

Manual para el Abandono de Pozos de
Petróleo en Colombia

María Cristina Villalba Villamizar
Trabajo de grado para optar por el
título de Especialista en producción de
Hidrocarburos

Monografía

Director

Samuel Fernando Muñoz Navarro
Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Especialización en Producción de Hidrocarburos
Bucaramanga

2026

Tabla de contenido

		Pág.
	Introducción	12
1	Objetivos	14
1.1	Objetivo General	14
1.2	Objetivos Específicos	14
2	Metodología de la investigación	15
3	Capítulo 1 - Contexto técnico, ambiental y regulatorio del abandono de pozos de petróleo en Colombia	17
3.1	Introducción y relevancia del abandono de pozos en la industria petrolera.....	17
3.2	Evolución histórica del abandono de pozos en la industria petrolera	20
3.2.1	Primeras prácticas de abandono de pozos	21
3.2.2	Desarrollo del concepto de integridad de pozo	21
3.2.3	Aparición de estándares internacionales	22
3.3	Tendencias actuales en abandono de pozos	23
3.4	El abandono de pozos dentro del ciclo de vida del campo petrolero	24
3.5	Tipos de abandono de pozos petroleros	27
3.5.1	Abandono temporal	28
3.5.2	Abandono permanente.....	28
3.5.3	Abandono parcial o abandono de secciones del pozo	29
3.5.4	Consideraciones técnicas para la selección del tipo de abandono	30

3.6	Panorama global del abandono de pozos	31
3.7	Situación actual del abandono de pozos en Colombia	33
3.8	Impactos potenciales de un abandono inadecuado de pozos.....	37
3.8.1	Impactos sobre recursos hídricos subterráneos	37
3.8.2	Emisiones de gases de efecto invernadero	38
3.8.3	Generación de pasivos ambientales.....	39
3.8.4	Implicaciones para el contexto colombiano	39
3.9	Necesidad de un manual integrado para el abandono de pozos en Colombia.....	41
3.10	Síntesis del contexto y desafíos del abandono de pozos	45
4	Capítulo 2 - Marco normativo y lineamientos técnicos para el abandono de pozos en Colombia47	
4.1	Introducción al marco normativo y técnico del abandono de pozos	47
4.2	Normatividad técnica nacional y definición de abandono de pozos	49
4.3	Normatividad ambiental aplicable al abandono de pozos.....	52
4.4	Responsabilidades legales e institucionales en el abandono de pozos.....	55
4.5	Matriz de cumplimiento técnico, ambiental y legal para el abandono de pozos.....	58
4.6	Análisis de la matriz de cumplimiento	61
5	Capítulo 3 - Técnicas, riesgos y criterios operacionales para el abandono de pozos62	
5.1	Introducción al abandono desde la perspectiva operativa.....	62
5.2	Principios de integridad de pozo aplicados al abandono.....	64

5.2.1	Concepto de barreras de aislamiento.....	65
5.2.2	Filosofía de barreras múltiples	65
5.2.3	Aislamiento zonal y control de migración de fluidos	66
5.2.4	Factores que afectan la integridad de las barreras.....	67
5.2.5	Integridad de pozo como criterio de diseño en abandono	67
5.3	Técnicas y métodos de abandono de pozos.....	68
5.3.1	Clasificación técnica de los métodos de abandono	68
5.3.2	Técnicas de cementación para abandono	69
5.3.3	Uso de barreras mecánicas en abandono.....	70
5.3.4	Tecnologías emergentes en abandono de pozos.....	71
5.3.5	Verificación de la efectividad de las barreras	71
5.4	Procedimiento operativo de abandono de pozos	72
5.4.1	Preparación del pozo	73
5.4.2	Ejecución de las operaciones de abandono	74
5.4.3	Verificación de las barreras y cierre del pozo	75
5.4.4	Desmantelamiento y restauración de superficie.....	76
5.5	Riesgos operacionales en el abandono de pozos.....	77
5.5.1	Clasificación de los riesgos operacionales	77
5.5.2	Pérdida de control del pozo durante el abandono	78
5.5.3	Fallas en la colocación de barreras de aislamiento	79
5.5.4	Incertidumbre en las condiciones del pozo	80
5.5.5	Riesgos asociados a la intervención en pozos con problemas de integridad	80

5.6	Riesgos asociados a fallas en la integridad del pozo.....	81
5.6.1	Mecanismos de falla en la integridad del pozo	82
5.6.2	Rutas de migración de fluidos.....	83
5.6.3	Migración de gas y su impacto.....	83
5.6.4	Fallas a largo plazo en pozos abandonados.....	84
5.6.5	Implicaciones para el diseño del abandono.....	84
5.7	Caso de estudio: Evento de pérdida de integridad del pozo Lizama 158.....	85
5.7.1	Caracterización técnica del evento.....	86
5.7.2	Mecanismos de falla asociados	86
5.7.3	Impactos asociados al evento	87
5.7.4	Relación con las fallas de integridad en abandono de pozos	88
5.7.5	Lecciones aprendidas para la gestión del abandono de pozos	88
5.8	Gestión del riesgo en operaciones de abandono de pozos	89
5.8.1	Identificación y evaluación de riesgos	89
5.8.2	Estrategias de mitigación y control	90
5.8.3	Gestión del riesgo a largo plazo	90
5.8.4	Integración de la gestión del riesgo en el proceso de abandono	91
6	Capítulo 4 - Manual integrado para el abandono de pozos de petróleo en Colombia	92
6.1	Introducción al manual.....	92
6.2	Sustentación metodológica y trazabilidad de la construcción del manual	93
6.3	Marco de aplicación del manual.....	94
6.4	Criterios técnicos para el abandono de pozos	95

6.5	Procedimiento técnico de abandono de pozos.....	96
6.5.1	Estructura general del procedimiento.....	96
6.5.2	Etapa 1. Planeación y diagnóstico del pozo	96
6.5.3	Etapa 2. Preparación del pozo	97
6.5.4	Etapa 3. Ejecución de las barreras de abandono	97
6.5.5	Etapa 4. Verificación de integridad.....	98
6.5.6	Etapa 5. Cierre superficial y post-abandono	98
6.6	Criterios ambientales para el abandono de pozos	100
6.7	Cumplimiento normativo y legal.....	101
6.8	Gestión del riesgo aplicada al abandono	101
6.9	Herramientas operativas del manual	102
6.9.1	Checklist de planeación del abandono	102
6.9.2	Checklist de ejecución en campo	103
6.9.3	Checklist de verificación y cierre del pozo	104
6.9.4	Formato mínimo de registro del abandono	105
6.9.5	Criterio de decisión para aprobación del abandono	106
6.10	Recomendaciones para implementación y actualización del manual	108
7	Conclusiones	109
8	Recomendaciones.....	112
	Referencias bibliográficas	114

Tabla de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ciclo de la vida de un pozo petrolero</i>	26
Figura 2. <i>Esquema de instalación de tapones de cemento en un pozo</i>	70
Figura 3. <i>Ejemplo de registro de cementación (CBL) y evaluación de aislamiento zonal</i>	72
Figura 4. <i>Secuencia operativa de instalación de barreras de abandono</i>	75
Figura 5. <i>Proceso de restauración ambiental posterior al abandono de pozos</i>	76
Figura 6. <i>Esquema conceptual de pérdida de control de pozo durante operaciones de abandono</i>	79
Figura 7. <i>Esquema conceptual de los posibles mecanismos de falla en el pozo Lizama 158</i>	87
Figura 8. <i>Flujo general del procedimiento técnico de abandono de pozos</i>	100
Figura 9. <i>Diagrama general del flujo de trabajo del manual</i>	107
Figura 10. <i>Mapa de procesos del manual de abandono de pozos</i>	107

Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Evolución de las prácticas de abandono de pozos</i>	23
Tabla 2. <i>Estados operativos de los pozos durante el ciclo de vida del campo</i>	26
Tabla 3. <i>Clasificación de los tipos de abandono de pozos</i>	31
Tabla 4. <i>Desafíos actuales en la gestión del abandono de pozos en Colombia</i>	36
Tabla 5. <i>Principales impactos asociados a un abandono inadecuado de pozos</i>	40
Tabla 6. <i>Beneficios esperados de la implementación de un manual técnico de abandono de pozos</i>	44
Tabla 7. <i>Síntesis del contexto del abandono de pozos y principales desafíos para su gestión</i>	46
Tabla 8. <i>Normatividad técnica aplicable al abandono de pozos en Colombia</i>	52
Tabla 9. <i>Normatividad ambiental relevante para el abandono de pozos</i>	54
Tabla 10. <i>Responsabilidades por fase del abandono de pozos en Colombia</i>	58
Tabla 11. <i>Matriz de cumplimiento para el abandono de pozos en Colombia</i>	59
Tabla 12. <i>Principales riesgos operacionales en el abandono de pozos</i>	81
Tabla 13. <i>Modos de falla en la integridad del pozo y sus consecuencias</i>	85
Tabla 14. <i>Matriz de gestión del riesgo en abandono de pozos</i>	91
Tabla 15. <i>Resumen del procedimiento técnico de abandono de pozos</i>	99
Tabla 16. <i>Matriz simplificada de control de riesgos durante el abandono</i>	102
Tabla 17. <i>Checklist de planeación del abandono</i>	103
Tabla 18. <i>Checklist de ejecución del abandono en campo</i>	104
Tabla 19. <i>Checklist de verificación y cierre</i>	105

Tabla 20. *Formato mínimo de registro técnico del abandono*105

Tabla 21. *Criterio de decisión para aceptación técnica del abandono*106

Resumen

Título: Manual para el Abandono de Pozos de Petróleo en Colombia*

Autor: María Cristina Villalba Villamizar**

Palabras clave: Abandono de pozos; Integridad de pozo; Barreras múltiples; Aislamiento zonal; Impacto ambiental; Gestión del riesgo; Colombia.

Descripción:

El abandono de pozos petroleros constituye una etapa crítica dentro del ciclo de vida de los campos de hidrocarburos, debido a su impacto sobre la integridad del subsuelo, la gestión de riesgos operacionales y la protección ambiental.

En Colombia, esta problemática adquiere especial relevancia por la diversidad de condiciones geológicas, la variabilidad en el estado de los pozos y la existencia de pasivos ambientales asociados a prácticas inadecuadas. Casos como el del pozo Lizama evidencian la necesidad de fortalecer los procesos de planeación, ejecución y verificación del abandono.

La presente monografía analiza el abandono de pozos desde una perspectiva técnica, ambiental y normativa, con énfasis en su aplicación en Colombia, a partir de la revisión de literatura especializada, estándares internacionales y normativa vigente. Como aporte principal, se propone un manual integrado estructurado en etapas secuenciales que incluyen planeación, preparación, ejecución, verificación y cierre, incorporando criterios técnicos y herramientas operativas para su aplicación en campo.

Se concluye que el abandono debe abordarse como un proceso estratégico, donde la integración de criterios técnicos, ambientales y regulatorios resulta fundamental para garantizar la seguridad operativa y la sostenibilidad de la industria.

*Manual para el abandono de pozos de petróleo en Colombia.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas Escuela de Ingeniería de petróleos. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Abstract

Title: Manual for the Abandonment of Oil Wells in Colombia*

Author: María Cristina Villalba Villamizar**

Keywords: Well abandonment; Well integrity; Multiple barriers; Zonal isolation; Environmental impact; Risk management; Colombia.

Description:

Well abandonment is a critical stage in the life cycle of oil and gas fields, due to its impact on subsurface integrity, operational risk management, and environmental protection.

In Colombia, this issue is particularly relevant due to diverse geological conditions, variability in well status, and the presence of environmental liabilities associated with inadequate practices. Incidents such as the Lizama well highlight the need to strengthen planning, execution, and verification processes.

This monograph analyzes well abandonment from a technical, environmental, and regulatory perspective, with emphasis on Colombia, based on a review of specialized literature, international standards, and applicable regulations. As a main contribution, an integrated manual is proposed, structured in sequential stages including planning, preparation, execution, verification, and closure, incorporating technical criteria and operational tools for field application.

It is concluded that well abandonment should be addressed as a strategic process, where the integration of technical, environmental, and regulatory criteria is essential to ensure operational safety and industry sustainability.

*Manual for the Abandonment of Oil Wells in Colombia.

**Faculty of Physicochemical Engineering, School of Petroleum Engineering. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro, Master in Hydrocarbon Engineering.

Introducción

El abandono definitivo de pozos petroleros constituye una de las fases más críticas dentro del ciclo de vida de la industria de hidrocarburos, debido a las implicaciones técnicas, ambientales y regulatorias que conlleva. Una ejecución inadecuada de este proceso puede generar riesgos significativos, como la migración de fluidos, la contaminación de acuíferos y la generación de pasivos ambientales que comprometen la sostenibilidad del entorno y la seguridad a largo plazo. En el contexto colombiano, estos desafíos se ven acentuados por la necesidad de articular de manera efectiva la normativa vigente con las mejores prácticas de ingeniería.

Actualmente, la industria enfrenta dificultades derivadas de la dispersión de lineamientos técnicos y regulatorios, así como de la limitada estandarización en los procedimientos de cierre de pozos. Esta situación obliga a los actores del sector a interpretar múltiples fuentes normativas, lo que puede generar inconsistencias en la aplicación de criterios y afectar la eficiencia operativa. En este sentido, se hace evidente la necesidad de contar con una herramienta que integre, organice y facilite el acceso a la información relevante para la correcta ejecución de estas actividades.

El presente documento surge como respuesta a esta problemática, proponiendo la elaboración de un manual técnico y normativo que consolide el conocimiento existente y establezca una guía clara para el abandono de pozos en Colombia. A través de la recopilación de la normativa nacional, los estándares internacionales y las mejores prácticas de la industria, se busca proporcionar un instrumento de consulta que apoye la toma de decisiones informadas, promueva el cumplimiento regulatorio y contribuya a la reducción de riesgos ambientales.

De esta manera, el manual no solo cumple una función informativa, sino que se proyecta como una herramienta de gestión preventiva orientada a fortalecer la seguridad, la eficiencia y la

sostenibilidad en las operaciones de cierre de pozos, en beneficio tanto del sector hidrocarburífero como del medio ambiente y la sociedad.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Elaborar un Manual para el Abandono de Pozos de Petróleo en Colombia que integre los requerimientos técnicos, ambientales y legales vigentes, con el fin de garantizar el cierre seguro y definitivo de las operaciones.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la normatividad técnica, ambiental y legal vigente para el proceso de abandono de pozos productores de hidrocarburos en Colombia, y definir los parámetros de cumplimiento.
- Definir las principales técnicas y métodos de abandono de pozos, incluyendo áreas de aplicación y requerimientos operativos.
- Identificar los principales riesgos ambientales y operacionales asociados a un abandono inadecuado de pozos petroleros.
- Elaborar un manual basado en los estándares técnicos, ambientales y legales vigentes para el abandono de pozos en Colombia.

2 Metodología de la investigación

La presente monografía se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, de tipo documental, con un alcance descriptivo y propositivo, orientado al análisis e integración de información técnica, ambiental y normativa relacionada con el abandono de pozos de petróleo en Colombia. Este enfoque permitió comprender la problemática desde una perspectiva amplia, no solo en términos operativos, sino también desde sus implicaciones regulatorias y ambientales, reconociendo que el cierre de pozos constituye una fase crítica dentro del ciclo de vida de la actividad hidrocarburífera. En este sentido, la investigación se fundamentó en la revisión, organización e interpretación de fuentes secundarias especializadas, con el propósito de construir una propuesta técnicamente sustentada y pertinente para el contexto nacional.

El carácter documental del estudio se sustentó en la consulta de literatura técnica, estándares internacionales, normativa vigente, lineamientos institucionales e informes relacionados con la integridad de pozo, la gestión del riesgo, la protección ambiental y las operaciones de abandono. A partir de esta revisión, se identificaron los principales criterios conceptuales y operativos que orientan el cierre seguro de pozos, así como las exigencias regulatorias aplicables en Colombia. Más que limitarse a la recopilación de información, el proceso investigativo buscó establecer relaciones entre los distintos componentes analizados, contrastar enfoques y reconocer vacíos o necesidades de articulación que justificaran la construcción de una herramienta integrada.

Metodológicamente, el desarrollo de la monografía partió de la delimitación del problema y de la formulación de los objetivos de investigación; posteriormente, se llevó a cabo la búsqueda, selección y análisis de las fuentes consideradas pertinentes por su relevancia técnica, académica y normativa. Una vez revisada la información, esta fue organizada en función de ejes de análisis relacionados con el contexto del abandono de pozos, el marco normativo, los criterios técnicos de

integridad, los riesgos operacionales y ambientales, y las necesidades de estandarización de procedimientos. Este ejercicio permitió estructurar una lectura crítica del problema y, al mismo tiempo, sentó las bases para traducir el conocimiento revisado en una propuesta aplicada.

