The background of the slide is a photograph showing a series of utility poles and power lines stretching across a landscape at sunset. The sky transitions from a deep blue at the top to a bright orange and red near the horizon. The utility poles are dark silhouettes against the lighter sky, with various electrical components and wires visible on them. The overall mood is serene and industrial.

# **FORMULACIÓN DE UNA PROPUESTA TECNOLÓGICA DE NO COMBUSTIÓN PARA TRATAR Y ELIMINAR BIFENILOS POLICLORADOS EN COLOMBIA**

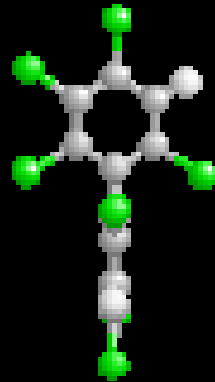
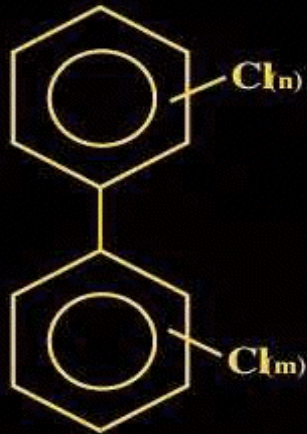
Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería Ambiental

Director: Pedro Claver Morales  
Co-director: Orlando Quintero

María José Villalobos Saldaña

# BIFENILOS POLICLORADOS (PCB)

Qué son?



Aislante Eléctrico  
Conductor de Calor  
No inflamables  
Altamente Estables

Aplicaciones



Transformadores  
Condensadores



# JUSTIFICACIÓN



# TECNOLOGÍAS PROPUESTAS POR LA POR LA SECRETARÍA DE BASILEA

---

27  
TECNOLOGÍAS



- A. Comercializadas con experiencia considerable
- B. Cercanas o comenzando su etapa de comercialización
- C. Tecnologías promisorias
- D. Tecnologías que requieren investigación
- E. Tecnologías que no son aplicables para la destrucción de pilas de COP.

## **A. Comercializadas con experiencia considerable**

---

- 1. Reducción Química en Fase Gaseosa (RQFG)**
- 2. Descomposición Catalizada por Bases (DCB)**
- 3. Reducción con Sodio Metálico (RSM)**
- 4. Arco de Plasma (PLASCON)**
- 5. Oxidación en Agua Supercrítica (OASC)**

# OBJETIVO GENERAL

---

Formular una propuesta para la implementación de una de las tecnologías de no combustión, considerada por la **Secretaría de Basilea**, en el tratamiento de aceites PCB y descontaminación de transformadores eléctricos en Colombia.

# OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

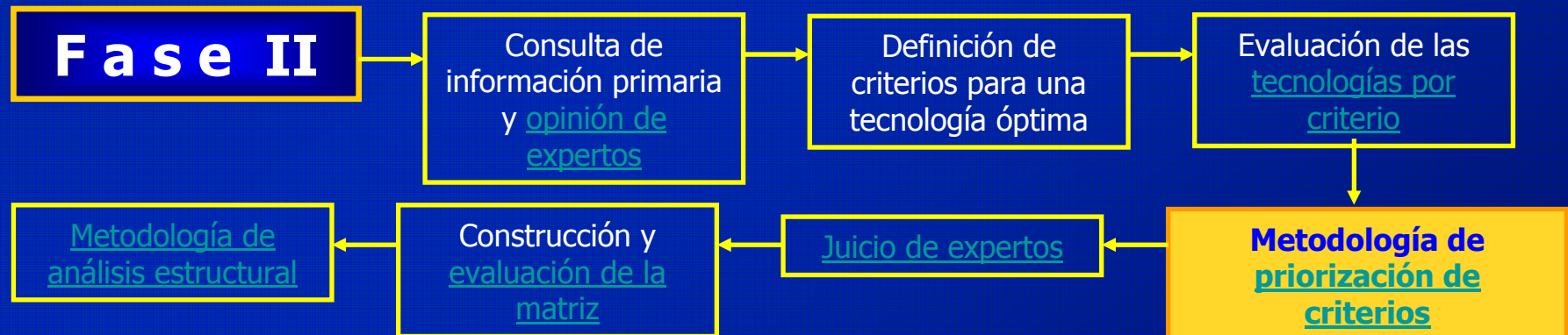
1. Identificar la tecnología o grupo de tecnologías de no combustión que pueden ser aplicables en Colombia.
2. Seleccionar una de las tecnologías cuyos criterios operativos, económicos y ambientales sean los más favorables para su implementación en el país.
3. Evaluar la potencialidad de implementar la tecnología seleccionada.
4. Establecer una metodología para la priorización de criterios en el proceso de selección de tecnologías\*\*.

