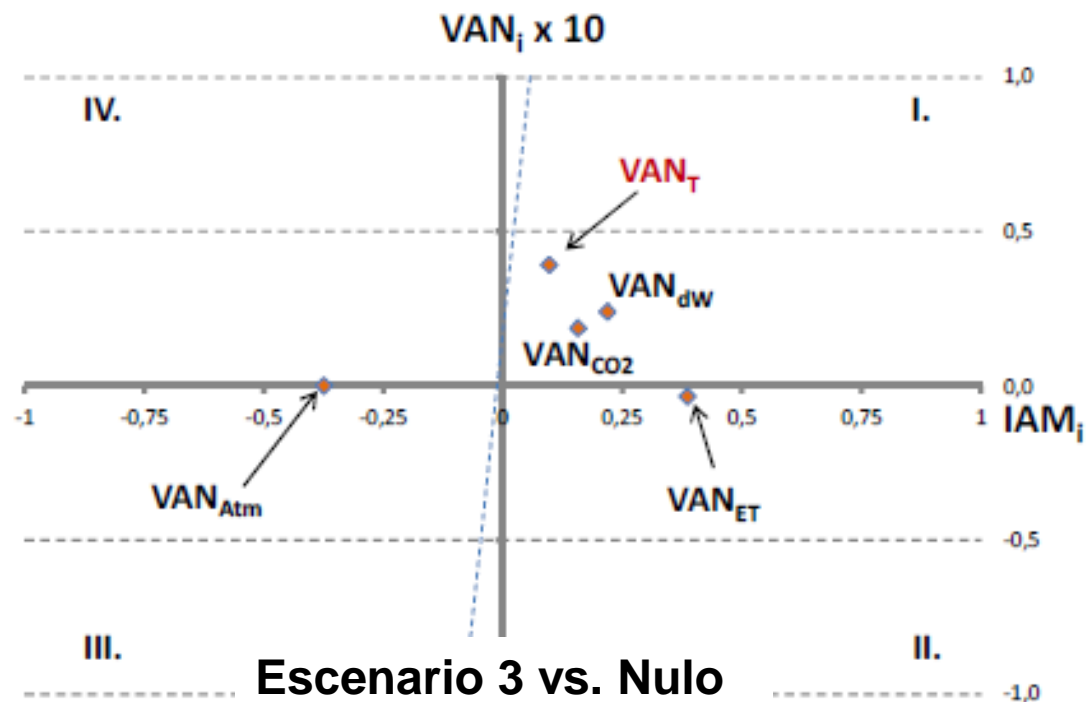


## 5.3. RESULTADOS: CASO II - STAR "MALTAS Y CERVEZAS"

Fig. 3. Interpretación grafica de IDS



Escenario 2 vs. Nulo



Escenario 3 vs. Nulo

## 5.3. RESULTADOS: CASO II - STAR “MALTAS Y CERVEZAS

### Observaciones preliminares:

- Los indicadores relacionados con la calidad del aire local, son consistentemente no adicionales en todas las condiciones de evaluación, particularmente porque en el escenario nulo, las categorías de impacto de mid-point no son sensitivas a la intervención ambiental de la descarga sin tratar y esto repercute en todo el estudio.
- El escenario 2 muestra ser “no adicional”. Pero utilizando una versión de cálculo modificada del termino ambiental agregado  $IAM_p$ , mediante factores de peso que privilegian la reducción impacto local ( $IAM_p^*$ ), se puede probar adicionalidad.
- Cuando el indicador  $IAM_{GWP}$  es positivo, la adicionalidad total  $VAN_T$  tiene los valores más altos y esto se debe que el correspondiente  $VAN_{CO_2}$  también es importante y compensa los resultados no-adicionales en  $VAN_{ET}$  y  $VAN_{Atm}$ .

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

- La noción de sostenibilidad está vinculada a la de “adicionalidad”, y su probatoria requiere de IDS agregados:  $IAM_p$ ,  $VAN_T$  y  $EE_T$ .
- La condición de sostenibilidad de STAR no debe limitarse a criterios de mitigación o control del cambio climático, dado que IDS relacionados con el impacto local son particularmente importantes en el estudio de pequeños STAR con baja disponibilidad de energía.
- STAR comprometidos con recobro de energía y altos estándares de vertimiento, aumentan el uso de recursos externos, es decir el costo emergético ( $VEA_{ET}$ ), una condición no adicional *per-se* que es “inevitable” para promover “adicionalidad”, a través de otros indicadores.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

- La escogencia de la línea base, la salvaguarda del enfoque NEB o el uso de factores de peso en el cálculo de  $IAM_p$ , son aspectos fundamentales para la probatoria de adicionalidad, que deben ser estudiados con mayor detalle para mejorar la objetividad de la metodología.
- En el plano de la aplicación, la metodología muestra sensibilidad para valorar ambos lados del nexo agua-energía y en el contexto del estudio, los resultados obtenidos se inclinan por rutas de valorización de la energía de los STAR (biogás), que desplacen en las fronteras del sistema el uso de gas natural.
- La metodología tiene potencial para ser utilizada como instrumento normativo, sea para la formulación de normas o políticas ambientales o para orientar su implementación.