En correspondencia con lo anterior, la elaboración del manual propuesto se desarrolló mediante un proceso de integración progresiva de los hallazgos obtenidos durante la revisión documental. Para ello, se tomaron como base los resultados del análisis del contexto técnico, ambiental y regulatorio del abandono de pozos en Colombia, la identificación de los lineamientos normativos aplicables y el estudio de las técnicas, riesgos y criterios operacionales asociados a este tipo de intervenciones. A partir de esta articulación, se definieron los componentes esenciales del manual y se estructuró una secuencia operativa compuesta por etapas de planeación, preparación, ejecución, verificación y cierre, con el fin de ofrecer una guía clara y coherente para el abandono de pozos en Colombia. De igual manera, se incorporaron herramientas de apoyo como matrices de cumplimiento, criterios de decisión, listas de verificación y formatos mínimos de registro, con el propósito de fortalecer la trazabilidad del proceso y facilitar su aplicación práctica.

En este sentido, la construcción del manual no se asumió como una simple recopilación de recomendaciones, sino como el resultado de un proceso de síntesis, organización y aplicación del conocimiento revisado a lo largo de la investigación. Su formulación respondió a la necesidad de integrar, en una sola propuesta, los elementos técnicos, ambientales y regulatorios que intervienen en el abandono de pozos, de manera que el producto final mantuviera coherencia con el problema identificado, con los objetivos formulados y con el desarrollo analítico de la monografía.

Finalmente, la validez de la propuesta se sustentó mediante un criterio de consistencia técnico-documental, a partir de la relación entre la información analizada, los hallazgos obtenidos y la estructura del manual formulado. Bajo este criterio, se verificó que cada uno de sus

componentes respondiera de manera coherente a las necesidades identificadas en torno al abandono de pozos en Colombia y que su organización guardara correspondencia con los principios de integridad de pozo, gestión del riesgo, cumplimiento regulatorio y protección ambiental desarrollados en los capítulos precedentes. En consecuencia, la presente monografía no se limita a exponer una revisión bibliográfica sobre el abandono de pozos, sino que propone una síntesis crítica y aplicada del conocimiento disponible, manteniendo en todo momento el carácter académico propio de la investigación monográfica y su intención de aportar una herramienta útil para el contexto colombiano.

3 Capítulo 1 - Contexto técnico, ambiental y regulatorio del abandono de pozos de petróleo en Colombia

3.1 Introducción y relevancia del abandono de pozos en la industria petrolera

La industria de los hidrocarburos se caracteriza por desarrollar operaciones complejas a lo largo de todo el ciclo de vida de los campos petroleros, el cual comprende etapas como exploración, perforación, completamiento, producción, mantenimiento e intervención de pozos. Sin embargo, una de las fases más críticas dentro de este ciclo corresponde al abandono de pozos, proceso mediante el cual se realiza el cierre definitivo de la infraestructura petrolera una vez que el pozo ha alcanzado el final de su vida productiva o cuando las condiciones técnicas y económicas no justifican su operación (Khalifeh & Saasen, 2020).

El abandono de pozos constituye una actividad de alta importancia técnica, ambiental y regulatoria, ya que su objetivo principal es garantizar el aislamiento permanente de las formaciones geológicas atravesadas por el pozo y evitar la migración de fluidos hacia otras formaciones o hacia la superficie. Este aislamiento se logra mediante la instalación de barreras mecánicas y

cementaciones diseñadas para mantener la integridad del pozo a largo plazo, incluso después de que las operaciones petroleras han cesado completamente (American Petroleum Institute, 2018).

En el contexto actual de la industria energética, el abandono de pozos ha adquirido una relevancia creciente debido al envejecimiento de numerosos campos petroleros alrededor del mundo. A medida que los yacimientos alcanzan su límite económico de producción, aumenta la cantidad de pozos que deben ser cerrados de manera permanente. Este fenómeno ha generado un incremento significativo en las actividades de plugging and abandonment (P&A), convirtiéndose en uno de los principales desafíos técnicos y ambientales del sector petrolero (Davies et al., 2014).

Uno de los aspectos más críticos asociados al abandono de pozos es su impacto ambiental potencial. Cuando las operaciones de cierre no se realizan adecuadamente, existe el riesgo de que los hidrocarburos, el gas natural o las aguas de formación migren a través de las estructuras del pozo hacia acuíferos subterráneos o hacia la superficie. Esta migración puede provocar contaminación de suelos y cuerpos de agua, emisiones de gases de efecto invernadero y afectaciones directas a los ecosistemas circundantes (Davies et al., 2014).

Entre los riesgos ambientales más relevantes asociados a un abandono inadecuado se encuentra la emisión de metano, un gas con un potencial de calentamiento global considerablemente mayor que el dióxido de carbono. Diversos estudios han demostrado que los pozos abandonados pueden convertirse en fuentes persistentes de emisiones fugitivas cuando presentan fallas en sus barreras de aislamiento, contribuyendo de manera significativa al cambio climático global (Dahmani & Hynes, 2017). Asimismo, la contaminación de acuíferos representa una amenaza directa para la disponibilidad de agua potable y para la salud de las comunidades cercanas a las áreas de explotación petrolera.

Adicionalmente, el abandono de pozos también implica una serie de impactos ambientales asociados al desmantelamiento de las instalaciones de superficie, tales como líneas de flujo, tanques de almacenamiento, sistemas eléctricos, estructuras civiles y vías de acceso. Estas actividades generan residuos sólidos, líquidos y peligrosos que deben ser manejados y dispuestos de acuerdo con la normatividad ambiental vigente, con el fin de prevenir la degradación de los ecosistemas y garantizar la restauración del área intervenida.

En el caso colombiano, esta problemática adquiere especial relevancia debido al creciente número de pozos que han alcanzado el final de su vida productiva. Se estima que en el país existen miles de pozos petroleros abandonados o inactivos cuyo estado de sellado e integridad estructural es incierto, lo que representa un desafío importante para las autoridades regulatorias y para las empresas operadoras del sector. La existencia de estos pozos constituye un potencial pasivo ambiental, ya que las fallas en los procesos de abandono pueden generar riesgos de contaminación y requerir costosas actividades de remediación.

Ante esta situación, las agencias regulatorias y organismos internacionales han desarrollado una serie de estándares técnicos orientados a garantizar el cierre seguro y permanente de los pozos petroleros. Entre estos destacan los lineamientos establecidos por el American Petroleum Institute (API) y las normas internacionales relacionadas con la integridad de pozos, las cuales establecen criterios para el diseño de barreras de aislamiento, selección de materiales de cementación, verificación de integridad y monitoreo posterior al abandono (American Petroleum Institute, 2018).

En Colombia, el proceso de abandono de pozos se encuentra regulado por diversas disposiciones emitidas principalmente por el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y las autoridades ambientales competentes, las cuales establecen los

requisitos técnicos, ambientales y administrativos que deben cumplirse durante el cierre de las operaciones petroleras.

No obstante, a pesar de la existencia de estos lineamientos, en muchas organizaciones del sector petrolero se evidencia la ausencia de documentos técnicos integrados que sistematicen las mejores prácticas de abandono de pozos y faciliten su aplicación operativa. Esta situación puede generar inconsistencias en la interpretación de la normativa, dificultades en la planificación de las actividades de cierre y riesgos asociados a la integridad a largo plazo de los pozos abandonados.

En este contexto, la elaboración de un manual técnico para el abandono de pozos de petróleo en Colombia representa una herramienta fundamental para fortalecer la gestión operativa, ambiental y regulatoria de estas actividades. Un documento de este tipo permite consolidar la normativa vigente, las mejores prácticas de ingeniería y los procedimientos operativos recomendados por la industria, proporcionando una guía clara para la planificación y ejecución segura del cierre de pozos.

De esta manera, el desarrollo de un manual especializado no solo contribuye a mejorar la eficiencia técnica de las operaciones de abandono, sino que también desempeña un papel clave en la reducción de riesgos ambientales, la prevención de pasivos ambientales a largo plazo y la promoción de prácticas sostenibles dentro de la industria de los hidrocarburos.

3.2 Evolución histórica del abandono de pozos en la industria petrolera

El abandono de pozos petroleros ha experimentado una evolución significativa desde los inicios de la industria del petróleo en el siglo XIX. En las primeras etapas del desarrollo de la industria, el cierre de pozos no era considerado una fase crítica del ciclo de vida de los campos petroleros, debido principalmente a la limitada comprensión de los riesgos ambientales asociados y a la inexistencia de marcos regulatorios específicos que establecieran procedimientos técnicos

para su ejecución (Khalifeh & Saasen, 2020). Con el paso del tiempo, el avance del conocimiento geológico, el desarrollo de nuevas tecnologías de cementación y el fortalecimiento de la regulación ambiental han transformado el abandono de pozos en una actividad altamente especializada dentro de la ingeniería de petróleo.

3.2.1 Primeras prácticas de abandono de pozos

Durante las primeras décadas de la industria petrolera, particularmente entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, las prácticas de abandono eran rudimentarias y carecían de procedimientos técnicos estandarizados. En muchos casos, los pozos que dejaban de ser productivos simplemente eran sellados de manera superficial utilizando materiales disponibles en campo o incluso eran abandonados sin ningún tipo de intervención técnica. Estas prácticas se debían en gran medida a la ausencia de conocimiento sobre los riesgos asociados a la migración de fluidos en el subsuelo y a la falta de regulaciones específicas que obligaran a los operadores a realizar procesos de cierre adecuados (Davies et al., 2014).

Con el paso del tiempo, se evidenció que estas prácticas podían generar problemas significativos de contaminación ambiental, incluyendo migración de gas hacia la superficie, contaminación de acuíferos subterráneos y filtraciones de hidrocarburos hacia formaciones geológicas adyacentes. Diversos estudios han documentado que muchos pozos perforados durante las primeras etapas de la industria presentan actualmente problemas de integridad debido a la ausencia de barreras adecuadas de aislamiento (Davies et al., 2014).

3.2.2 Desarrollo del concepto de integridad de pozo

Uno de los avances más importantes en la evolución del abandono de pozos fue el desarrollo del concepto de integridad de pozo (well integrity). Este concepto se refiere a la capacidad de un

pozo para contener fluidos dentro de las formaciones geológicas y evitar su migración hacia otras zonas durante todas las etapas de su vida útil, incluyendo la fase de abandono (American Petroleum Institute, 2018).

La noción de integridad de pozo comenzó a consolidarse durante la segunda mitad del siglo XX, cuando la industria petrolera empezó a reconocer que la seguridad de los pozos dependía no solo de las operaciones de producción, sino también de la calidad de las barreras instaladas durante la perforación, completamiento y cierre del pozo. En este contexto, el abandono dejó de considerarse únicamente como una actividad operativa y pasó a entenderse como un proceso de gestión de riesgos a largo plazo, cuyo objetivo principal es garantizar que las barreras instaladas mantengan su capacidad de aislamiento durante largos periodos de tiempo (Khalifeh & Saasen, 2020).

El concepto de barreras múltiples de seguridad se convirtió en uno de los principios fundamentales del abandono de pozos. Este enfoque establece que deben existir varias barreras independientes —como tapones de cemento, barreras mecánicas y el cemento del anular— que impidan la migración de fluidos entre formaciones o hacia la superficie (American Petroleum Institute, 2018).

3.2.3 Aparición de estándares internacionales

El crecimiento de la industria petrolera y la necesidad de establecer criterios técnicos uniformes condujeron al desarrollo de estándares internacionales orientados a regular las actividades de perforación, completamiento y abandono de pozos. Entre los organismos más influyentes en este proceso se encuentra el American Petroleum Institute (API), que ha desarrollado diversas prácticas recomendadas relacionadas con la cementación, integridad y abandono de pozos (American Petroleum Institute, 2018).

De manera complementaria, organizaciones internacionales como la International Organization for Standardization (ISO) han desarrollado normas relacionadas con la gestión de integridad de pozos, estableciendo requisitos para el monitoreo, mantenimiento y abandono seguro de las infraestructuras petroleras. Estas normas han contribuido a la adopción de prácticas más seguras y ambientalmente responsables en la industria petrolera a nivel global (Khalifeh & Saasen, 2020).

En la tabla 1, se puede evidenciar la evolución de los pozos petroleros, esta se presenta a continuación.

Tabla 1. *Evolución de las prácticas de abandono de pozos*

Periodo	Características principales
Siglo XIX – inicio del siglo XX	Abandono sin regulación ni procedimientos técnicos definidos
Mediados del siglo XX	Introducción de técnicas de cementación para sellado
Finales del siglo XX	Desarrollo del concepto de integridad de pozo
Siglo XXI	Implementación de estándares internacionales y mayor regulación ambiental

Nota. Elaboración propia.

3.3 Tendencias actuales en abandono de pozos

En las últimas décadas, el abandono de pozos se ha convertido en una de las áreas de mayor desarrollo dentro de la ingeniería de petróleo, impulsada principalmente por el envejecimiento de los campos petroleros, el fortalecimiento de las regulaciones ambientales y la creciente

preocupación por las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a pozos abandonados (Davies et al., 2014).

La identificación de emisiones de metano provenientes de pozos abandonados ha generado un mayor interés en mejorar las técnicas de sellado y monitoreo a largo plazo, ya que estos pozos pueden convertirse en fuentes persistentes de emisiones fugitivas si presentan fallas en sus barreras de aislamiento (Dahmani & Hynes, 2017). En respuesta a estos desafíos, la industria petrolera ha desarrollado nuevas tecnologías de cementación, sistemas de monitoreo y metodologías de evaluación de integridad orientadas a garantizar el cierre seguro y permanente de los pozos.

En la actualidad, el abandono de pozos es considerado una actividad estratégica dentro de la gestión de activos petroleros, ya que su correcta ejecución permite minimizar los pasivos ambientales, garantizar la seguridad de las operaciones y cumplir con los requisitos regulatorios establecidos por las autoridades competentes (Khalifeh & Saasen, 2020).

3.4 El abandono de pozos dentro del ciclo de vida del campo petrolero

La explotación de hidrocarburos se desarrolla a través de una serie de etapas que conforman el ciclo de vida de los campos petroleros. Estas etapas abarcan desde la identificación de recursos en el subsuelo hasta el cierre definitivo de las infraestructuras utilizadas para su extracción. En este proceso, los pozos constituyen el principal medio de acceso a los yacimientos, por lo que su gestión a lo largo de todo el ciclo operativo resulta fundamental para garantizar la seguridad de las operaciones y la sostenibilidad de los proyectos petroleros (Economides, Hill, & Ehlig-Economides, 2013).

De manera general, el ciclo de vida de un pozo petrolero comprende las fases de exploración, perforación, completamiento, producción, intervención y abandono. Cada una de estas etapas implica actividades técnicas específicas orientadas a evaluar el potencial del yacimiento,

desarrollar la infraestructura necesaria para su explotación y optimizar la recuperación de hidrocarburos durante la vida productiva del campo (Ahmed, 2010).

La fase de exploración incluye estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos destinados a identificar estructuras con potencial para albergar hidrocarburos. Cuando estos estudios indican la posible presencia de petróleo o gas, se procede a la perforación de pozos exploratorios que permiten confirmar la existencia del recurso y evaluar sus características productivas (Ahmed, 2010).

Posteriormente, durante la etapa de perforación, se construye el pozo mediante la instalación de revestimientos y la cementación de los espacios anulares. Estos elementos estructurales cumplen la función de aislar las diferentes formaciones geológicas atravesadas por el pozo, prevenir la migración de fluidos y proporcionar estabilidad mecánica a la infraestructura (American Petroleum Institute, 2018).

Una vez completada la perforación, se lleva a cabo la fase de completamiento del pozo, en la cual se instalan los equipos necesarios para controlar el flujo de hidrocarburos desde el yacimiento hacia la superficie. Durante esta etapa se incorporan sistemas de producción, válvulas de control y equipos de levantamiento artificial que permiten optimizar la extracción de hidrocarburos (Economides et al., 2013).

La etapa de producción corresponde al periodo durante el cual el pozo se encuentra en operación y se extraen hidrocarburos de manera continua. Durante esta fase, las empresas operadoras realizan diversas actividades de monitoreo y mantenimiento destinadas a mantener la eficiencia del sistema productivo y prolongar la vida útil del pozo.

A lo largo de la vida productiva del pozo pueden ser necesarias diversas intervenciones o operaciones de reacondicionamiento, conocidas como *workovers*. Estas intervenciones tienen como objetivo restaurar la productividad del pozo, reparar fallas en los equipos o implementar

estrategias de optimización de la producción (Ahmed, 2010). Esto se puede evidenciar en la ilustración 1, presentada a continuación.

Figura 1. *Ciclo de la vida de un pozo petrolero*



Nota. Adaptado de Economides, M. J., Hill, A. D., & Ehlig-Economides, C. (2013).