# METODOLOGÍA

Identificación de 2 tecnologías potencialmente aplicables en Colombia



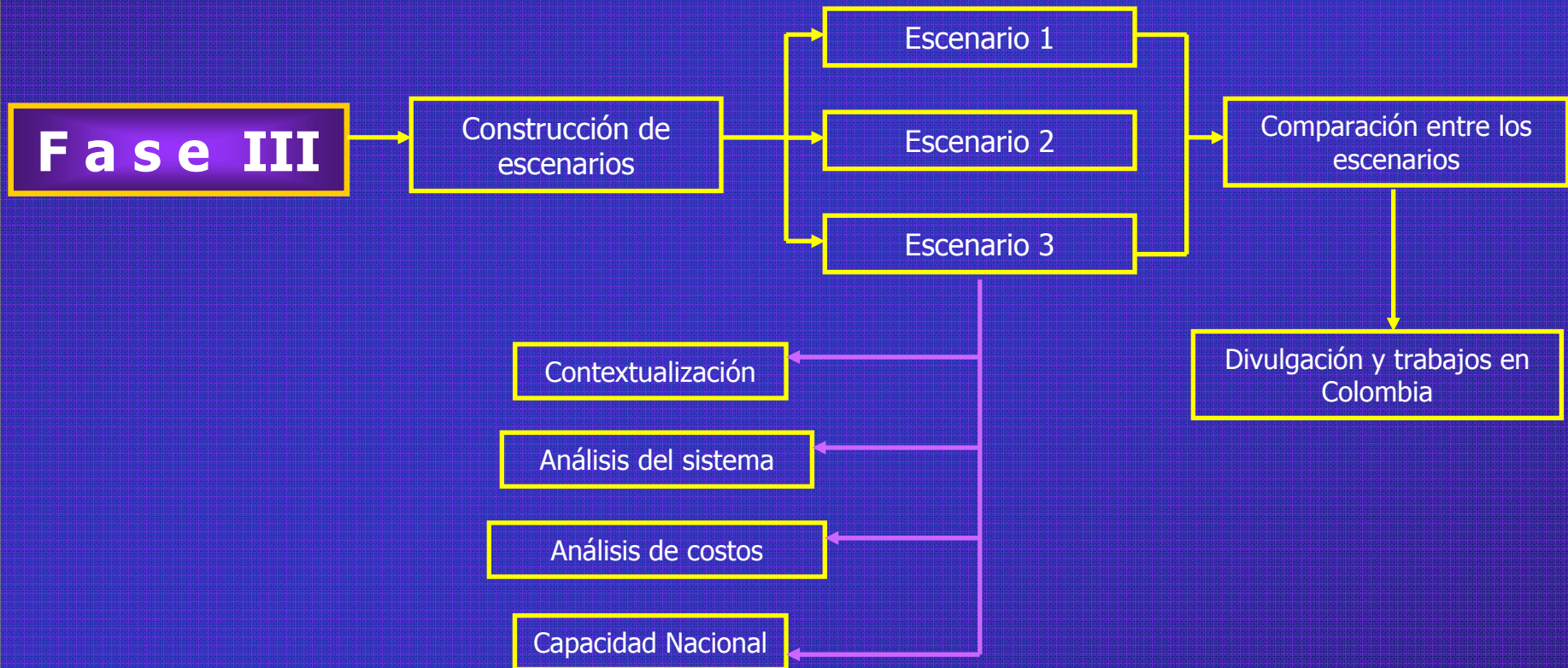
Elección de la tecnología promisoría para el país





# METODOLOGÍA

Construcción de escenarios y formulación de propuestas



# Análisis cualitativo por comparación de criterios

- Versatilidad
- Experiencia

## Criterios Operativos

- Pretratamiento
- Energía, agua, combustible y espacio
- Características y cantidad de reactivo
- Personal
- Eficiencia de destrucción (DE)
- Capacidad

### Requerimientos

### Desempeño

## Criterios Ambientales

- Residuos sólidos generados
- Emisiones
- Vertimientos

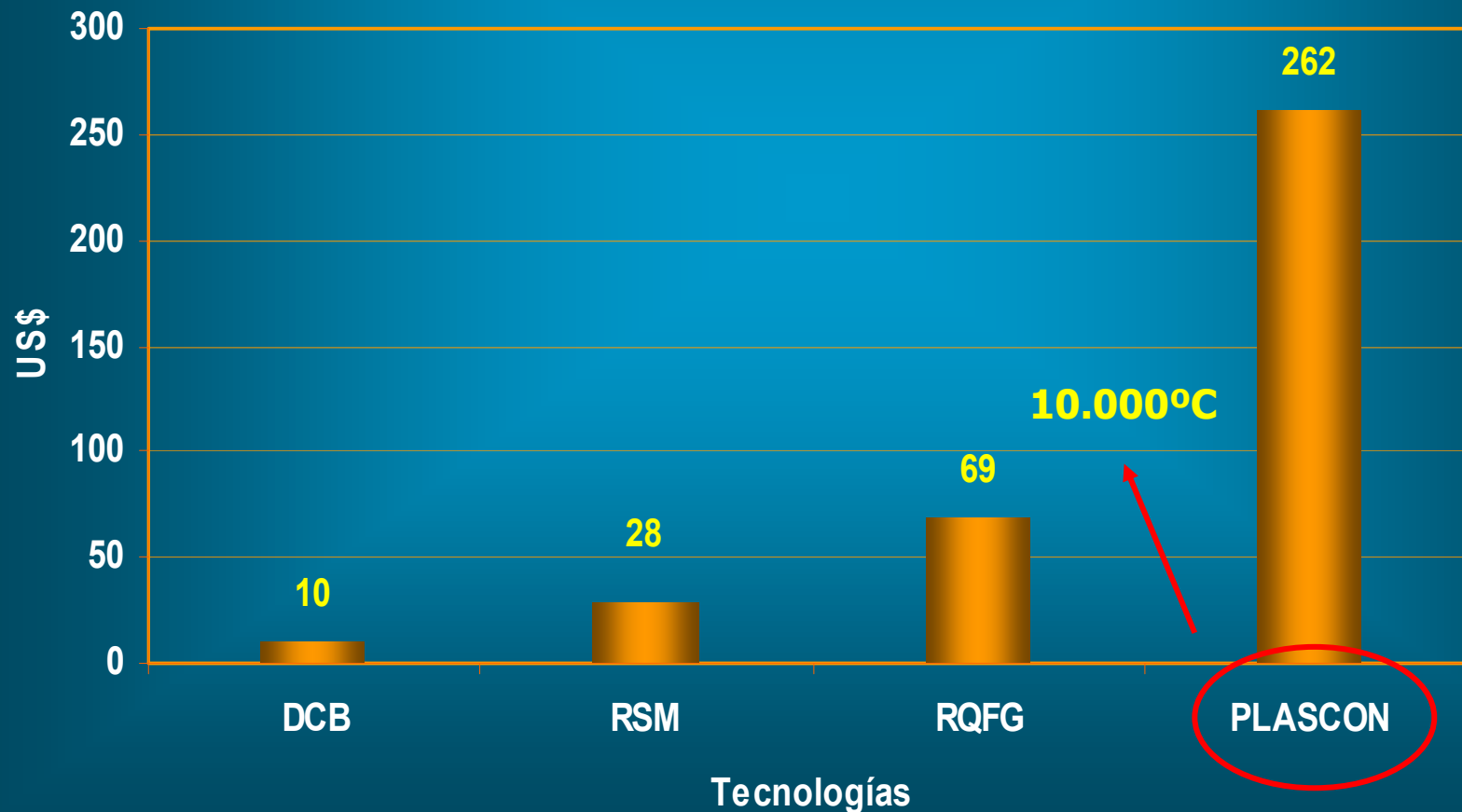
## Criterios Económicos

- Costos
- Riesgos
- Valor Agregado

# Discusión de Resultados

## Requerimientos de energía

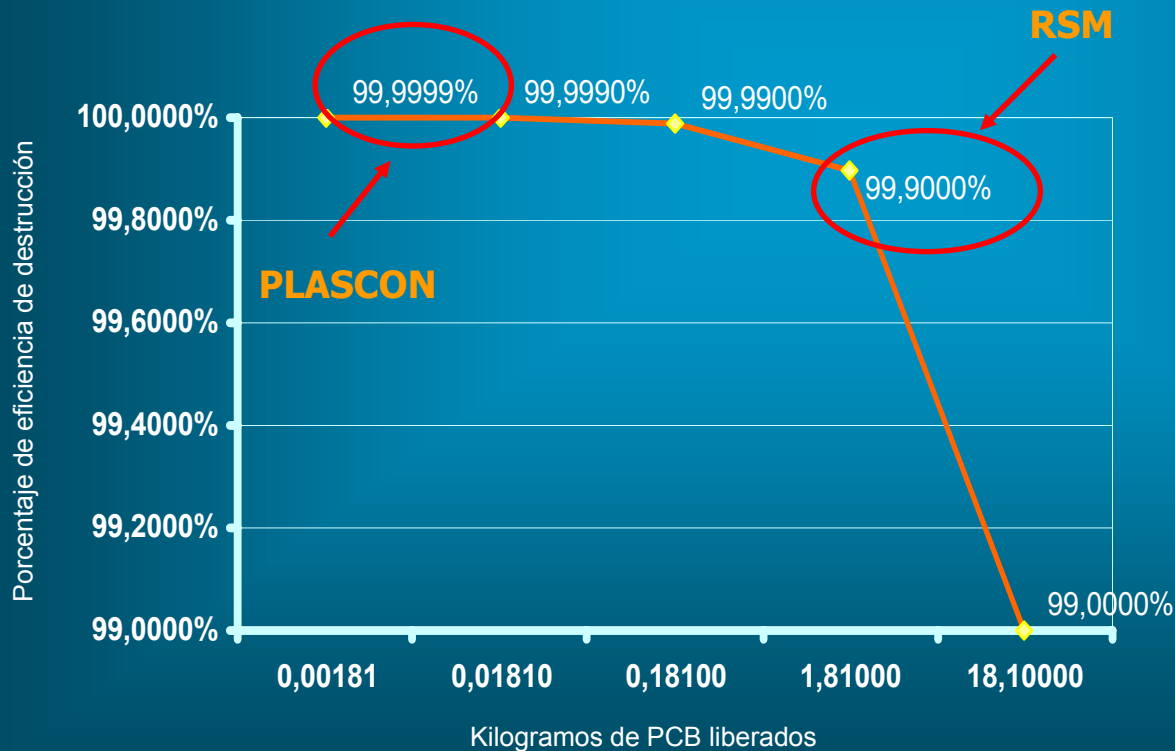
Demanda y costo energético en Colombia de las tecnologías para el tratamiento de una tonelada de residuos



# Discusión de Resultados

## Eficiencia de destrucción

Relación entre las eficiencias de remoción y la cantidad de PCB que sale del sistema para la situación de Colombia



DE (%)	Kg PCB Liberados
99,9999%	0,00181
99,9990%	0,01810
99,9900%	0,18100
99,9000%	1,81000
99,0000%	18,10000

Volver

# Análisis cuantitativo

Resultados del proyecto "Formulación de alternativas ambientalmente apropiadas para la disposición final de plaguicidas en desuso incautados por el Estado".  
Cárdenas, 2006