Finalmente, cuando el pozo deja de ser económicamente viable o cuando existen razones técnicas que impiden su operación segura, se procede a la fase de abandono, que constituye la última etapa del ciclo de vida del pozo. En esta etapa se ejecutan operaciones destinadas a retirar los equipos de producción y sellar la infraestructura para evitar que el pozo represente riesgos futuros para el entorno o para otras operaciones en el área (Khalifeh & Saasen, 2020).

En la tabla 2, se puede evidenciar los estados por los que pasa el pozo.

Tabla 2. *Estados operativos de los pozos durante el ciclo de vida del campo*

Estado del pozo	Descripción
Pozo exploratorio	Perforado para confirmar la presencia de hidrocarburos
Pozo productor	Produce petróleo o gas desde el yacimiento

Pozo inyector	Utilizado para inyección de fluidos con fines de recobro
Pozo suspendido	Temporalmente fuera de operación con posibilidad de reactivación
Pozo abandonado	Cerrado permanentemente mediante barreras de aislamiento

Nota. Elaboración propia.

Una vez comprendido el papel que desempeña el abandono dentro del ciclo de vida de los pozos petroleros, resulta necesario analizar las diferentes modalidades mediante las cuales puede ejecutarse este proceso. En la práctica de la ingeniería petrolera, el abandono de pozos puede adoptar diversas formas dependiendo del estado operativo del pozo, las condiciones del yacimiento y las decisiones estratégicas del operador.

3.5 Tipos de abandono de pozos petroleros

El abandono de pozos petroleros puede clasificarse de acuerdo con el estado operativo del pozo, las condiciones del yacimiento y las decisiones estratégicas del operador respecto al futuro uso de la infraestructura. En términos generales, la literatura técnica y los estándares de la industria distinguen principalmente entre abandono temporal y abandono permanente, aunque en algunos casos también se consideran variantes asociadas al abandono parcial o al abandono de secciones específicas del pozo (Khalifeh & Saasen, 2020; American Petroleum Institute, 2018).

Esta clasificación es relevante desde el punto de vista técnico y regulatorio, ya que cada tipo de abandono implica diferentes requisitos de ingeniería, sistemas de barreras de aislamiento y procedimientos de verificación de integridad. Además, el tipo de abandono determina el grado de reversibilidad de la intervención y las responsabilidades futuras del operador respecto al monitoreo del pozo.

3.5.1 Abandono temporal

El abandono temporal, también denominado en la literatura técnica como *temporary abandonment* o *suspension*, corresponde a una condición en la cual el pozo se encuentra fuera de operación durante un periodo determinado, pero mantiene la posibilidad de ser reactivado en el futuro (Khalifeh & Saasen, 2020).

Este tipo de abandono suele aplicarse en situaciones en las que el pozo no es económicamente rentable en el momento actual, pero se considera que podría recuperar su viabilidad productiva bajo nuevas condiciones de mercado, cambios tecnológicos o estrategias de desarrollo del campo. También puede implementarse cuando se requiere suspender temporalmente las operaciones para realizar evaluaciones técnicas, modificaciones en el sistema de producción o actividades de mantenimiento mayor.

Desde el punto de vista operativo, el abandono temporal implica la instalación de barreras de seguridad que garanticen el aislamiento de las formaciones atravesadas por el pozo durante el periodo de inactividad. Estas barreras pueden incluir tapones de cemento, válvulas de seguridad y otros dispositivos mecánicos diseñados para prevenir la migración de fluidos hacia otras formaciones o hacia la superficie (American Petroleum Institute, 2018).

Aunque el pozo permanece cerrado durante el periodo de suspensión, las autoridades regulatorias suelen exigir que los operadores mantengan programas de monitoreo y verificación de integridad para asegurar que las condiciones del pozo no representen riesgos ambientales o de seguridad.

3.5.2 Abandono permanente

El abandono permanente, conocido en la industria como *plug and abandonment (P&A)*, corresponde al cierre definitivo del pozo una vez que se ha determinado que la infraestructura no

volverá a ser utilizada para actividades de exploración o producción de hidrocarburos (Davies et al., 2014).

En este tipo de abandono se ejecutan una serie de operaciones destinadas a garantizar el aislamiento permanente de las formaciones geológicas atravesadas por el pozo, eliminando cualquier posible ruta de migración de fluidos entre formaciones o hacia la superficie. Para lograr este objetivo, se instalan múltiples barreras de aislamiento que pueden incluir tapones de cemento, barreras mecánicas y sellos en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación (Khalifeh & Saasen, 2020).

El abandono permanente también suele implicar el retiro de los equipos de producción, la desinstalación de las infraestructuras de superficie y la restauración ambiental del área intervenida. Estas actividades buscan asegurar que el pozo no represente riesgos futuros para el medio ambiente ni para las comunidades cercanas.

Debido a la naturaleza irreversible de este proceso, los estándares técnicos internacionales establecen criterios rigurosos para el diseño y verificación de las barreras de aislamiento. En particular, se requiere demostrar que las barreras instaladas tienen la capacidad de mantener la integridad del pozo durante largos periodos de tiempo, incluso después de que las operaciones petroleras han finalizado completamente (American Petroleum Institute, 2018).

3.5.3 Abandono parcial o abandono de secciones del pozo

En algunos casos específicos, la industria petrolera también recurre a lo que se conoce como abandono parcial, el cual consiste en sellar determinadas secciones del pozo mientras se mantienen otras partes de la infraestructura operativas (Economides et al., 2013).

Este tipo de intervención puede aplicarse, por ejemplo, cuando un pozo ha sido perforado a través de múltiples formaciones productoras y se decide abandonar una zona específica que ha

dejado de ser económicamente viable, mientras se continúa explotando otra formación ubicada a mayor profundidad. En estos casos, se instalan tapones de cemento u otros sistemas de aislamiento para sellar la sección abandonada y evitar la comunicación entre las distintas zonas del yacimiento.

El abandono parcial también puede utilizarse durante operaciones de reacondicionamiento de pozos o cuando se requiere aislar intervalos que presentan problemas de producción, presencia de agua o fallas en la integridad del revestimiento.

3.5.4 Consideraciones técnicas para la selección del tipo de abandono

La decisión sobre el tipo de abandono que se aplicará a un pozo depende de diversos factores técnicos, económicos y regulatorios. Entre los aspectos más relevantes se encuentran el estado mecánico del pozo, las características geológicas del yacimiento, las perspectivas de desarrollo futuro del campo y los requerimientos establecidos por las autoridades regulatorias (Khalifeh & Saasen, 2020).

En general, los operadores deben realizar evaluaciones técnicas detalladas que incluyan análisis de integridad del pozo, revisión del historial de operaciones y evaluación de riesgos ambientales antes de definir la estrategia de abandono más adecuada. Estas evaluaciones permiten seleccionar los métodos de sellado más apropiados y diseñar un sistema de barreras capaz de garantizar el aislamiento seguro de las formaciones a largo plazo.

En el contexto actual de la industria petrolera, la planificación del abandono se considera una parte integral de la gestión del ciclo de vida de los activos petroleros. Por esta razón, muchos operadores incorporan estrategias de abandono desde las etapas tempranas de diseño y perforación de los pozos, con el objetivo de facilitar las operaciones de cierre y reducir los costos asociados al final de la vida productiva del campo (Davies et al., 2014).

En la tabla 3, se puede evidenciar los tipos de abandono que puede tener un pozo petrolífero, esta se presenta a continuación.

Tabla 3. *Clasificación de los tipos de abandono de pozos*

Tipo de abandono	Características principales	Posibilidad de reactivación
Abandono temporal	Suspensión del pozo con barreras de seguridad	Sí
Abandono permanente	Sellado definitivo del pozo mediante barreras de aislamiento	No
Abandono parcial	Sellado de secciones específicas del pozo	Depende del diseño del pozo

Nota. Adaptado de Khalifeh y Saasen (2020); American Petroleum Institute (2018).

3.6 Panorama global del abandono de pozos

El abandono de pozos petroleros se ha convertido en un tema de creciente relevancia dentro de la industria energética mundial debido al envejecimiento de numerosos campos petroleros y al aumento progresivo del número de pozos que han alcanzado el final de su vida productiva. A lo largo de más de un siglo de explotación de hidrocarburos se han perforado millones de pozos en todo el mundo, muchos de los cuales actualmente se encuentran inactivos o han sido abandonados (Davies et al., 2014).

En países con una larga tradición petrolera, como Estados Unidos, Canadá y Rusia, la magnitud del inventario de pozos perforados es particularmente elevada. En Estados Unidos, por ejemplo, se estima que existen varios millones de pozos petroleros y gasíferos registrados, una parte importante de los cuales corresponde a pozos inactivos o abandonados. Esta situación ha

impulsado el desarrollo de programas de gestión orientados a identificar, monitorear y cerrar adecuadamente estas infraestructuras (International Energy Agency, 2021).

Uno de los principales desafíos asociados a esta problemática es la presencia de pozos huérfanos, definidos como pozos cuyo operador original ya no existe o no puede asumir la responsabilidad financiera de su cierre. Estos pozos representan un desafío importante para los gobiernos y autoridades regulatorias, ya que el costo de su abandono debe ser asumido en muchos casos por fondos públicos o por programas especiales financiados por la industria (International Energy Agency, 2021).

El incremento del número de pozos inactivos también ha generado preocupaciones relacionadas con la gestión de los costos asociados a las operaciones de abandono. Dependiendo de la complejidad del pozo y de las condiciones operativas, los procesos de plug and abandonment (P&A) pueden requerir inversiones significativas en equipos especializados, operaciones de cementación y actividades de desmantelamiento de instalaciones. En ambientes offshore o en pozos de alta profundidad, los costos de abandono pueden alcanzar varios millones de dólares por pozo (Khalifeh & Saasen, 2020).

Ante este escenario, diferentes países han desarrollado marcos regulatorios orientados a fortalecer la gestión del abandono de pozos. En Europa, por ejemplo, países como Noruega y el Reino Unido han establecido regulaciones estrictas para el cierre de pozos offshore, exigiendo la implementación de múltiples barreras de aislamiento y la verificación técnica de los sellos instalados antes de autorizar el abandono definitivo de la infraestructura (Oil & Gas UK, 2018).

De manera similar, en América del Norte se han implementado programas destinados a acelerar el cierre de pozos inactivos y reducir el inventario de infraestructuras abandonadas. Estos programas incluyen incentivos financieros, fondos gubernamentales y mecanismos regulatorios

orientados a garantizar que los operadores asuman las responsabilidades asociadas al cierre de sus pozos (International Energy Agency, 2021).

En este contexto, el abandono de pozos se ha convertido en un componente estratégico dentro de la gestión del ciclo de vida de los activos petroleros. La planificación anticipada del cierre de pozos, la adopción de estándares técnicos internacionales y el fortalecimiento de los sistemas regulatorios son elementos clave para garantizar que estas infraestructuras no representen riesgos técnicos, económicos o ambientales a largo plazo (Davies et al., 2014).

El análisis de estas experiencias internacionales proporciona un marco de referencia útil para países productores como Colombia, donde la gestión de pozos inactivos y abandonados constituye un desafío emergente dentro de la administración sostenible de los recursos hidrocarbúferos.

3.7 Situación actual del abandono de pozos en Colombia

La industria de hidrocarburos en Colombia ha experimentado un desarrollo progresivo desde principios del siglo XX, con la explotación de campos históricos que marcaron el inicio de la producción petrolera en el país. A lo largo de más de cien años de actividad exploratoria y productiva, se han perforado miles de pozos destinados tanto a exploración como a producción de petróleo y gas. Este proceso ha permitido consolidar importantes cuencas productoras, entre las que destacan los Llanos Orientales, el Valle Medio del Magdalena y el Valle Superior del Magdalena, donde se concentra gran parte de la actividad petrolera nacional (Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH], 2020).

La expansión de estas actividades ha implicado el desarrollo de numerosos campos petroleros y la perforación de una gran cantidad de pozos asociados a diferentes etapas del ciclo productivo. De acuerdo con información institucional del sector energético, en Colombia se han

reportado cientos de campos petroleros activos o en declinación, operados por diversas compañías nacionales e internacionales, lo que refleja la complejidad operativa y la diversidad de infraestructuras asociadas a la explotación de hidrocarburos en el país (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

Dentro de este contexto, una parte significativa de la infraestructura petrolera corresponde a pozos que han alcanzado el final de su vida productiva o que permanecen en estados de inactividad prolongada. La identificación, monitoreo y cierre adecuado de estos pozos constituye una responsabilidad compartida entre las empresas operadoras y las autoridades regulatorias, ya que su gestión inadecuada puede derivar en riesgos técnicos, ambientales y económicos a largo plazo.

Diversos análisis sobre el estado de la infraestructura petrolera en el país han señalado que existe un número considerable de pozos cuyo estado de abandono o sellado no siempre se encuentra plenamente documentado. Algunas estimaciones indican que en Colombia podrían existir más de 8.000 pozos petroleros abandonados cuyo estado de integridad no es completamente conocido, lo que representa un desafío importante para la gestión de los pasivos ambientales asociados a la industria (Gómez, citado en Periódico UNAL, 2023).

La gestión de estos pozos implica retos adicionales relacionados con la antigüedad de muchas de estas infraestructuras. Una proporción relevante de los pozos actualmente inactivos fue perforada durante periodos en los que los estándares técnicos y ambientales eran menos rigurosos que los actuales. En consecuencia, la información disponible sobre su construcción, cementación y estado mecánico puede ser limitada o incompleta, lo que dificulta la evaluación precisa de su integridad estructural y de los riesgos potenciales asociados a su abandono.

Desde el punto de vista institucional, el control y la regulación de las actividades relacionadas con el abandono de pozos involucra a varias entidades del Estado. La **Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)** es responsable de administrar los recursos hidrocarburíferos del país y de supervisar el cumplimiento de las obligaciones contractuales de los operadores, incluyendo las actividades relacionadas con el cierre de pozos. Paralelamente, la **Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)** y las autoridades ambientales regionales supervisan los aspectos relacionados con la gestión ambiental de las operaciones petroleras, incluyendo el desmantelamiento de instalaciones y la restauración de las áreas intervenidas.

En los últimos años, las autoridades regulatorias han impulsado diversas iniciativas orientadas a mejorar el control sobre los pozos inactivos y abandonados. Entre estas medidas se incluyen requerimientos de actualización de información técnica por parte de los operadores, así como la implementación de registros más detallados sobre el estado mecánico y operativo de los pozos. Estas acciones buscan fortalecer la trazabilidad de la infraestructura petrolera y facilitar la planificación de las actividades de abandono cuando los pozos alcanzan el final de su vida útil (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2024).

Otro aspecto relevante del contexto colombiano es la presencia de campos petroleros maduros, en los cuales la producción ha experimentado una disminución progresiva a lo largo del tiempo. En este tipo de campos, la proporción de pozos inactivos o en proceso de cierre tiende a incrementarse a medida que disminuye la rentabilidad de las operaciones. Esta situación implica la necesidad de desarrollar estrategias técnicas y económicas que permitan gestionar de manera eficiente el abandono de los pozos asociados a estos campos.

En este escenario, la planificación del abandono se ha convertido en un componente cada vez más importante dentro de la gestión de activos petroleros en Colombia. Las empresas

operadoras deben considerar no solo los aspectos técnicos asociados al sellado del pozo, sino también los requerimientos regulatorios, ambientales y económicos que intervienen en el proceso de cierre.

En consecuencia, el fortalecimiento de herramientas técnicas que integren los criterios de ingeniería, los requerimientos normativos y las mejores prácticas internacionales resulta fundamental para mejorar la gestión del abandono de pozos en el país. La elaboración de manuales técnicos especializados puede contribuir a estandarizar procedimientos, mejorar la planificación de las operaciones de cierre y reducir los riesgos asociados a la presencia de pozos abandonados en el territorio nacional.

En la tabla 4, se puede evidenciar los desafíos que se presentan al momento de realizar el abandono de un pozo.

Tabla 4. *Desafíos actuales en la gestión del abandono de pozos en Colombia*

Categoría	Descripción
Antigüedad de los pozos	Existencia de pozos perforados bajo estándares técnicos antiguos
Información incompleta	Registros históricos limitados sobre construcción y estado mecánico
Campos maduros	Incremento progresivo de pozos inactivos o en declinación
Gestión institucional	Necesidad de coordinación entre entidades regulatorias
Costos operativos	Alto costo de las intervenciones de abandono

Nota. Elaboración propia.

3.8 Impactos potenciales de un abandono inadecuado de pozos

El abandono de pozos constituye una etapa crítica dentro de la gestión del ciclo de vida de los campos petroleros, ya que las decisiones técnicas adoptadas durante este proceso pueden tener implicaciones ambientales, económicas y sociales a largo plazo. Cuando los procedimientos de abandono no se ejecutan adecuadamente, los pozos pueden convertirse en vías de migración de fluidos o gases desde el subsuelo hacia otras formaciones geológicas o hacia la superficie, generando riesgos que pueden persistir durante décadas o incluso siglos (Davies et al., 2014).