CLASIFICACIÓN	TECNOLOGÍA	PONDERACIÓN TOTAL	VALORACIÓN
1	DCB	400	Tecnología promisoría
2	RSM	550	Tecnología promisoría
3	Co-incineración	800	Promisoría con revisiones
4	Incineración	1000	Promisoría con revisiones
5	RQFG	1050	Promisoría con revisiones
6	PLASCON	1050	Promisoría con revisiones
7	Subcrítica	1050	Promisoría con revisiones
8	OASC	1150	No promisoría
9	HDC	1100	No promisoría

Volver

# Análisis de resultados

## Tecnologías promisorias para el país

### Reducción con sodio metálico

- Experiencia comercial de más de 20 años
- Experiencias en países en vía de desarrollo
- Demanda **Limitaciones** energía y reactivo bajas
  - Seguridad sodio metálico
- Se adapta a las limitaciones de espacio y personal capacitado del país
- Costos bajos
- Reutilización del aceite

### Descomposición catalizada por bases

- Porcentaje de remoción superior al límite mínimo
- Experiencia en el tratamiento de grandes cantidades de líquidos PCB en México **Limitaciones**
- Tiene los requerimientos energéticos más bajos
- La cantidad de desechos sobrepasa la cantidad de residuos tratados
- Recuperación del catalizador
- Reutilización donante de hidrógeno (95%)
- Los residuos de carbono no son tóxicos

Volver

# Información primaria y opinión de expertos

## Reducción con sodio metálico

"La ventaja mas grande de esta tecnología es la posibilidad de **reutilizar el aceite** después de la descontaminación" (Comunicación personal, Lee, Mayo 17 de 2006)

"La tecnología RSM fue la primera tecnología extranjera **permitida para operar en Japón**". (Comunicación personal, González, Mayo 21 de 2006)

## Descomposición catalizada por bases

"...la cantidad de residuos puede **triplicar** en masa a la cantidad inicial de PCB procesado, por las sales generadas..." (Comunicación Personal, Miller, 4 de Junio de 2006, **Estados Unidos**)

"...obteníamos por tanto, tras la reacción, un residuo peligroso (según la legislación vigente) que debíamos tratar utilizando vías similares que las que se utilizan para el propio PCB, pero además habíamos **triplicado** el volumen" (Comunicación personal, Barquin, Julio 17 de 2006, **España**)

Volver

# Comparación con cada criterio óptimo

CRITERIOS	TECNOLOGÍA QUE MÁS SE ACERCA A LA IDEAL	CRITERIOS	TECNOLOGÍA QUE MÁS SE ACERCA A LA IDEAL
1. Estado y Experiencia	<b>2</b>	10. Configuración y espacio	<b>0</b>
2. Pretratamiento	<b>2</b>	11. Personal	<b>0</b>
3. Postratamiento	<b>2</b>	12. Residuos sólidos	<b>2</b>
4. DE	<b>1</b>	13. Reutilización o reciclaje de residuos	<b>2</b>
5. Concentración final de PCB	<b>0</b>	14. Vertimientos	<b>1</b>
6. Condiciones de reacción	<b>2</b>	15. Emisiones	<b>0</b>
7. Versatilidad	<b>1</b>	16. Riesgos	<b>0</b>
8. Requerimientos de agua, energía y combustible	<b>0</b>	17. Costos	<b>0</b>
9. Reactivo	<b>0</b>		