En términos generales, los impactos asociados a un abandono inadecuado de pozos pueden agruparse en tres categorías principales: impactos ambientales, impactos climáticos y afectaciones socioeconómicas. Estas dimensiones han sido ampliamente estudiadas en la literatura científica debido a la creciente preocupación por los pasivos ambientales generados por infraestructuras petroleras abandonadas alrededor del mundo.

3.8.1 Impactos sobre recursos hídricos subterráneos

Uno de los riesgos más relevantes asociados a pozos abandonados es la posible contaminación de acuíferos subterráneos. Durante la vida útil de un pozo petrolero se atraviesan múltiples formaciones geológicas que pueden contener agua potable, hidrocarburos o fluidos salinos. Si las barreras de aislamiento instaladas durante el abandono fallan o se degradan con el tiempo, pueden generarse rutas de migración de fluidos entre estas formaciones (Kang et al., 2014).

Diversos estudios han documentado casos en los cuales pozos con problemas de integridad han permitido la migración de metano o de fluidos salinos hacia acuíferos utilizados para abastecimiento humano. Este fenómeno puede ocurrir a través del anular del pozo, a través de fallas en la cementación o mediante fracturas inducidas en las formaciones circundantes (Davies et al., 2014).

La contaminación de acuíferos representa un problema particularmente crítico debido a la dificultad técnica y económica asociada a la remediación de estos recursos una vez que han sido afectados. A diferencia de otros tipos de contaminación ambiental, la restauración de acuíferos subterráneos puede requerir periodos de tiempo muy prolongados y en muchos casos resulta técnicamente inviable recuperar completamente las condiciones originales del sistema hidrogeológico (Kang et al., 2014).

En países con alta densidad de pozos petroleros, como Estados Unidos y Canadá, diversos estudios han identificado la presencia de metano en aguas subterráneas cercanas a infraestructuras petroleras antiguas, lo que ha impulsado el fortalecimiento de los sistemas de monitoreo de integridad de pozos abandonados (Jackson et al., 2013).

3.8.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

Otro impacto relevante asociado a los pozos abandonados es la emisión de metano hacia la atmósfera. El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente superior al del dióxido de carbono en horizontes temporales de 20 a 100 años, lo que lo convierte en un componente importante dentro de las estrategias globales de mitigación del cambio climático (IPCC, 2021).

Investigaciones recientes han demostrado que los pozos abandonados pueden representar una fuente significativa de emisiones fugitivas de metano, especialmente cuando presentan fallas en sus sistemas de sellado. Estas emisiones pueden ocurrir a través del propio pozo o mediante migración de gas a través del suelo circundante (Townsend-Small et al., 2016).

El problema adquiere una dimensión global cuando se considera la gran cantidad de pozos existentes en el mundo. Algunos estudios estiman que los pozos abandonados pueden contribuir de manera relevante a las emisiones de metano del sector energético, particularmente en regiones

con grandes inventarios de pozos históricos cuya integridad no ha sido evaluada recientemente (International Energy Agency, 2021).

Debido a esta situación, diversos organismos internacionales han identificado el cierre adecuado de pozos abandonados como una de las medidas más efectivas para reducir emisiones de metano en el sector de hidrocarburos (IEA, 2021).

3.8.3 Generación de pasivos ambientales

Los pozos abandonados que presentan problemas de integridad pueden convertirse en pasivos ambientales que requieren intervención por parte de los operadores o de las autoridades estatales. Estos pasivos pueden incluir suelos contaminados, emisiones de gas, presencia de fluidos en superficie o deterioro de ecosistemas cercanos a las áreas de operación (Contraloría General de la República, 2023).

El manejo de estos pasivos implica generalmente la ejecución de operaciones adicionales de reacondicionamiento del pozo, monitoreo ambiental o remediación de áreas afectadas, lo que puede generar costos significativos tanto para las empresas operadoras como para el Estado.

En contextos donde los operadores originales ya no existen o no pueden asumir las responsabilidades asociadas al cierre de los pozos, estos pasivos pueden transformarse en problemas ambientales de carácter público, obligando a los gobiernos a destinar recursos para su mitigación.

3.8.4 Implicaciones para el contexto colombiano

En Colombia, el problema de los pozos abandonados también plantea desafíos importantes desde el punto de vista ambiental y de gestión institucional. Informes de entidades de control han señalado que el sector de hidrocarburos concentra una proporción significativa de los pasivos

ambientales identificados en el país, lo que refleja la necesidad de fortalecer los mecanismos de control y seguimiento de las actividades de cierre de pozos (Contraloría General de la República, 2023).

Adicionalmente, la presencia de campos maduros en diversas regiones del país implica que en los próximos años aumentará el número de pozos que alcanzarán el final de su vida productiva. Esta tendencia plantea la necesidad de fortalecer las capacidades técnicas y regulatorias para garantizar que los procesos de abandono se realicen conforme a estándares que aseguren la protección de los recursos naturales y la seguridad de las comunidades cercanas a las áreas de explotación.

En este contexto, la implementación de herramientas técnicas que integren criterios de ingeniería, normatividad ambiental y buenas prácticas internacionales resulta fundamental para mejorar la gestión del abandono de pozos en el país. La sistematización de estos criterios a través de manuales técnicos puede contribuir a reducir los riesgos asociados a la presencia de pozos abandonados y fortalecer la sostenibilidad de las operaciones petroleras a largo plazo. Estos impactos se pueden evidenciar en la tabla 5, de forma resumida, esta se presenta a continuación.

Tabla 5. *Principales impactos asociados a un abandono inadecuado de pozos*

Tipo de impacto	Descripción
Contaminación de acuíferos	Migración de hidrocarburos, metano o salmueras hacia formaciones con agua potable
Emisiones de metano	Liberación de gas hacia la atmósfera contribuyendo al cambio climático
Degradación del suelo	Filtración de fluidos hacia superficie
Pasivos ambientales	Necesidad de remediación o intervención posterior

Riesgos para comunidades	Posibles fugas de gas o contaminación ambiental
---------------------------------	---

Nota. Elaboración propia.

En síntesis, el análisis realizado evidencia que el abandono de pozos constituye un desafío técnico, ambiental e institucional de creciente relevancia tanto a nivel global como en el contexto colombiano. La presencia de campos maduros, la existencia de pozos perforados bajo estándares históricos y los riesgos asociados a fallas en la integridad de estas infraestructuras refuerzan la necesidad de fortalecer los mecanismos de planificación y ejecución de las operaciones de cierre. En este contexto, el siguiente capítulo aborda el marco teórico y normativo que regula el abandono de pozos, proporcionando la base conceptual para la elaboración del manual técnico propuesto en esta investigación.

3.9 Necesidad de un manual integrado para el abandono de pozos en Colombia

La creciente preocupación por los riesgos asociados a los pozos petroleros abandonados ha impulsado en las últimas décadas el desarrollo de estándares técnicos, marcos regulatorios y herramientas de gestión orientadas a garantizar el cierre seguro de estas infraestructuras. Sin embargo, la experiencia internacional demuestra que la existencia de regulaciones generales no siempre es suficiente para asegurar la correcta ejecución de los procesos de abandono, especialmente en contextos donde convergen múltiples actores institucionales, operadores con distintos niveles de experiencia y una infraestructura petrolera desarrollada a lo largo de diferentes periodos tecnológicos (Khalifeh & Saasen, 2020).

En este sentido, la literatura técnica sobre integridad de pozos y abandono permanente señala que uno de los factores críticos para el éxito de las operaciones de cierre es la disponibilidad

de procedimientos claros, estandarizados y técnicamente fundamentados que orienten la planificación y ejecución de estas actividades. La ausencia de lineamientos operativos específicos puede generar inconsistencias en la aplicación de criterios de ingeniería, variaciones en la calidad de las operaciones y dificultades para verificar el cumplimiento de los requisitos regulatorios establecidos por las autoridades competentes (Davies et al., 2014).

En el caso colombiano, aunque existen disposiciones normativas que regulan las actividades de abandono de pozos, dichas regulaciones se encuentran dispersas en diferentes instrumentos legales, lineamientos técnicos y requerimientos ambientales emitidos por diversas entidades del Estado. Esta situación puede generar dificultades para los operadores al momento de interpretar e integrar los distintos requisitos aplicables al cierre de pozos, particularmente en lo relacionado con la coordinación entre aspectos técnicos, ambientales y administrativos del proceso (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2020).

Adicionalmente, la estructura de la industria petrolera en Colombia presenta características que hacen especialmente relevante la consolidación de herramientas técnicas de apoyo para las operaciones de abandono. Entre estas características se destacan la presencia de campos maduros, la existencia de pozos perforados bajo estándares técnicos de diferentes épocas y la creciente necesidad de gestionar infraestructuras que se aproximan al final de su vida productiva. Estas condiciones implican que, en los próximos años, el país deberá enfrentar un aumento progresivo en el número de operaciones de abandono de pozos, lo que requerirá fortalecer las capacidades técnicas y operativas de los actores involucrados en estas actividades.

Desde una perspectiva ambiental, la necesidad de mejorar la gestión del abandono de pozos adquiere una relevancia adicional si se consideran los riesgos asociados a fallas en la integridad de estas infraestructuras. Como se ha discutido en secciones anteriores, los pozos abandonados que

presentan deficiencias en sus barreras de aislamiento pueden convertirse en fuentes potenciales de contaminación de acuíferos, emisiones de gases de efecto invernadero y generación de pasivos ambientales que requieren intervención posterior (Kang et al., 2014; Townsend-Small et al., 2016).

En este contexto, diversos organismos internacionales han señalado que la planificación adecuada del abandono de pozos debe incorporarse como un componente integral dentro de la gestión del ciclo de vida de los activos petroleros. Esto implica que las empresas operadoras deben contar con herramientas técnicas que permitan integrar la información geológica, mecánica y operativa del pozo con los requisitos regulatorios y las mejores prácticas de la industria, con el fin de diseñar estrategias de cierre que garanticen la estabilidad de las barreras de aislamiento a largo plazo (International Energy Agency, 2021).

La elaboración de un manual técnico para el abandono de pozos en Colombia se plantea, en este sentido, como una herramienta que puede contribuir significativamente a fortalecer la gestión de estas actividades dentro de la industria nacional. Un documento de este tipo permitiría consolidar en un solo instrumento los principales requerimientos técnicos, ambientales y regulatorios aplicables al abandono de pozos, facilitando su consulta por parte de ingenieros, operadores y autoridades responsables de supervisar estas operaciones.

Además de su utilidad como herramienta de consulta, un manual técnico puede desempeñar un papel importante en, lo que contribuye a reducir la variabilidad en la ejecución de las actividades de abandono y a mejorar la trazabilidad de las decisiones técnicas adoptadas durante el proceso de cierre. La estandarización de prácticas también facilita las labores de auditoría y supervisión por parte de las autoridades regulatorias, permitiendo verificar de manera más eficiente el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa vigente.

Desde el punto de vista académico y técnico, la construcción de un manual basado en la revisión sistemática de literatura especializada, estándares internacionales y normativa nacional representa una contribución relevante para el fortalecimiento del conocimiento aplicado en el área de producción de hidrocarburos. Este tipo de herramientas permite traducir los avances teóricos y tecnológicos desarrollados por la industria en procedimientos prácticos que pueden ser utilizados para mejorar la gestión de los activos petroleros en contextos específicos como el colombiano.

En consecuencia, el desarrollo de un manual integrado para el abandono de pozos no solo responde a una necesidad operativa de la industria petrolera nacional, sino que también constituye una estrategia orientada a reducir riesgos ambientales, fortalecer el cumplimiento regulatorio y promover prácticas de gestión más sostenibles dentro del sector energético. Bajo esta perspectiva, la presente monografía busca aportar a la consolidación de criterios técnicos que permitan mejorar la planificación y ejecución de las actividades de abandono de pozos en Colombia, contribuyendo al manejo responsable de los recursos hidrocarburíferos y a la protección del entorno natural. Los diferentes beneficios que se presentan en la correcta explotación de los pozos se pueden evidenciar en la tabla 6.

Tabla 6. *Beneficios esperados de la implementación de un manual técnico de abandono de pozos*

Dimensión	Beneficio
Técnica	Estandarización de procedimientos de abandono
Ambiental	Reducción del riesgo de contaminación y emisiones
Regulatoria	Mejor cumplimiento de los requisitos legales
Operativa	Mayor eficiencia en la planificación de las intervenciones
Institucional	Mejor articulación entre operadores y autoridades

Nota. Elaboración propia.

3.10 Síntesis del contexto y desafíos del abandono de pozos

El análisis desarrollado a lo largo del presente capítulo ha permitido examinar el abandono de pozos petroleros desde una perspectiva histórica, técnica y ambiental, abordando tanto el panorama global de esta problemática como su manifestación en el contexto colombiano. La revisión de literatura especializada y de informes institucionales evidencia que el abandono de pozos constituye un desafío creciente para la industria de los hidrocarburos, particularmente en regiones donde existen campos maduros y un número significativo de infraestructuras que han alcanzado el final de su vida productiva.

En este sentido, la gestión adecuada del abandono de pozos requiere integrar criterios de ingeniería, regulaciones ambientales y mecanismos de planificación que garanticen la seguridad y sostenibilidad de las operaciones a largo plazo. La Tabla 7 presenta una síntesis de los principales elementos analizados en este capítulo, destacando los factores que caracterizan la problemática del abandono de pozos y las implicaciones que estos tienen para la gestión de dichas infraestructuras en el contexto colombiano.

Tabla 7. *Síntesis del contexto del abandono de pozos y principales desafíos para su gestión*

Dimensión de análisis	Contexto identificado	Implicaciones para la gestión del abandono
Evolución histórica de la industria	La industria petrolera ha perforado millones de pozos a nivel mundial durante más de un siglo de actividad extractiva	Incremento progresivo del número de pozos que alcanzan el final de su vida útil
Panorama global	Diversos países enfrentan grandes inventarios de pozos inactivos o abandonados, incluyendo pozos huérfanos sin operador responsable	Necesidad de fortalecer los sistemas regulatorios y los programas de cierre de pozos
Riesgos ambientales	Los pozos con fallas en su integridad pueden permitir migración de fluidos, emisiones de metano o contaminación de acuíferos	Importancia de aplicar estándares técnicos rigurosos en las operaciones de abandono
Contexto colombiano	Existencia de miles de pozos inactivos o abandonados asociados a campos maduros y a operaciones históricas	Incremento de la necesidad de planificación y ejecución eficiente de operaciones de abandono
Marco institucional	La regulación del abandono involucra diversas entidades como ANH, ANLA y el Ministerio de Minas y Energía	Requiere coordinación institucional y claridad en los procedimientos operativos

Gestión técnica del abandono	La literatura internacional destaca la importancia de planificación temprana y uso de estándares de integridad de pozos	Necesidad de herramientas técnicas que integren criterios de ingeniería y normativa
Brecha identificada	La información técnica y normativa se encuentra dispersa en múltiples documentos y estándares	Justifica la elaboración de un manual integrado para orientar las operaciones de abandono

Nota. Elaboración propia.

4 Capítulo 2 - Marco normativo y lineamientos técnicos para el abandono de pozos en Colombia

4.1 Introducción al marco normativo y técnico del abandono de pozos

El abandono de pozos petroleros constituye una actividad que trasciende el ámbito estrictamente operativo de la ingeniería de petróleo, para convertirse en un proceso regulado que involucra dimensiones técnicas, ambientales y legales. En este contexto, la correcta ejecución del abandono no depende únicamente de la aplicación de buenas prácticas de ingeniería, sino también del cumplimiento de un conjunto de disposiciones normativas que buscan garantizar la protección del medio ambiente, la seguridad de las operaciones y la adecuada gestión de los recursos naturales (Khalifeh & Saasen, 2020).

A nivel internacional, el abandono de pozos ha sido objeto de creciente atención por parte de organismos reguladores y entidades técnicas, debido a los riesgos asociados a fallas en la integridad de estas infraestructuras. Como resultado, se han desarrollado estándares y guías

técnicas que establecen criterios para el diseño de barreras de aislamiento, la verificación de la integridad del pozo y la ejecución de las operaciones de cierre definitivo (American Petroleum Institute, 2018).

En el caso colombiano, el marco normativo aplicable al abandono de pozos se caracteriza por su naturaleza multidimensional, ya que integra disposiciones provenientes del sector minero-energético, la legislación ambiental y los instrumentos contractuales que regulan la exploración y producción de hidrocarburos. Esta diversidad normativa implica que las empresas operadoras deben articular diferentes tipos de requerimientos durante la planificación y ejecución de las actividades de abandono.

En este contexto, resulta relevante incorporar lo establecido en la **Resolución 40537 de 2024** del Ministerio de Minas y Energía, la cual constituye un instrumento normativo reciente orientado a fortalecer la regulación técnica de las actividades de exploración y producción de hidrocarburos en Colombia. Esta resolución establece lineamientos que promueven la aplicación de mejores prácticas de la industria, el cumplimiento de la normativa ambiental y la adopción de criterios técnicos que garanticen la sostenibilidad de las operaciones.

La incorporación de esta resolución dentro del marco normativo no solo refuerza la necesidad de articular los distintos componentes regulatorios, sino que también aporta claridad conceptual a través de definiciones específicas que permiten estandarizar la interpretación de conceptos clave dentro del sector. En este sentido, su análisis resulta fundamental para comprender el alcance técnico y normativo del abandono de pozos en el contexto colombiano.

En este orden de ideas, el presente capítulo tiene como objetivo analizar y sintetizar el conjunto de normas, lineamientos y criterios técnicos aplicables al abandono de pozos en Colombia, integrando instrumentos regulatorios recientes como la Resolución 40537 de 2024, con

el fin de establecer una base estructurada que permita orientar el diseño del manual propuesto en esta investigación.

4.2 Normatividad técnica nacional y definición de abandono de pozos

En Colombia, las actividades relacionadas con la exploración y producción de hidrocarburos, incluyendo el abandono de pozos, se encuentran reguladas principalmente por el Ministerio de Minas y Energía y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Estas entidades establecen los lineamientos técnicos que deben cumplir los operadores para garantizar la adecuada gestión de los recursos hidrocarburíferos y la seguridad de las operaciones.

Uno de los instrumentos más relevantes en materia de abandono de pozos corresponde a los lineamientos técnicos emitidos por la ANH, los cuales definen los requisitos que deben cumplir las empresas operadoras durante el cierre de pozos y el desmantelamiento de instalaciones. Estos lineamientos incluyen aspectos relacionados con la planificación del abandono, la instalación de barreras de aislamiento, la verificación de la integridad del pozo y la documentación de las actividades ejecutadas (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2020).

En complemento a estos lineamientos, la Resolución 40537 de 2024 del Ministerio de Minas y Energía introduce una definición formal del abandono de pozos, estableciendo que este corresponde a:

“Conjunto de operaciones que se ejecutan en el pozo para asegurar un aislamiento apropiado de las formaciones almacenadoras de gas y/o petróleo, así como de los acuíferos existentes con el fin de prevenir la migración de fluidos hacia la superficie del terreno o del fondo marino, o entre las diferentes formaciones a través del hueco del pozo o el espacio anular entre el hueco y los revestimientos”.

Esta definición permite comprender el abandono como un proceso integral, orientado fundamentalmente a garantizar el aislamiento del sistema pozo-formación. Desde el punto de vista técnico, este aislamiento se logra mediante la implementación de barreras físicas —como tapones de cemento y dispositivos mecánicos— diseñadas para impedir la migración de fluidos a lo largo del pozo o entre formaciones.

Asimismo, la definición normativa se encuentra directamente alineada con el concepto de integridad de pozo, ampliamente desarrollado en la ingeniería de petróleo, el cual establece que un pozo debe ser capaz de contener fluidos y evitar su migración durante todas las etapas de su ciclo de vida. En este sentido, el énfasis en el “aislamiento apropiado” refleja la necesidad de diseñar sistemas de barreras múltiples que garanticen la estabilidad del pozo a largo plazo.

Desde una perspectiva ambiental, la definición resalta la importancia de proteger los acuíferos y evitar la migración de fluidos hacia la superficie, lo cual evidencia la relación directa entre el abandono de pozos y la prevención de impactos ambientales. Una falla en este proceso puede derivar en contaminación de recursos hídricos, emisiones de gases y generación de pasivos ambientales, aspectos que han sido ampliamente documentados tanto a nivel nacional como internacional.

En términos operativos, la normativa técnica colombiana establece que el abandono de pozos debe garantizar el aislamiento efectivo de las formaciones geológicas atravesadas por el pozo, evitando la comunicación entre zonas productoras, acuíferos y la superficie. Para ello, se exige la implementación de sistemas de barreras múltiples, que pueden incluir tapones de cemento, dispositivos mecánicos y sellos en el espacio anular, diseñados de acuerdo con las condiciones específicas del pozo y del yacimiento.

Adicionalmente, la regulación contempla la necesidad de realizar pruebas de integridad que permitan verificar la efectividad de las barreras instaladas. Estas pruebas incluyen ensayos de presión, registros de cementación y evaluaciones de aislamiento zonal, cuyo objetivo es asegurar que el pozo no represente un riesgo a largo plazo una vez finalizadas las operaciones de abandono.

Otro aspecto relevante de la normatividad técnica en Colombia es la exigencia de documentar de manera detallada todas las actividades realizadas durante el proceso de abandono. Esta documentación incluye registros operativos, informes técnicos, resultados de pruebas de integridad y evidencia de cumplimiento de los requisitos establecidos por las autoridades competentes. La adecuada trazabilidad de esta información resulta fundamental para facilitar las labores de supervisión y control por parte de las entidades regulatorias.

Adicionalmente, los contratos de exploración y producción suscritos con la ANH establecen obligaciones específicas para los operadores en relación con el abandono de pozos, incluyendo la responsabilidad de ejecutar estas actividades de acuerdo con los estándares técnicos aplicables y de garantizar la restauración de las áreas intervenidas.

En conjunto, estos elementos configuran un marco técnico que, si bien proporciona lineamientos generales para la ejecución del abandono de pozos, requiere ser interpretado e integrado de manera coherente por parte de los operadores. En este sentido, la incorporación de definiciones normativas claras, como la establecida en la Resolución 40537 de 2024, contribuye a fortalecer la comprensión del proceso y refuerza la necesidad de contar con herramientas técnicas que faciliten su aplicación práctica en el contexto operativo.

Tabla 8. *Normatividad técnica aplicable al abandono de pozos en Colombia*

Norma / Documento	Entidad	Alcance
Lineamientos de abandono de pozos	ANH	Define requisitos técnicos para cierre de pozos
Contratos E&P	ANH	Establecen obligaciones del operador
Reglamentos técnicos del sector hidrocarburos	MinMinas	Lineamientos generales de operación
Buenas prácticas API	Internacional	Referencia técnica para integridad y abandono

Nota. Adaptado con base en ANH (2020); API (2018).

4.3 Normatividad ambiental aplicable al abandono de pozos

El abandono de pozos petroleros no solo constituye una operación de carácter técnico, sino también una actividad con implicaciones ambientales significativas, lo que exige su regulación dentro del marco de la legislación ambiental vigente. En Colombia, las actividades asociadas al cierre de pozos y al desmantelamiento de infraestructura petrolera están sujetas a un conjunto de normas que buscan prevenir, mitigar y compensar los impactos ambientales derivados de estas operaciones.

El principal instrumento de gestión ambiental aplicable al abandono de pozos es el licenciamiento ambiental, el cual establece las condiciones bajo las cuales deben desarrollarse las actividades de exploración y producción de hidrocarburos, incluyendo las fases de cierre y abandono. En este contexto, los proyectos petroleros deben contar con una licencia ambiental otorgada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) o por las autoridades

ambientales regionales, en la cual se definen las obligaciones específicas relacionadas con la gestión ambiental durante todo el ciclo de vida del proyecto, incluyendo su fase final (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Dentro de estas obligaciones, el abandono de pozos debe ejecutarse conforme a los planes de manejo ambiental (PMA) y a los planes de abandono y restauración, los cuales establecen las medidas necesarias para garantizar la recuperación de las áreas intervenidas y la protección de los recursos naturales. Estos planes incluyen actividades como la remoción de instalaciones, la disposición adecuada de residuos, la rehabilitación del suelo y la revegetalización de las áreas afectadas.

Un elemento fundamental dentro de la normativa ambiental colombiana es la gestión de los denominados pasivos ambientales, entendidos como los impactos negativos generados por actividades productivas que no han sido adecuadamente mitigados o compensados. En el contexto del abandono de pozos, los pasivos ambientales pueden manifestarse en forma de contaminación de suelos, afectación de cuerpos de agua, emisiones de gases o deterioro de ecosistemas, lo que implica la necesidad de implementar medidas correctivas y de monitoreo a largo plazo (Contraloría General de la República, 2023).

Asimismo, la normativa ambiental establece la obligación de realizar procesos de seguimiento y monitoreo post-abandono, con el fin de verificar que las condiciones ambientales del área intervenida se mantengan dentro de los parámetros establecidos y que no se presenten efectos adversos derivados de fallas en el cierre del pozo. Este monitoreo puede incluir la evaluación de calidad de agua, emisiones de gases, estabilidad del terreno y estado de la cobertura vegetal.

Otro aspecto relevante es la gestión integral de residuos generados durante las operaciones de abandono. Estas actividades pueden producir residuos peligrosos, tales como lodos contaminados, materiales impregnados con hidrocarburos y residuos de cementación, los cuales deben ser manejados conforme a la normativa vigente en materia de residuos peligrosos, garantizando su tratamiento, transporte y disposición final de manera segura.

Adicionalmente, la legislación ambiental colombiana promueve el principio de responsabilidad ambiental del operador, según el cual las empresas deben asumir las consecuencias de los impactos generados por sus actividades y garantizar la restauración de los ecosistemas intervenidos. Este principio se articula con el enfoque de sostenibilidad que ha adquirido relevancia en el sector energético, donde el abandono de pozos se considera una etapa crítica para asegurar el cierre responsable de los proyectos.

En este contexto, el cumplimiento de la normativa ambiental no solo constituye una obligación legal, sino también un componente esencial para la gestión integral del abandono de pozos. La adecuada articulación entre los requisitos técnicos y ambientales permite reducir los riesgos asociados a estas operaciones y contribuye a la protección de los recursos naturales y al bienestar de las comunidades cercanas a las áreas de explotación petrolera.

Tabla 9. *Normatividad ambiental relevante para el abandono de pozos*

Instrumento	Entidad	Alcance
Licencia ambiental	ANLA / CAR	Autoriza y regula las actividades del proyecto
Plan de Manejo Ambiental (PMA)	Operador / ANLA	Define medidas de prevención, mitigación y compensación

Plan de abandono y restauración	Operador	Establece actividades de cierre y recuperación del área
Normativa de residuos peligrosos	MinAmbiente	Regula manejo, transporte y disposición de residuos
Seguimiento post-abandono	ANLA / CAR	Verificación de condiciones ambientales posteriores

Nota: Tomado con base en ANLA (2015); Contraloría General de la República (2023).

4.4 Responsabilidades legales e institucionales en el abandono de pozos

El abandono de pozos petroleros en Colombia constituye una actividad que involucra la participación de múltiples actores institucionales, cada uno con responsabilidades específicas en el ámbito técnico, ambiental y administrativo. La adecuada articulación entre estas entidades resulta fundamental para garantizar que las operaciones de abandono se ejecuten conforme a los estándares establecidos y que los riesgos asociados a estas actividades sean gestionados de manera integral.

Desde el punto de vista institucional, la gestión del abandono de pozos se enmarca en un esquema de gobernanza en el que intervienen principalmente el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y, en determinados casos, las autoridades ambientales regionales. Estas entidades cumplen funciones diferenciadas pero complementarias dentro del proceso de planificación, ejecución y seguimiento del abandono de pozos.

El Ministerio de Minas y Energía actúa como ente rector de la política energética del país y establece los lineamientos generales que orientan el desarrollo de las actividades del sector hidrocarburos. En este sentido, su rol se centra en la definición del marco normativo y en la

formulación de políticas públicas relacionadas con la gestión de los recursos naturales no renovables.

Por su parte, la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) desempeña un papel central en la administración de los recursos hidrocarburíferos y en la supervisión del cumplimiento de las obligaciones contractuales de los operadores. En el contexto del abandono de pozos, la ANH es responsable de verificar que las actividades de cierre se realicen conforme a los lineamientos técnicos establecidos y a las condiciones definidas en los contratos de exploración y producción. Esto incluye la revisión de los planes de abandono, la validación de los procedimientos técnicos y el seguimiento a la ejecución de las operaciones.

En el ámbito ambiental, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y las corporaciones autónomas regionales tienen la responsabilidad de supervisar el cumplimiento de las obligaciones ambientales asociadas al abandono de pozos. Estas entidades evalúan los planes de manejo ambiental, verifican la ejecución de las medidas de restauración y realizan seguimiento a las condiciones ambientales posteriores al cierre de las operaciones. Su intervención es clave para asegurar que el abandono no genere impactos negativos sobre los ecosistemas y las comunidades.

Desde la perspectiva del operador, las empresas responsables de la explotación de hidrocarburos tienen la obligación de planificar, ejecutar y documentar las actividades de abandono de acuerdo con los requisitos técnicos, ambientales y legales aplicables. Esta responsabilidad incluye la elaboración de estudios previos, la implementación de las operaciones de cierre, la verificación de la integridad del pozo y la restauración del área intervenida.

Adicionalmente, los operadores deben garantizar la disponibilidad de recursos técnicos y financieros para la ejecución de las actividades de abandono, lo que implica incorporar estos costos dentro de la planificación del ciclo de vida del proyecto. Este aspecto es particularmente relevante

en el contexto de campos maduros, donde el incremento de pozos inactivos puede generar presiones operativas y económicas para las empresas.

Un elemento fundamental dentro del marco de responsabilidades es el principio de responsabilidad extendida del operador, según el cual las empresas deben responder no solo por la ejecución de las actividades de abandono, sino también por los efectos que estas puedan generar a largo plazo. Este principio se refleja en la obligación de realizar monitoreo post-abandono y de implementar medidas correctivas en caso de que se identifiquen fallas en la integridad del pozo o impactos ambientales no previstos.

En términos operativos, las responsabilidades asociadas al abandono de pozos pueden organizarse en función de las diferentes fases del proceso: planeación, ejecución, verificación y post-abandono. Esta estructuración permite identificar de manera clara las obligaciones de cada actor y facilita la coordinación entre las entidades involucradas.

En conjunto, el marco institucional del abandono de pozos en Colombia refleja la necesidad de integrar diferentes dimensiones de gestión —técnica, ambiental y legal— bajo un enfoque coordinado. No obstante, la participación de múltiples entidades y la dispersión de responsabilidades pueden generar desafíos en términos de articulación y eficiencia, lo que refuerza la importancia de contar con herramientas que faciliten la comprensión y aplicación de este marco por parte de los operadores. En la tabla 10, se puede evidenciar un resumen de las responsabilidades de cada organismo.

Tabla 10. *Responsabilidades por fase del abandono de pozos en Colombia*

Fase	Actor principal	Responsabilidades
Planeación	Operador / ANH	Elaboración del plan de abandono, revisión técnica
Ejecución	Operador	Implementación de operaciones de cierre y sellado
Verificación	ANH / ANLA	Validación técnica y ambiental del abandono
Post-abandono	ANLA / Operador	Monitoreo ambiental y seguimiento de condiciones del sitio

Nota: Tomado con base en ANH (2020); ANLA (2015).

4.5 Matriz de cumplimiento técnico, ambiental y legal para el abandono de pozos

El análisis desarrollado en las secciones anteriores evidencia que el abandono de pozos en Colombia se encuentra regulado por un conjunto de disposiciones técnicas, ambientales y contractuales que, aunque robustas en su contenido, se presentan de manera dispersa en distintos instrumentos normativos. Esta fragmentación puede generar dificultades para los operadores al momento de interpretar e integrar los requisitos aplicables durante la planificación y ejecución de las actividades de abandono.

En este contexto, resulta pertinente estructurar una herramienta que permita articular de manera sistemática los principales requerimientos del marco normativo, facilitando su comprensión y aplicación en el ámbito operativo. La construcción de una matriz de cumplimiento constituye una estrategia metodológica que permite organizar la información normativa en función de las diferentes fases del abandono de pozos, integrando los aspectos técnicos, ambientales y legales en un solo esquema de referencia.

Este tipo de herramientas ha sido ampliamente utilizado en la gestión de proyectos industriales y en la implementación de sistemas de cumplimiento regulatorio, ya que permite identificar de manera clara las obligaciones aplicables, los responsables de su ejecución y los mecanismos de verificación asociados (International Energy Agency, 2021). En el caso específico del abandono de pozos, una matriz de cumplimiento facilita la planificación de las operaciones, mejora la trazabilidad de las actividades y contribuye a reducir el riesgo de incumplimiento normativo.

La matriz propuesta en esta investigación se estructura en función de las fases del proceso de abandono —planeación, ejecución, verificación y post-abandono—, y para cada una de ellas se identifican los principales requisitos técnicos, ambientales y legales que deben ser considerados por los operadores. Asimismo, se incluyen los actores responsables y los mecanismos de control o verificación que permiten asegurar el cumplimiento de dichos requisitos. En la tabla 11, se puede observar una matriz resumen o guía para la aprobación de distintas fases del abandono de pozos.