## Donde :

**1** = DCB

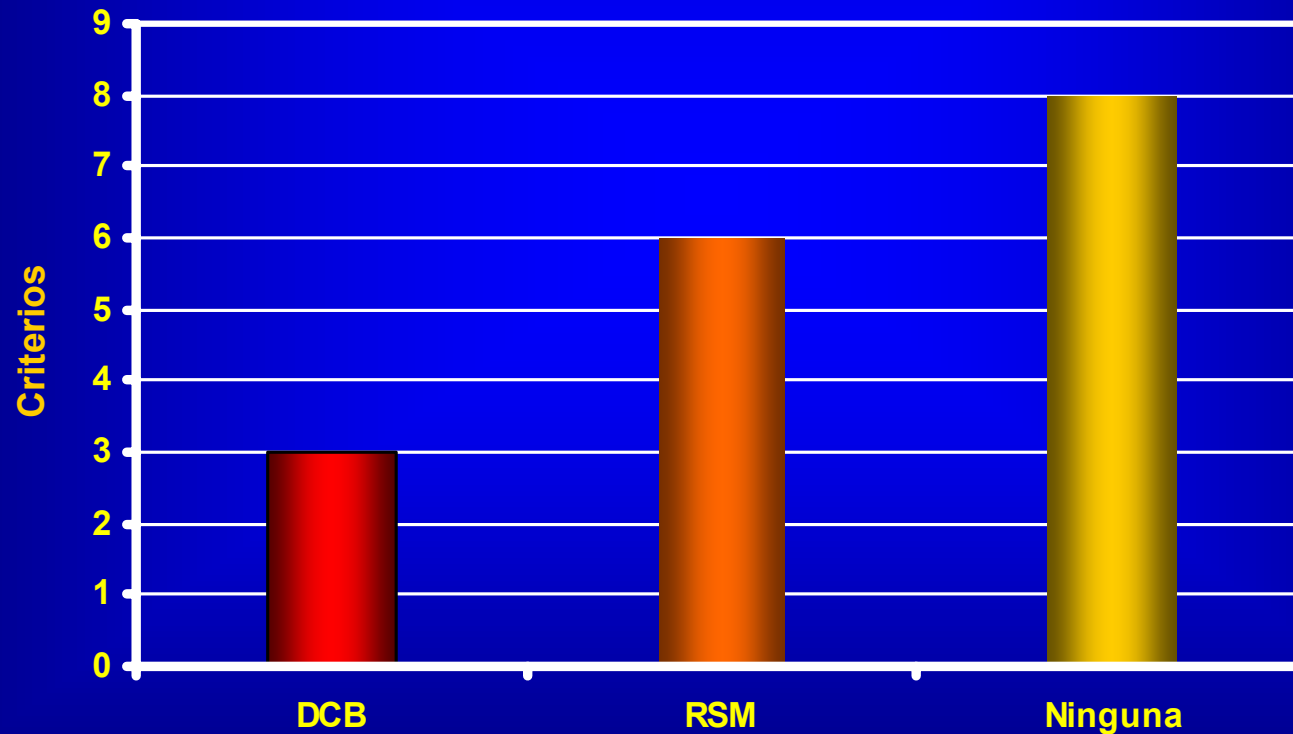
**2** = RSM

**0** = Las tecnologías se encuentran en condiciones similares y no se considera una mejor que otra en el criterio evaluado



# Comparación con cada criterio óptimo

Distribución del número de criterios óptimos a los que se acercan las tecnologías descomposición catalizada por bases y sodio metálico



Volver

# Técnica de análisis estructural





**Grupo de expertos**

[Volver](#)

# Juicio de expertos

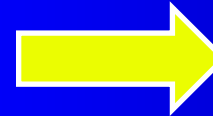
Criterios	Expertos				
	ROGERS	KELLY	LEE	PAQUIN	PULGARIN
1	13	4	5	5	4
2	15	1	1	7	5
3	7	12	2	1	10
4	5	2	3	18	8
5	4	3	4	2	9
6	16	6	16	3	18
7	18	7	18	8	14

1. Estado y experiencia
2. Pretratamiento
4. Eficiencia de Destrucción

## Criterios con mayor número de coincidencias

---

1. Estado y experiencia de la tecnología
2. Pretratamiento mínimo de los residuos
3. Requerimientos de postratamiento
4. Eficiencia de destrucción
5. Concentración final de residuos PCB
7. Aplicabilidad a otros COP
18. Costos



**7 criterios**

Volver

# Construcción y evaluación de la matriz

	Estado y Experiencia	Requerimientos de pretratamiento	Requerimientos de postratamiento	Eficiencia de Destrucción	Concentración final de residuos PCB	Aplicabilidad a otro tipo de COP	Costos
Estado y Experiencia							
Requerimientos de pretratamiento							
Requerimientos de postratamiento							
Eficiencia de Destrucción							
Concentración final de residuos PCB							
Aplicabilidad a otro tipo de COP							
Costos							