Tabla 11. *Matriz de cumplimiento para el abandono de pozos en Colombia*

Fase	Componente	Requisito	Entidad / Responsable	Mecanismo de verificación
Planeación	Técnico	Diseño del plan de abandono con criterios de integridad de pozo	Operador / ANH	Aprobación del plan
Planeación	Ambiental	Inclusión en PMA y plan de abandono ambiental	Operador / ANLA	Licencia ambiental
Planeación	Legal	Cumplimiento de obligaciones contractuales	Operador / ANH	Revisión contractual

Ejecución	Técnico	Instalación de barreras (cemento, tapones)	Operador	Registros operativos
Ejecución	Ambiental	Manejo de residuos y control de impactos	Operador	Reportes ambientales
Ejecución	Legal	Cumplimiento de condiciones de operación	Operador	Supervisión ANH
Verificación	Técnico	Pruebas de integridad del pozo	Operador / ANH	Ensayos de presión, logs
Verificación	Ambiental	Evaluación de restauración del área	ANLA / CAR	Inspecciones
Verificación	Legal	Validación del cierre del pozo	ANH	Acta de cierre
Post- abandono	Ambiental	Monitoreo de condiciones ambientales	Operador / ANLA	Informes periódicos
Post- abandono	Técnico	Seguimiento de integridad del pozo	Operador	Evaluaciones técnicas
Post- abandono	Legal	Cumplimiento de responsabilidades posteriores	Operador	Auditorías

Nota. Tomado con base en ANH (2020); ANLA (2015); International Energy Agency (2021).

4.6 Análisis de la matriz de cumplimiento

La matriz presentada permite evidenciar que el abandono de pozos no debe ser entendido como una actividad puntual, sino como un proceso estructurado en múltiples fases, en el cual intervienen diferentes dimensiones de gestión. Esta visión integral resulta fundamental para garantizar la efectividad de las operaciones de cierre y la sostenibilidad de sus resultados en el tiempo.

En particular, se observa que la fase de planeación adquiere un papel determinante, ya que en ella se definen los criterios técnicos y ambientales que orientarán las etapas posteriores del proceso. Una planificación deficiente puede traducirse en fallas durante la ejecución o en dificultades para verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos.

Por otra parte, la fase de verificación emerge como un elemento crítico para asegurar la calidad del abandono, dado que permite validar la efectividad de las barreras de aislamiento y el cumplimiento de las condiciones ambientales del sitio. La ausencia de mecanismos rigurosos de verificación ha sido identificada en la literatura como una de las principales causas de fallas en la integridad de pozos abandonados (Davies et al., 2014).

Finalmente, el componente de post-abandono introduce una perspectiva de largo plazo que resulta esencial para la gestión responsable de los activos petroleros. El monitoreo continuo de las condiciones del pozo y del entorno permite detectar posibles fallas y adoptar medidas correctivas oportunas, reduciendo el riesgo de generación de pasivos ambientales.

En conjunto, la matriz de cumplimiento constituye una herramienta que permite integrar de manera práctica los diferentes elementos del marco normativo analizado en este capítulo, facilitando su aplicación en el contexto operativo y sentando las bases para el desarrollo del manual técnico propuesto en esta investigación.

En síntesis, el abandono de pozos en Colombia se encuentra regulado por un marco normativo que integra disposiciones técnicas, ambientales y legales, cuya adecuada aplicación requiere un enfoque articulado y sistemático. La dispersión de estos lineamientos y la complejidad de su implementación en el contexto operativo evidencian la necesidad de herramientas que faciliten su integración. En este sentido, la matriz de cumplimiento desarrollada constituye un insumo fundamental para la estructuración del manual técnico propuesto, el cual será abordado en los capítulos siguientes.

5 Capítulo 3 - Técnicas, riesgos y criterios operacionales para el abandono de pozos

5.1 Introducción al abandono desde la perspectiva operativa

El abandono de pozos petroleros representa una de las etapas más críticas dentro del ciclo de vida de los activos de producción, no solo por su complejidad técnica, sino también por las implicaciones que tiene en términos de seguridad operativa, protección ambiental y cumplimiento regulatorio. A diferencia de otras fases del ciclo productivo, el abandono constituye una operación irreversible cuyo objetivo es garantizar el aislamiento permanente de las formaciones geológicas y eliminar cualquier riesgo de migración de fluidos hacia otras zonas del subsuelo o hacia la superficie (Khalifeh & Saasen, 2020).

Desde una perspectiva operativa, el abandono de pozos no debe entenderse como una actividad aislada al final de la vida útil del campo, sino como un proceso que requiere planificación anticipada, diseño técnico riguroso y ejecución controlada. En este sentido, la calidad de las decisiones adoptadas durante las etapas de perforación, completamiento y producción tiene una influencia directa sobre la complejidad y efectividad de las operaciones de abandono. Pozos con historiales operativos complejos, intervenciones múltiples o problemas de integridad pueden

presentar mayores desafíos durante su cierre, lo que incrementa los riesgos técnicos y los costos asociados a estas actividades (Davies et al., 2014).

Uno de los aspectos centrales del abandono desde el punto de vista operativo es la implementación de sistemas de barreras de aislamiento que permitan asegurar la integridad del pozo a largo plazo. Estas barreras deben diseñarse de manera que sean capaces de resistir las condiciones de presión, temperatura y composición de fluidos presentes en el subsuelo, garantizando la estabilidad del sistema incluso después de finalizadas las operaciones. En este contexto, el concepto de integridad de pozo adquiere un papel fundamental, ya que proporciona el marco técnico para evaluar la capacidad del pozo de contener fluidos durante y después del abandono (American Petroleum Institute, 2018).

Adicionalmente, las operaciones de abandono implican la ejecución de una serie de actividades secuenciales que incluyen la preparación del pozo, la instalación de tapones de aislamiento, la verificación de la efectividad de las barreras y el desmantelamiento de las instalaciones de superficie. Cada una de estas etapas requiere la coordinación de recursos técnicos, humanos y logísticos, así como el cumplimiento de procedimientos operativos estandarizados que permitan reducir la probabilidad de fallas durante la ejecución.

En este contexto, la gestión del abandono de pozos se encuentra estrechamente vinculada con la identificación y control de riesgos operacionales. Factores como la incertidumbre en las condiciones del subsuelo, la degradación de materiales, la presencia de presiones anómalas o la existencia de rutas de flujo no controladas pueden afectar la efectividad de las operaciones de cierre y generar eventos no deseados. Por esta razón, el abandono debe abordarse desde un enfoque preventivo, en el cual se priorice la evaluación de riesgos y la implementación de medidas de control desde las etapas tempranas de planificación.

En el ámbito internacional, la creciente complejidad de las operaciones de abandono y los costos asociados a estas actividades han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías, metodologías de diseño y enfoques de gestión orientados a mejorar la eficiencia y seguridad de los procesos de cierre de pozos. Estas tendencias reflejan la transición del abandono de pozos desde una actividad tradicionalmente considerada como operativa, hacia un componente estratégico dentro de la gestión integral de activos petroleros (International Energy Agency, 2021).

En el caso colombiano, este enfoque adquiere especial relevancia debido a la presencia de campos maduros, la existencia de pozos con diferentes condiciones de integridad y la necesidad de garantizar que las operaciones de abandono se realicen conforme a estándares que aseguren la protección de los recursos naturales y la seguridad de las comunidades. En este sentido, el análisis de las técnicas, riesgos y criterios operacionales asociados al abandono de pozos constituye un elemento fundamental para el desarrollo de herramientas que permitan mejorar la gestión de estas actividades en el contexto nacional.

5.2 Principios de integridad de pozo aplicados al abandono

La integridad de pozo constituye el principio fundamental sobre el cual se sustentan las operaciones de abandono en la industria petrolera. Este concepto se refiere a la capacidad del pozo para contener de manera segura los fluidos presentes en las formaciones geológicas, evitando su migración hacia otras zonas del subsuelo o hacia la superficie durante todas las etapas de su ciclo de vida, incluyendo su fase final de abandono (American Petroleum Institute, 2018).

En el contexto del abandono, la integridad de pozo adquiere una dimensión de largo plazo, ya que las barreras instaladas deben mantener su funcionalidad durante periodos extendidos de tiempo, incluso en ausencia de intervención humana. Esto implica que el diseño de las soluciones de abandono debe considerar no solo las condiciones actuales del pozo, sino también su

comportamiento futuro frente a procesos como degradación de materiales, cambios en las condiciones de presión y temperatura, y posibles interacciones químicas entre fluidos y formaciones (Khalifeh & Saasen, 2020).

5.2.1 Concepto de barreras de aislamiento

El principio central de la integridad de pozo se basa en la implementación de barreras de aislamiento, definidas como elementos físicos o combinaciones de elementos diseñados para prevenir la migración de fluidos. Estas barreras pueden ser de tipo mecánico, hidráulico o una combinación de ambas, y su función es garantizar el aislamiento entre diferentes zonas del pozo, tales como formaciones productoras, acuíferos y la superficie.

En operaciones de abandono, las barreras más utilizadas incluyen:

- **Tapones de cemento**, que proporcionan aislamiento hidráulico mediante la solidificación del material en el interior del pozo.
- **Barreras mecánicas**, como tapones recuperables o permanentes, que actúan como elementos de soporte adicional.
- **Cemento en el espacio anular**, que contribuye al aislamiento entre el revestimiento y la formación.

El diseño adecuado de estas barreras es esencial para asegurar que el pozo no se convierta en una vía de migración de fluidos una vez finalizadas las operaciones.

5.2.2 Filosofía de barreras múltiples

Uno de los principios más importantes en la ingeniería de abandono de pozos es la filosofía de barreras múltiples, la cual establece que no debe dependerse de una única barrera para garantizar

el aislamiento del pozo. En su lugar, se deben instalar múltiples barreras independientes, de manera que si una falla, las otras continúen cumpliendo la función de contención.

Este enfoque es ampliamente promovido por estándares internacionales y responde a la necesidad de reducir la probabilidad de fallas catastróficas. Las barreras deben cumplir con criterios de independencia, verificación y durabilidad, lo que implica que cada una debe ser capaz de funcionar de manera autónoma y ser verificable mediante pruebas técnicas (American Petroleum Institute, 2018).

En el contexto del abandono, la aplicación de barreras múltiples es especialmente crítica en zonas donde existe riesgo de migración de fluidos, tales como formaciones con presión diferencial significativa o presencia de gas.

5.2.3 Aislamiento zonal y control de migración de fluidos

El aislamiento zonal constituye uno de los objetivos principales del abandono de pozos. Este concepto se refiere a la capacidad de impedir la comunicación entre diferentes formaciones geológicas atravesadas por el pozo, evitando así la migración de fluidos entre zonas con distintas presiones o composiciones.

La falta de aislamiento adecuado puede generar fenómenos como:

- migración de gas hacia acuíferos
- flujo de fluidos hacia superficie
- contaminación de formaciones adyacentes

Estos procesos pueden ocurrir a través de diferentes rutas, incluyendo el interior del pozo, el espacio anular o incluso microcanales en el cemento. Estudios han demostrado que fallas en el aislamiento zonal representan una de las principales causas de problemas de integridad en pozos abandonados (Davies et al., 2014).

Por esta razón, el diseño de las barreras debe garantizar la continuidad del aislamiento a lo largo de toda la sección crítica del pozo, considerando tanto la geometría del sistema como las propiedades de los materiales utilizados.

5.2.4 Factores que afectan la integridad de las barreras

La efectividad de las barreras de abandono puede verse comprometida por diversos factores que actúan a lo largo del tiempo. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Degradación del cemento**, debido a procesos químicos como la carbonatación o la interacción con fluidos agresivos.
- **Corrosión del revestimiento (casing)**, que puede generar pérdida de integridad estructural.
- **Cambios en las condiciones de presión y temperatura**, que afectan la estabilidad de los materiales.
- **Deficiencias en la colocación del cemento**, que pueden generar canales de flujo.

Estos factores resaltan la importancia de un diseño robusto y de la selección adecuada de materiales, así como de la implementación de métodos de verificación que permitan identificar posibles fallas en las barreras instaladas

5.2.5 Integridad de pozo como criterio de diseño en abandono

En la actualidad, la integridad de pozo no solo se considera un requisito técnico, sino también un criterio de diseño que debe integrarse desde las etapas iniciales del ciclo de vida del pozo. Este enfoque implica que las decisiones tomadas durante la perforación y completamiento deben facilitar las operaciones de abandono futuro, reduciendo la complejidad técnica y los riesgos asociados.

En el contexto del abandono, la aplicación de criterios de integridad permite:

- definir la ubicación óptima de las barreras
- seleccionar materiales adecuados para condiciones específicas
- establecer métodos de verificación confiables
- garantizar la estabilidad del sistema a largo plazo

Este enfoque integral responde a la necesidad de gestionar el abandono de pozos como un proceso planificado y no como una actividad reactiva al final de la vida productiva.

5.3 Técnicas y métodos de abandono de pozos

Las técnicas de abandono de pozos constituyen el conjunto de procedimientos y soluciones de ingeniería orientadas a garantizar el aislamiento permanente de las formaciones geológicas atravesadas por el pozo. Estas técnicas se fundamentan en los principios de integridad de pozo previamente descritos y se materializan a través de la instalación de barreras de aislamiento que permitan prevenir la migración de fluidos en el subsuelo.

La selección de la técnica de abandono más adecuada depende de múltiples factores, entre los que se incluyen las condiciones mecánicas del pozo, las características del yacimiento, el historial operativo, la presencia de zonas productoras múltiples y los requerimientos regulatorios aplicables. En este sentido, no existe un único método de abandono, sino una combinación de estrategias que deben adaptarse a las condiciones específicas de cada pozo (Khalifeh & Saasen, 2020).

5.3.1 Clasificación técnica de los métodos de abandono

Desde una perspectiva operativa, los métodos de abandono pueden clasificarse en función de la complejidad de la intervención y del nivel de intervención sobre la infraestructura del pozo. En términos generales, se distinguen tres enfoques principales:

- **Abandono simple**, en el cual se instalan barreras sin necesidad de remover completamente el revestimiento.
- **Abandono con intervención mayor**, que implica operaciones adicionales como fresado de casing o recuperación de tuberías.
- **Abandono mediante seccionamiento del pozo**, donde se eliminan secciones completas del sistema para facilitar el aislamiento.

Esta clasificación permite definir el nivel de intervención requerido y los recursos técnicos necesarios para ejecutar el abandono de manera segura.

5.3.2 Técnicas de cementación para abandono

La cementación constituye la técnica más ampliamente utilizada en las operaciones de abandono de pozos, debido a su capacidad para generar barreras hidráulicas duraderas. Los tapones de cemento son instalados en secciones estratégicas del pozo con el objetivo de aislar formaciones, sellar zonas productoras y prevenir la migración de fluidos.

El diseño de los tapones de cemento debe considerar aspectos como:

- longitud del tapón
- ubicación dentro del pozo
- propiedades del cemento
- condiciones de presión y temperatura

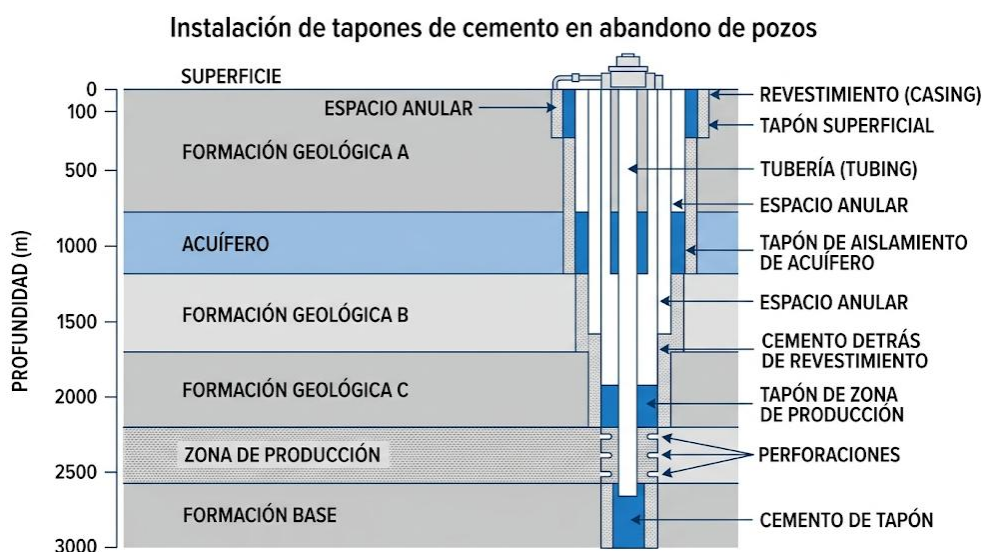
En particular, la longitud del tapón debe ser suficiente para garantizar la estabilidad mecánica y la continuidad del aislamiento, mientras que la ubicación debe definirse en función de las zonas críticas identificadas durante la evaluación del pozo.

Adicionalmente, el proceso de cementación debe asegurar una adecuada colocación del material, evitando la formación de canales o discontinuidades que puedan comprometer la

integridad de la barrera. Para ello, se utilizan técnicas como desplazamiento controlado, centralización del casing y acondicionamiento del pozo previo a la operación.

En la Ilustración 2, se puede observar un ejemplo o esquema de la forma en la que se utiliza un tapón de cemento para clausurar un pozo.

Figura 2. Esquema de instalación de tapones de cemento en un pozo



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.3.3 *Uso de barreras mecánicas en abandono*

Las barreras mecánicas constituyen un complemento a las barreras de cemento y son utilizadas para reforzar el sistema de aislamiento del pozo. Estas incluyen dispositivos como:

- tapones mecánicos permanentes
- packers
- válvulas de seguridad

Su función principal es proporcionar soporte estructural y actuar como elementos adicionales de contención en el sistema de barreras múltiples. En muchos casos, las barreras

mecánicas se combinan con tapones de cemento para mejorar la confiabilidad del sistema de aislamiento.

El uso de barreras mecánicas resulta particularmente útil en pozos con condiciones complejas, donde la cementación por sí sola no garantiza un aislamiento adecuado.

5.3.4 *Tecnologías emergentes en abandono de pozos*

En los últimos años, la industria ha desarrollado nuevas tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia y confiabilidad de las operaciones de abandono. Entre estas tecnologías se destacan:

- cementos especiales con mayor resistencia química
- resinas poliméricas para sellado
- materiales expansivos
- técnicas de sellado sin necesidad de remover casing

Estas innovaciones buscan abordar algunas de las limitaciones de los métodos tradicionales, particularmente en lo relacionado con la durabilidad de las barreras y la reducción de costos operativos. Asimismo, permiten intervenir pozos con condiciones complejas de manera más eficiente.

5.3.5 *Verificación de la efectividad de las barreras*

Una vez instaladas las barreras de abandono, es fundamental verificar su efectividad mediante pruebas que permitan confirmar el aislamiento del pozo. Esta etapa es crítica para asegurar que las operaciones de abandono han sido ejecutadas correctamente.

Entre los métodos de verificación más utilizados se encuentran:

- **Pruebas de presión**, para evaluar la capacidad de las barreras de soportar condiciones operativas

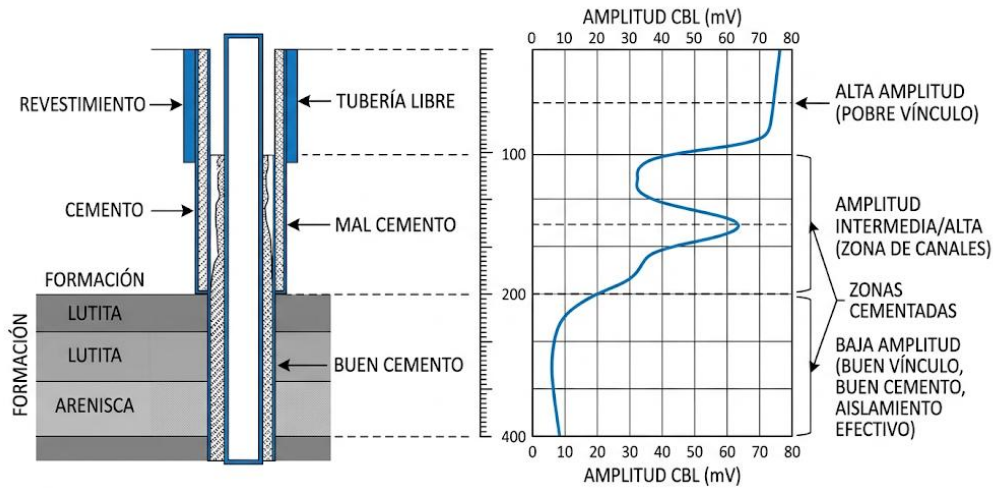
- **Registros de cementación (CBL, VDL)**, para verificar la calidad del cemento
- **Pruebas de integridad**, para confirmar el aislamiento zonal

La correcta ejecución de estas pruebas permite identificar posibles fallas en las barreras y adoptar medidas correctivas antes del cierre definitivo del pozo.

En la Ilustración 3, se puede evidenciar dicho método de prueba.

Figura 3. Ejemplo de registro de cementación (CBL) y evaluación de aislamiento zonal

Evaluación de aislamiento zonal mediante registro CBL



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.4 Procedimiento operativo de abandono de pozos

El abandono de pozos petroleros se ejecuta mediante una secuencia estructurada de actividades operativas orientadas a garantizar el aislamiento seguro del pozo y la eliminación de cualquier riesgo de migración de fluidos. Este procedimiento debe ser diseñado de manera específica para cada pozo, considerando sus condiciones mecánicas, su historial operativo y las características del yacimiento.

Desde una perspectiva operativa, el abandono de pozos puede dividirse en tres etapas principales: preparación del pozo, ejecución de las operaciones de abandono y verificación del

cierre. Cada una de estas fases involucra actividades críticas que deben ser ejecutadas bajo estrictos controles técnicos y operativos, con el fin de asegurar la integridad del sistema de barreras (Khalifeh & Saasen, 2020).

5.4.1 Preparación del pozo

La etapa de preparación constituye el punto de partida del proceso de abandono y tiene como objetivo acondicionar el pozo para la instalación de las barreras de aislamiento. Esta fase incluye la recopilación de información técnica, la evaluación del estado del pozo y la ejecución de operaciones preliminares.

Entre las actividades más relevantes se encuentran:

- **Revisión del historial del pozo**, incluyendo registros de perforación, completamiento y producción
- **Evaluación de integridad**, mediante registros y pruebas que permitan identificar posibles fallas en el revestimiento o en el cemento
- **Limpieza del pozo**, para remover residuos, incrustaciones o fluidos que puedan afectar la colocación de los tapones
- **Retiro de equipos de producción**, como tubing, válvulas y sistemas de levantamiento artificial

La adecuada ejecución de esta etapa es fundamental, ya que cualquier deficiencia en la preparación puede comprometer la calidad de las barreras instaladas en fases posteriores. En la ilustración 5, se puede evidenciar el acondicionamiento previo al abandono del pozo.

5.4.2 *Ejecución de las operaciones de abandono*

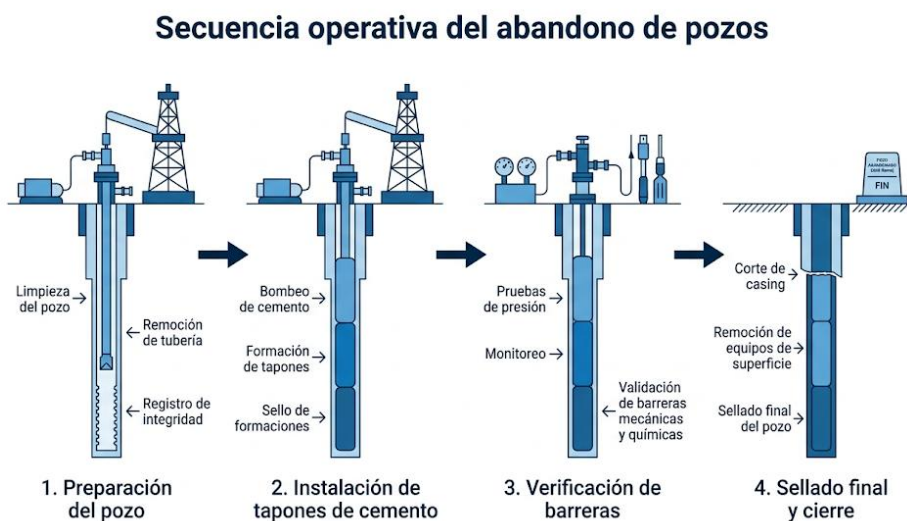
Una vez preparado el pozo, se procede a la ejecución de las operaciones de abandono, las cuales consisten principalmente en la instalación de barreras de aislamiento en puntos estratégicos del pozo.

Las actividades típicas incluyen:

- **Colocación de tapones de cemento**, en zonas productoras, acuíferos y cercanas a superficie
- **Instalación de barreras mecánicas**, cuando las condiciones del pozo lo requieren
- **Aislamiento de zonas críticas**, donde existe riesgo de migración de fluidos
- **Control de presión durante las operaciones**, para evitar eventos no deseados

La secuencia de instalación de los tapones debe definirse cuidadosamente, garantizando la continuidad del aislamiento y la independencia de las barreras. En este proceso, es esencial asegurar que las condiciones del pozo (presión, temperatura, limpieza) sean adecuadas para la correcta colocación del cemento.

Asimismo, la ejecución debe ser monitoreada en tiempo real para detectar cualquier anomalía que pueda comprometer la efectividad del abandono.

Figura 4. *Secuencia operativa de instalación de barreras de abandono*

Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.4.3 Verificación de las barreras y cierre del pozo

La etapa de verificación tiene como objetivo confirmar que las barreras instaladas cumplen con los criterios de integridad y aislamiento definidos en el diseño del abandono. Esta fase es crítica, ya que permite validar la calidad de las operaciones antes del cierre definitivo del pozo.

Entre las principales actividades de verificación se encuentran:

- **Pruebas de presión**, para evaluar la resistencia de las barreras
- **Registros de cementación**, para verificar la calidad del sellado
- **Evaluación de aislamiento zonal**, para confirmar la ausencia de comunicación entre formaciones

Una vez verificadas las condiciones de integridad, se procede al **cierre definitivo del pozo**, que incluye el sellado de la sección superficial, el corte del revestimiento y la instalación de marcadores o placas de identificación, según los requerimientos regulatorios.

5.4.4 *Desmantelamiento y restauración de superficie*

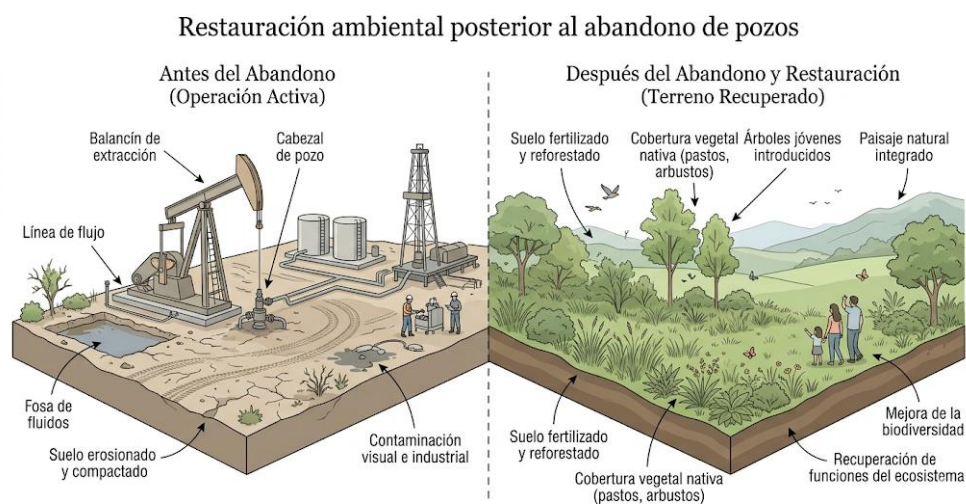
El abandono de pozos no se limita a las operaciones en el subsuelo, sino que también incluye la gestión de las instalaciones de superficie y la restauración del área intervenida.

Esta etapa contempla:

- Desmantelamiento de equipos de superficie
- Remoción de estructuras asociadas al pozo
- Gestión de residuos generados
- Rehabilitación del suelo y revegetalización

Estas actividades deben ejecutarse conforme a los lineamientos ambientales establecidos, garantizando que el área intervenida recupere condiciones similares a las existentes antes de la operación.

Figura 5. *Proceso de restauración ambiental posterior al abandono de pozos*



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.5 Riesgos operacionales en el abandono de pozos

Las operaciones de abandono de pozos, aunque planificadas y reguladas, están expuestas a una serie de riesgos operacionales que pueden comprometer tanto la seguridad del personal como la integridad del pozo y la efectividad de las barreras de aislamiento. Estos riesgos se derivan de la complejidad de las condiciones del subsuelo, la incertidumbre asociada al estado real del pozo y la naturaleza de las intervenciones requeridas durante el proceso de cierre.

A diferencia de otras fases del ciclo de vida del pozo, las operaciones de abandono suelen ejecutarse en condiciones donde la información disponible puede ser limitada o incompleta, especialmente en pozos antiguos o con historiales operativos extensos. Esta incertidumbre incrementa la probabilidad de eventos no deseados, lo que hace necesario adoptar un enfoque preventivo basado en la identificación, evaluación y control de riesgos (Khalifeh & Saasen, 2020).

5.5.1 *Clasificación de los riesgos operacionales*

Los riesgos asociados al abandono de pozos pueden clasificarse en función de su origen y naturaleza, distinguiéndose principalmente entre riesgos mecánicos, hidráulicos y operacionales.

- **Riesgos mecánicos**, relacionados con fallas en la integridad estructural del pozo, tales como colapso del casing, obstrucciones o dificultades en la recuperación de equipos.
- **Riesgos hidráulicos**, asociados a condiciones de presión no controladas, presencia de zonas con presión anómala o migración de fluidos durante las operaciones.
- **Riesgos operacionales**, derivados de errores en la ejecución de procedimientos, fallas en equipos o deficiencias en la planificación.

Esta clasificación permite estructurar el análisis de riesgos y definir estrategias de mitigación específicas para cada tipo de amenaza.

5.5.2 *Pérdida de control del pozo durante el abandono*

Uno de los riesgos más críticos durante las operaciones de abandono es la pérdida de control del pozo, la cual puede ocurrir cuando las presiones del subsuelo superan la capacidad de contención del sistema de control de superficie o cuando se generan rutas de flujo no controladas.

Este tipo de eventos puede presentarse durante:

- operaciones de limpieza del pozo
- retiro de tuberías
- colocación de tapones

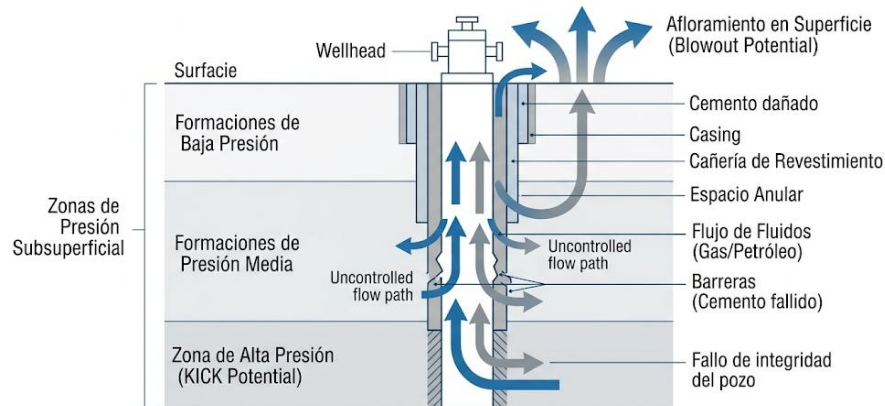
La pérdida de control del pozo puede derivar en eventos de mayor magnitud, como brotes (*kicks*) o incluso reventones (*blowouts*), lo que representa un riesgo significativo tanto para la seguridad operativa como para el medio ambiente.

Por esta razón, es fundamental mantener un control adecuado de la presión durante todas las etapas del abandono, utilizando fluidos de control y equipos de seguridad que permitan gestionar las condiciones del pozo de manera segura.

En la Ilustración 6, se puede evidenciar un ejemplo representativo de lo que sucede cuando se pierde el control del pozo durante operaciones de abandono.

Figura 6. Esquema conceptual de pérdida de control de pozo durante operaciones de abandono

Pérdida de control del pozo durante operaciones de abandono



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.5.3 Fallas en la colocación de barreras de aislamiento

Otro riesgo relevante corresponde a las fallas en la instalación de las barreras de aislamiento, particularmente en los procesos de cementación. Estas fallas pueden estar asociadas a:

- mala limpieza del pozo
- colocación inadecuada del cemento
- presencia de canales o microcanales
- diseño incorrecto del tapón

Cuando las barreras no cumplen su función de aislamiento, el pozo puede convertirse en una vía de migración de fluidos, lo que compromete la efectividad del abandono y puede generar impactos ambientales a largo plazo.

Este tipo de fallas suele ser difícil de detectar en etapas tempranas, lo que resalta la importancia de realizar pruebas de verificación rigurosas y de aplicar criterios técnicos adecuados durante el diseño de las barreras (Davies et al., 2014).

5.5.4 Incertidumbre en las condiciones del pozo

Las operaciones de abandono suelen enfrentarse a un alto grado de incertidumbre debido a la falta de información precisa sobre el estado actual del pozo. Esto es especialmente común en:

- pozos antiguos
- pozos con múltiples intervenciones
- pozos con registros incompletos

La incertidumbre puede afectar aspectos como:

- ubicación exacta de zonas productoras
- estado del cemento
- condiciones de presión

Esta situación puede derivar en decisiones operativas subóptimas y aumentar el riesgo de fallas durante el abandono.