**1=** No hay relación entre los criterios

**2=** Los criterios tienen poca relación

**3=** Los criterios tienen alguna relación

**4=** Los criterios están totalmente relacionados

## Respuestas de los especialistas

---

1. Charles Rogers



**DCB**

2. Jean Paquin



**RSM**

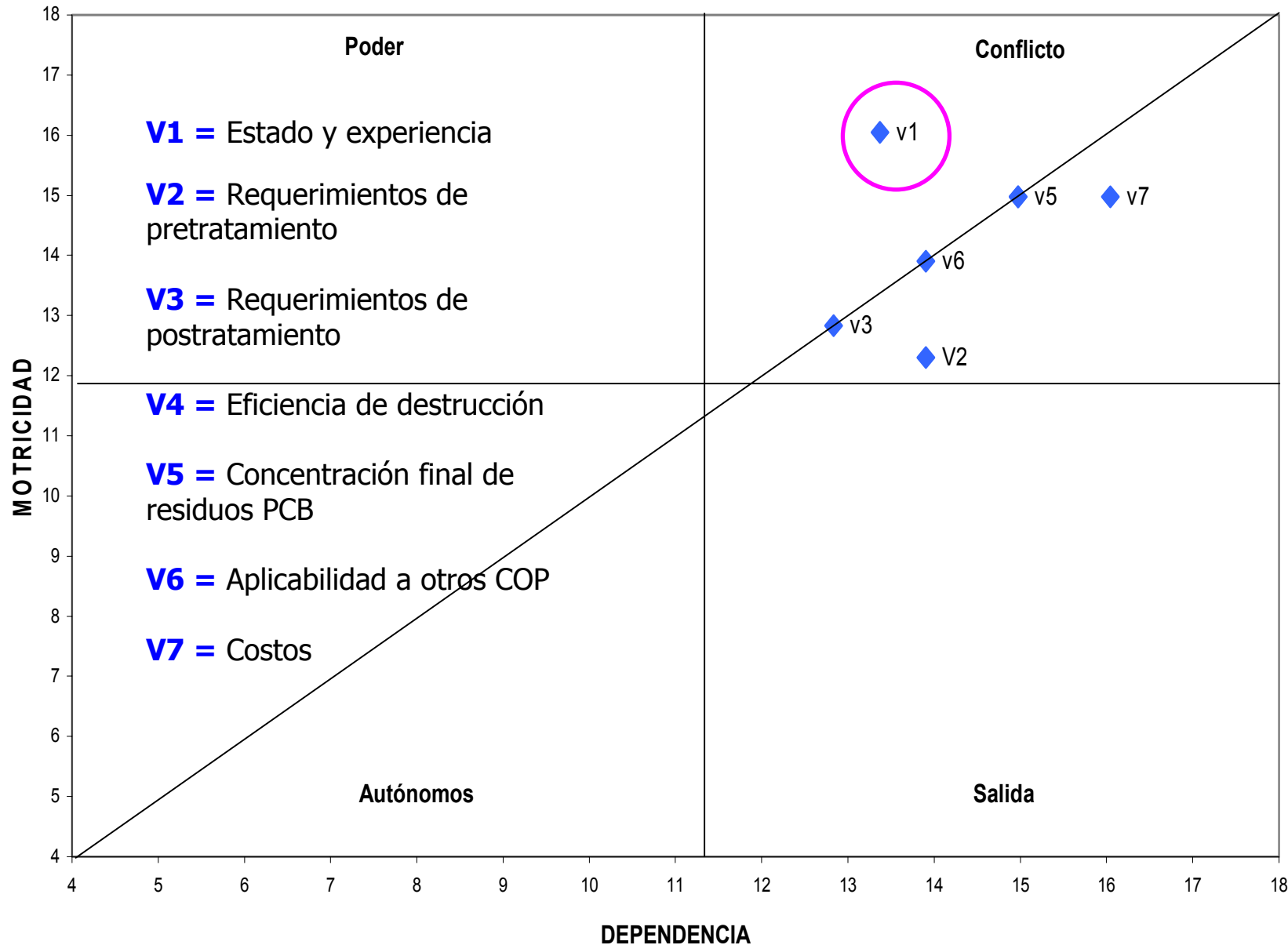
3. José Evelio Amaya



**ISA**

Volver

# CRITERIOS INFLUYENTES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS



[Volver](#)



# Construcción de escenarios

---

- ✿ Se parte de una situación ideal en la que cada escenario se desarrolla en el año 2006

- ✿ Para el análisis de costos todos los valores fueron convertidos al año 2006, en dólares

- ✿ La tasa de descuento utilizada para los cálculos de valor presente fue la tasa LIBOR ya que es la tasa utilizada como referencia internacional

- ✿ El tiempo máximo propuesto de eliminación es de 15 años. De 2010 a 2025

- ✿ Los tiempos de eliminación reales, deberán ser concertados con los sectores poseedores

- ✿ PCB puro y materiales porosos se eliminarán por incineración en el exterior

# ESCENARIO 1

## Exportación de todas las cantidades de PCB que hay en Colombia

Metodología empleada	Fuentes de PCB	Cantidad (t)	TOTAL (t)
Estimación estadística	Probable existencia a nivel nacional de PCB puro en transformadores en <b>desuso</b>	683	1231
	Probable existencia a nivel nacional de PCB puro en transformadores en <b>uso</b>	548	
	Probable existencia a nivel nacional de transformadores contaminados con PCB en <b>desuso</b>	302 a 396	De 10073 a 13199
	Probable existencia a nivel nacional de transformadores contaminados con PCB en <b>uso</b>	9771 a 12803	
Recolección directa, reportes y formularios	Existencias de equipos, aceites y residuos contaminados con PCB	927	927
Levantamiento de registros	PCB importado al país en aceites y equipos	20	20
	Condensadores importados al país antes del año 1985, probablemente con PCB	3863	3863
<b>TOTAL (t)</b>			<b>16.731</b>

12.867 Ton

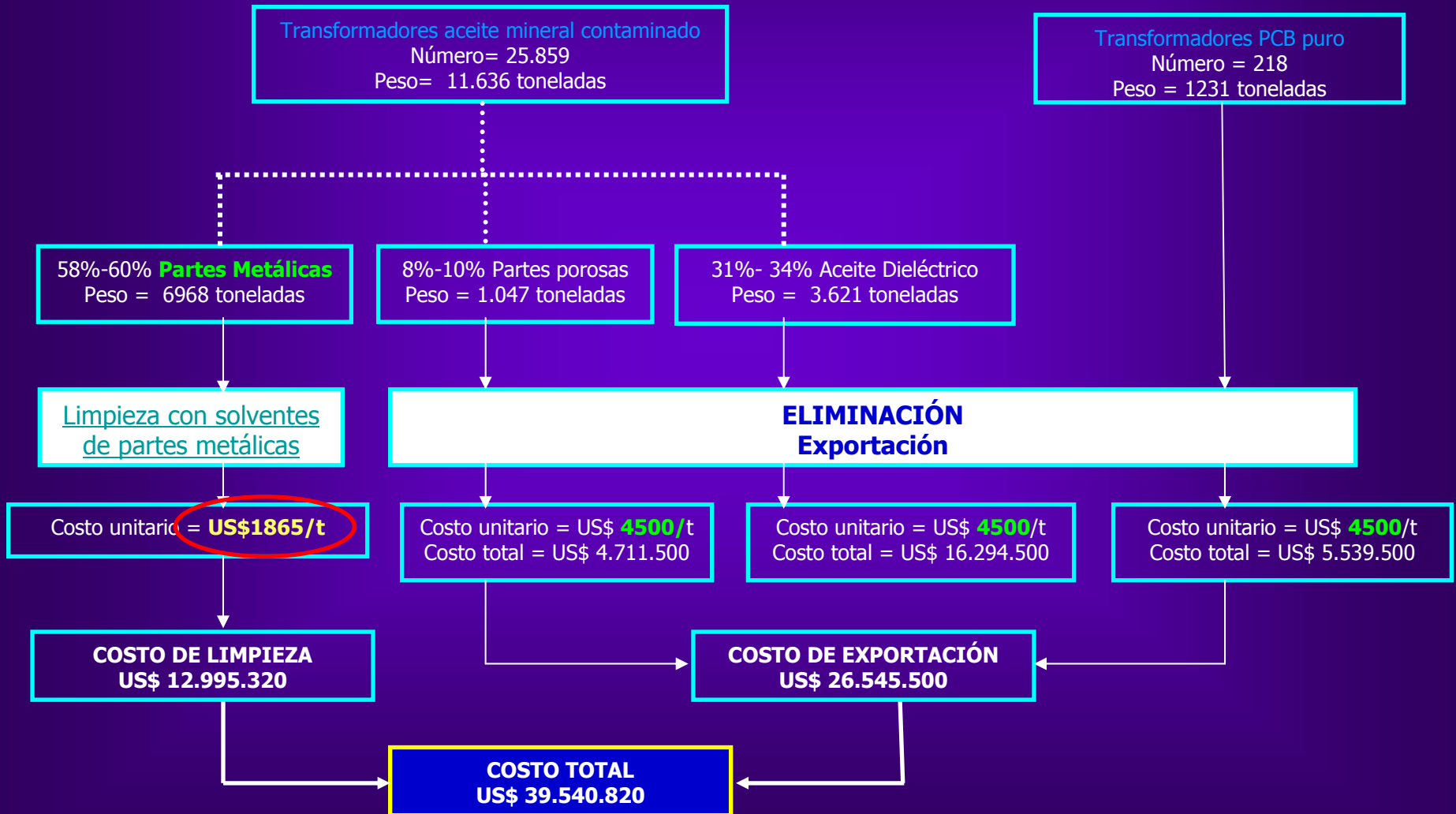
US\$4.500/Ton

**US\$57.901.500**

Volver

# ESCENARIO 2

## Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos



# Hay mercado ?

- Producción de 85.000 toneladas mensuales de acero, que constituyen el 16% del PIB
- La producción nacional de acero abastece sólo el 50% de la demanda nacional
- Costo actual US\$ 152 por tonelada\*\*

\*\* Fuente: DIACO y Acerías paz del río



# ESCENARIO 2

Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos



**Valor agregado del escenario 2**

# Beneficios

---

- **Incorporación de materias primas en nuevos ciclos productivos**
- **Ingresos adicionales**
- **Generación de empleo**
- **Disminución de importaciones**
- **Aprovechamiento de recursos no renovables**
- **Disminución en la generación de residuos**
- **Fortalecimiento del mercado interno**

[Volver](#)

# ESCENARIO 3

Implementación de la RSM para el tratamiento de los líquidos en el país y limpieza con solventes de los equipos. Exportación del PCB puro y de los materiales porosos

Total de aceite mineral contaminado entre 50 y 500 ppm = 3.621 t				
Sector	Aceite mineral contaminado con PCB, rango entre 50 y 500 ppm. Peso aceite (t)	Mezcla de aceite mineral y fluidos PCB, en el rango entre 501 y 1.000 ppm. Peso aceite (t)	Fluidos de PCB, concentraciones superiores a 1.000 ppm. Peso aceite (t)	Aceite sin dato de concentración de PCB, Peso aceite (t)
Eléctrico	50	4	40	77
Manufacturero	3	0.036	53	11
Hidrocarburos	4	5	16	4
<b>SUBTOTAL</b> Inventario Directo	<b>56,5</b>	<b>9,0</b>	<b>109</b>	<b>92</b>
<b>PORCENTAJE</b>	<b>86 %</b>	<b>14 %</b>		
<b>ESTIMACIONES TOTALES (t)</b>	<b>3.114</b>	<b>507</b>		

Volver

# Contextualización

**Situación 1**

Tratamiento

Tiempo : **12 a 15** meses

Tasa : 2700 t/año

**Situación 2**

Pretratamiento

Tiempo : **11 a 15 años**

Tasa mínima: 900 t/año

Tratamiento

Tiempo : **15 años**

Tasa mínima : 208 t/año

**Volver**



# Análisis del sistema



# Eficiencias

---

$$\text{Eficiencia del proceso} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100 = \frac{265,8 \text{ t} - 48,02 \text{ t}}{265,8 \text{ t}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia del proceso} = 82\%$$

$$\text{Eficiencia de recuperación del aceite} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100 = \frac{265,8 \text{ t} - 48,02 \text{ t}}{222 \text{ t}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de recuperación del aceite} = 98\%$$

Volver

# Análisis de costos



Volver

# Capacidad Nacional

---

Marco legal

Política ambiental para la gestión integral de RESPEL en Colombia

Legislación

Residuos Peligrosos  
Vertimientos y calidad de aguas  
Emisiones y calidad de aire  
Permisos ambientales

Infraestructura

“Evaluación de la Capacidad Institucional e Infraestructura Disponible y Evaluación del Marco Regulatorio para la Gestión de COP en Colombia”, elaborado por el CAEMA (Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente)

## Beneficios del escenario 3

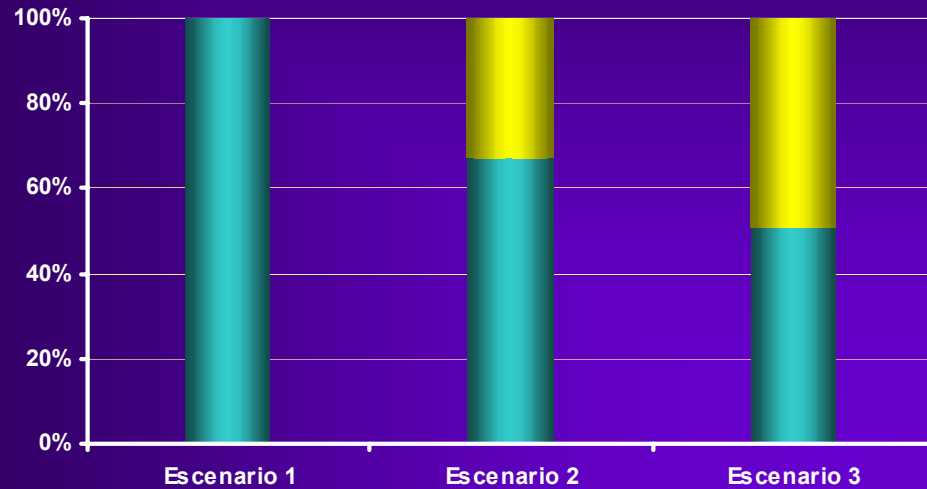


Volver

# Comparación de escenarios

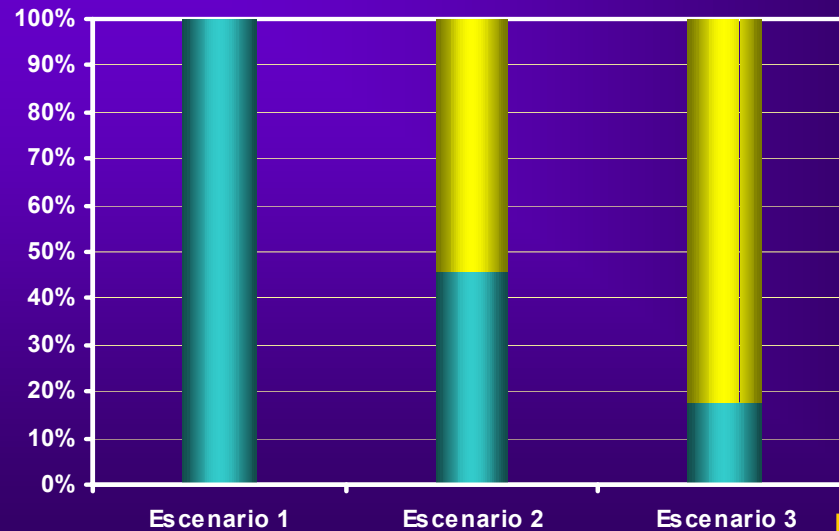


# Comparación de escenarios



Distribución porcentual de las cantidades para los escenarios planteados

■ Tratamiento  
■ Exportación



Volver

# Divulgación y trabajos en Colombia

Divulgación

CASEC, Comité Ambiental del Sector Eléctrico

Universidad de Antioquia

TRADELCA, Transformadores del Caribe

Trabajos

Pruebas de laboratorio con sodio metálico

ISA

Evaluación de tecnologías de decoloración y procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de aceites contaminados

EPM

Volver



# CONCLUSIONES

---

- ◆ Ninguna alternativa cumplió con la totalidad de criterios
- ◆ Una alternativa por sí sola no se considera costo – eficiente
- ◆ Al tomar decisiones se deben tener en cuenta simultáneamente los 7 criterios considerados más importantes por el grupo de expertos.
- ◆ La metodología de análisis estructural se considera válida para la priorización de criterios
- ◆ El estado y la experiencia de la reducción con sodio metálico es el criterio clave que determina su elección como tecnología promisoría

# CONCLUSIONES

---

- ◆ El escenario 3 es un escenario favorable en términos económicos y ambientales para la eliminación de PCB en el país
- ◆ Trabajar por el mejoramiento ambiental, representa ahorros e ingresos económicos adicionales a las empresas.
- ◆ Se debe fortalecer la infraestructura nacional y el marco legal existente
- ◆ Se están desarrollando tecnologías locales para hacer el tratamiento de los aceites minerales contaminados.

# RECOMENDACIONES

---

- ◆ Garantizar un proceso efectivo con el “Plan de Acción para el Manejo de Existencias y Eliminación de los PCB”
- ◆ No deben ser descartadas otras soluciones tecnológicas que están en fase temprana de desarrollo.
- ◆ Los expertos deben conocer las condiciones específicas del país
- ◆ La fase siguiente de esta propuesta debe ser la validación experimental de la información mediante pruebas de laboratorio y pruebas piloto y el trabajo directo con el sector eléctrico
- ◆ Se deben garantizar eficiencias de remoción superiores al 99% ya que de lo contrario las liberaciones de PCB al ambiente, serían significativas y podrían generar efectos sobre la salud y el ambiente

# AGRADECIMIENTOS

---

Orlando Quintero, Pedro Claver Morales,  
Marta Guardiola, Yadira Carrión, Henry  
Dueñas, Juan Cárdenas, Dirección de  
Desarrollo Sectorial Sostenible, Comité  
Ambiental del Sector Eléctrico, Consultoría  
y Dirección de Proyectos,  
Transformadores del Caribe y todos los  
expertos internacionales que estuvieron  
dispuestos a colaborar en la realización de  
este proyecto



**GRACIAS**