5.5.5 Riesgos asociados a la intervención en pozos con problemas de integridad

Los pozos que presentan antecedentes de problemas de integridad, tales como fugas, corrosión o fallas en el revestimiento, representan un desafío adicional durante las operaciones de abandono. En estos casos, las intervenciones pueden agravar las condiciones del pozo si no se manejan adecuadamente.

Entre los principales riesgos se incluyen:

- apertura de nuevas rutas de flujo

- colapso de estructuras internas
- dificultad para instalar barreras efectivas

Estos escenarios requieren la aplicación de estrategias de intervención específicas y el uso de tecnologías avanzadas para garantizar el aislamiento del pozo. En la tabla 12, se consignó los posibles riesgos que se presentan en el proceso operación del abandono de pozos, esa se evidencia a continuación.

Tabla 12. *Principales riesgos operacionales en el abandono de pozos*

Tipo de riesgo	Descripción	Consecuencia
Mecánico	Fallas en casing o equipos	Dificultad operativa
Hidráulico	Presiones no controladas	Pérdida de control del pozo
Cementación	Fallas en barreras	Migración de fluidos
Operacional	Errores en ejecución	Fallas en abandono
Incertidumbre	Falta de información	Decisiones incorrectas

Nota. Tomado con base en Khalifeh & Saasen (2020); Davies et al. (2019).

5.6 Riesgos asociados a fallas en la integridad del pozo

Las fallas en la integridad del pozo representan uno de los principales factores de riesgo en las operaciones de abandono, debido a su potencial para generar migración no controlada de fluidos y comprometer la efectividad de las barreras de aislamiento. A diferencia de los riesgos operacionales, que se presentan durante la ejecución de las actividades, las fallas de integridad pueden manifestarse tanto durante el abandono como en etapas posteriores, incluso años después del cierre del pozo.

Desde una perspectiva técnica, la integridad del pozo depende de la capacidad del sistema de barreras —cemento, revestimiento y elementos mecánicos— para mantener el aislamiento entre las diferentes formaciones geológicas. Cuando alguno de estos elementos falla, se pueden generar rutas de flujo que permiten la migración de fluidos, lo que constituye la base de muchos de los eventos asociados a impactos ambientales y operacionales en pozos abandonados (Davies et al., 2014).

5.6.1 Mecanismos de falla en la integridad del pozo

Las fallas en la integridad del pozo pueden originarse a través de diferentes mecanismos, los cuales están asociados tanto a deficiencias en el diseño como a procesos de degradación a lo largo del tiempo. Entre los mecanismos más relevantes se encuentran:

- **Fallas en el cemento**, debido a mala colocación, presencia de microcanales o pérdida de adherencia con el casing y la formación.
- **Corrosión del revestimiento**, que puede generar perforaciones o debilitamiento estructural.
- **Degradación química de materiales**, especialmente en presencia de fluidos agresivos como CO₂ o H₂S.
- **Fallos en barreras mecánicas**, asociados a desgaste o instalación inadecuada.

Estos mecanismos pueden actuar de manera independiente o combinada, incrementando la complejidad del sistema de fallas y dificultando su detección y control.

5.6.2 *Rutas de migración de fluidos*

Uno de los aspectos más críticos asociados a las fallas de integridad es la generación de rutas de migración de fluidos, las cuales permiten el desplazamiento de gas o líquidos desde formaciones profundas hacia otras zonas del subsuelo o hacia la superficie.

Las principales rutas de migración incluyen:

- **Interior del pozo**, cuando las barreras internas fallan
- **Espacio anular**, debido a deficiencias en la cementación
- **Microcanales en el cemento**, que permiten flujo a través de discontinuidades
- **Interfaces formación–cemento**, donde puede existir pérdida de adherencia

La existencia de estas rutas representa un riesgo significativo, especialmente cuando involucran la migración de gas, ya que este puede desplazarse con facilidad a través de pequeñas discontinuidades, generando acumulaciones peligrosas en zonas cercanas a la superficie (Kang et al., 2014).

5.6.3 *Migración de gas y su impacto*

La migración de gas constituye uno de los fenómenos más relevantes asociados a fallas en la integridad del pozo, debido a su alta movilidad y a sus implicaciones en términos de seguridad y medio ambiente. Diversos estudios han documentado la presencia de emisiones de metano provenientes de pozos abandonados, lo que evidencia la existencia de fallas en los sistemas de aislamiento (Kang et al., 2014; Townsend-Small et al., 2016).

El metano, además de ser inflamable, es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono en horizontes de corto plazo. Por esta razón, la migración de gas desde pozos abandonados no solo representa un riesgo local, sino también una contribución al cambio climático.

5.6.4 *Fallas a largo plazo en pozos abandonados*

Una de las características más críticas de las fallas de integridad es su manifestación a largo plazo. A diferencia de los riesgos operacionales, que se presentan durante la ejecución de las actividades, las fallas de integridad pueden desarrollarse con el tiempo debido a procesos de envejecimiento de los materiales.

Entre los factores que influyen en este comportamiento se encuentran:

- cambios en las condiciones geomecánicas del subsuelo
- variaciones de presión en el yacimiento
- degradación progresiva del cemento
- corrosión continua del revestimiento

Este comportamiento resalta la importancia de diseñar sistemas de abandono que no solo sean efectivos en el corto plazo, sino que mantengan su funcionalidad durante décadas.

5.6.5 *Implicaciones para el diseño del abandono*

El análisis de los riesgos asociados a fallas de integridad tiene implicaciones directas sobre el diseño de las operaciones de abandono. En particular, refuerza la necesidad de:

- aplicar el principio de barreras múltiples
- seleccionar materiales resistentes a condiciones específicas
- ubicar barreras en zonas críticas
- implementar métodos de verificación confiables

Asimismo, destaca la importancia de incorporar criterios de durabilidad y confiabilidad en el diseño, con el fin de minimizar la probabilidad de fallas a largo plazo.

En la tabla 13, se relacionó las distintas consecuencias a los distintos tipos de fallas que se presentan en los pozos.

Tabla 13. *Modos de falla en la integridad del pozo y sus consecuencias*

Modo de falla	Descripción	Consecuencia
Canalización en cemento	Formación de vías de flujo	Migración de fluidos
Corrosión de casing	Pérdida de espesor del revestimiento	Fuga de fluidos
Fallo en barreras mecánicas	Pérdida de capacidad de contención	Comunicación entre zonas
Degradación química	Alteración de propiedades del cemento	Reducción de aislamiento

Nota. Tomado con base en Davies et al. (2019); Khalifeh & Saasen (2020)

5.7 Caso de estudio: Evento de pérdida de integridad del pozo Lizama 158

Uno de los eventos más relevantes en Colombia asociados a fallas en la integridad de pozos corresponde al incidente ocurrido en el pozo **Lizama 158**, ubicado en el campo Lizama, en el municipio de Barrancabermeja, en el año 2018. Este evento se caracterizó por la expulsión no controlada de fluidos desde el subsuelo hacia la superficie, generando impactos ambientales significativos en cuerpos de agua, suelos y ecosistemas circundantes.

Desde el punto de vista técnico, el evento del pozo Lizama 158 constituye un caso representativo de pérdida de integridad del pozo, en el cual se evidenció la existencia de rutas de migración de fluidos que permitieron la comunicación entre formaciones profundas y la superficie. Este tipo de comportamiento está directamente asociado a fallas en el sistema de barreras de aislamiento, tal como se analizó en la sección anterior.

5.7.1 *Caracterización técnica del evento*

El incidente se manifestó mediante la surgencia de fluidos en superficie, sin la presencia de un flujo controlado a través del sistema convencional del pozo, lo que indica la existencia de trayectorias de flujo alternativas dentro del sistema del pozo o en su entorno inmediato.

Este tipo de eventos suele estar relacionado con:

- fallas en el cemento del espacio anular
- pérdida de integridad del revestimiento
- presencia de canales de flujo no detectados
- comunicación entre formaciones con presión diferencial

La complejidad del evento radica en que la migración de fluidos no necesariamente ocurre a través del interior del pozo, sino que puede desplazarse a través de interfaces entre el cemento, el casing y la formación, lo que dificulta su control y mitigación.

5.7.2 *Mecanismos de falla asociados*

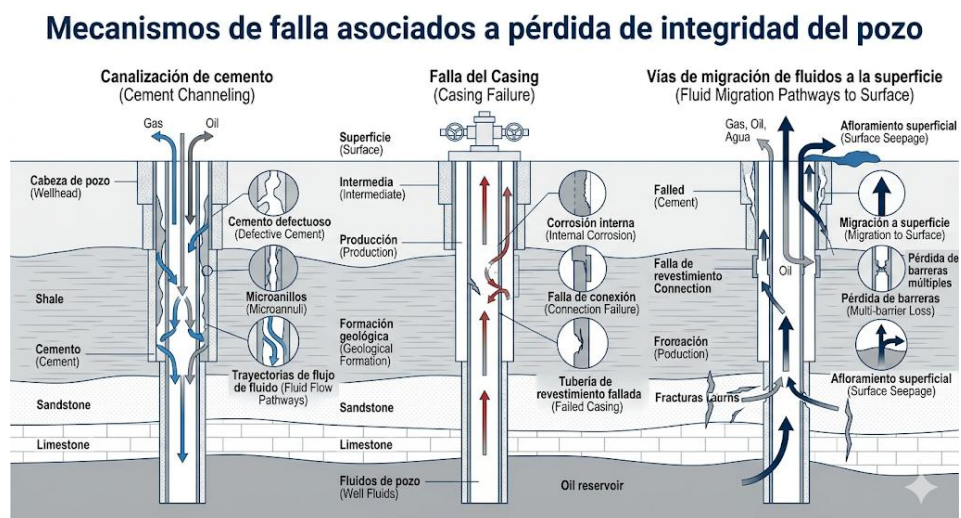
A partir del análisis técnico de este tipo de eventos y de la literatura especializada, es posible identificar varios mecanismos que pueden haber contribuido a la pérdida de integridad en el pozo Lizama 158:

- Canalización en el cemento**, generando vías de flujo vertical
- Degradación de la adherencia cemento–formación**, facilitando la migración de fluidos
- Corrosión o falla en el revestimiento**, creando puntos de fuga
- Presión diferencial entre formaciones**, que impulsa el flujo hacia zonas de menor presión

Estos mecanismos no actúan de manera aislada, sino que pueden presentarse de forma combinada, lo que incrementa la complejidad del sistema de fallas y dificulta su diagnóstico.

En la ilustración 7, se evidencia el esquema conceptual de los mecanismos de falla del pozo Lizama 158, donde se evidencia gráficamente el comportamiento de este.

Figura 7. Esquema conceptual de los posibles mecanismos de falla en el pozo Lizama 158



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

5.7.3 Impactos asociados al evento

El evento del pozo Lizama 158 generó una serie de impactos que evidencian las consecuencias de una falla en la integridad del pozo:

- **Contaminación de cuerpos de agua**, debido al arrastre de hidrocarburos
- **Afectación de suelos y ecosistemas**, en áreas cercanas al punto de surgencia
- **Impactos sobre fauna y flora**, asociados a la presencia de contaminantes
- **Riesgos para comunidades cercanas**, derivados de la exposición a fluidos y gases

Estos impactos reflejan la relación directa entre las fallas de integridad del pozo y la generación de pasivos ambientales, lo que refuerza la importancia de diseñar y ejecutar adecuadamente las operaciones de abandono.

5.7.4 *Relación con las fallas de integridad en abandono de pozos*

Aunque el evento del pozo Lizama 158 no corresponde estrictamente a una operación de abandono, su análisis resulta altamente relevante para este contexto, ya que pone en evidencia los riesgos asociados a la pérdida de integridad en pozos inactivos o en etapas cercanas al final de su vida productiva.

Este caso ilustra cómo la existencia de fallas en el sistema de barreras puede generar rutas de migración de fluidos que permanecen latentes durante largos periodos de tiempo y que pueden activarse bajo determinadas condiciones del subsuelo.

En este sentido, el evento refuerza la necesidad de:

- garantizar la calidad de las barreras de aislamiento
- implementar métodos rigurosos de verificación
- considerar el comportamiento a largo plazo del pozo
- incorporar criterios de integridad desde el diseño del abandono

5.7.5 *Lecciones aprendidas para la gestión del abandono de pozos*

El análisis del pozo Lizama 158 permite identificar una serie de lecciones que son directamente aplicables a la gestión del abandono de pozos:

- La integridad del pozo debe evaluarse de manera continua, incluso en pozos inactivos
- Las barreras de aislamiento deben diseñarse considerando escenarios de largo plazo
- La verificación de las barreras es un elemento crítico para prevenir fallas futuras
- La ausencia de control sobre rutas de flujo puede derivar en eventos de gran impacto

Estas lecciones resaltan la importancia de adoptar un enfoque preventivo y sistemático en las operaciones de abandono, basado en criterios técnicos sólidos y en la aplicación de mejores prácticas de la industria.

5.8 Gestión del riesgo en operaciones de abandono de pozos

La gestión del riesgo en las operaciones de abandono de pozos constituye un elemento fundamental para garantizar la seguridad operativa, la protección ambiental y la sostenibilidad de las intervenciones a largo plazo. Tal como se ha evidenciado en las secciones anteriores, los riesgos asociados al abandono no solo se limitan a la ejecución de las actividades, sino que pueden manifestarse posteriormente debido a fallas en la integridad del pozo, lo que hace necesario adoptar un enfoque integral y preventivo en su gestión.

Desde una perspectiva técnica, la gestión del riesgo implica la identificación sistemática de peligros, la evaluación de su probabilidad de ocurrencia y la estimación de sus posibles consecuencias. Este proceso permite priorizar los riesgos más críticos y definir medidas de control orientadas a reducir su impacto. En el contexto del abandono de pozos, este enfoque resulta especialmente relevante debido a la incertidumbre asociada a las condiciones del subsuelo y al estado real de las infraestructuras (Khalifeh & Saasen, 2020).

5.8.1 *Identificación y evaluación de riesgos*

El primer paso en la gestión del riesgo consiste en la identificación de los eventos potenciales que pueden afectar el desarrollo de las operaciones de abandono o comprometer la integridad del pozo. Esta identificación debe basarse en el análisis del historial del pozo, las condiciones geológicas y operativas, así como en la experiencia acumulada en casos similares.

Una vez identificados los riesgos, se procede a su evaluación mediante metodologías que permiten determinar su nivel de criticidad. Entre las herramientas más utilizadas en la industria se encuentran:

- **HAZID (Hazard Identification)**, para la identificación sistemática de peligros
- **Matrices de riesgo**, que relacionan probabilidad y consecuencia

- **Análisis cualitativos y cuantitativos**, dependiendo de la complejidad del caso

Estas metodologías permiten establecer una jerarquía de riesgos, facilitando la toma de decisiones durante la planificación del abandono.

5.8.2 Estrategias de mitigación y control

Una vez evaluados los riesgos, es necesario definir e implementar estrategias de mitigación que permitan reducir su probabilidad de ocurrencia o minimizar sus consecuencias. En el contexto del abandono de pozos, estas estrategias pueden incluir:

- **Diseño robusto de barreras**, aplicando el principio de barreras múltiples
- **Selección adecuada de materiales**, considerando condiciones del subsuelo
- **Aplicación de procedimientos operativos estandarizados**, para reducir errores
- **Monitoreo continuo durante la ejecución**, para detectar anomalías

Estas medidas deben integrarse dentro del plan de abandono y ser ejecutadas de manera sistemática para garantizar su efectividad.

5.8.3 Gestión del riesgo a largo plazo

Uno de los aspectos más relevantes en la gestión del abandono de pozos es la consideración de los riesgos a largo plazo. A diferencia de otras operaciones, el abandono implica dejar el pozo en condiciones de estabilidad permanente, lo que requiere asegurar que las barreras mantendrán su funcionalidad con el paso del tiempo.

En este sentido, la gestión del riesgo debe extenderse más allá de la ejecución de las operaciones, incorporando actividades de seguimiento y monitoreo post-abandono. Estas actividades permiten verificar el comportamiento del pozo y detectar posibles fallas antes de que generen impactos significativos.

La literatura técnica ha evidenciado que una proporción importante de los problemas asociados a pozos abandonados está relacionada con fallas que se desarrollan con el tiempo, lo que refuerza la necesidad de adoptar un enfoque de gestión basado en el ciclo de vida del pozo (Davies et al., 2014).

5.8.4 Integración de la gestión del riesgo en el proceso de abandono

La gestión del riesgo no debe considerarse como una actividad independiente, sino como un componente transversal que debe integrarse en todas las fases del abandono de pozos. Esto implica que:

- en la **planeación**, se identifiquen y evalúen los riesgos
- en la **ejecución**, se implementen medidas de control
- en la **verificación**, se validen las condiciones de seguridad
- en el **post-abandono**, se realice seguimiento continuo

Esta integración permite asegurar que las decisiones técnicas se tomen considerando no solo la viabilidad operativa, sino también los riesgos asociados a cada intervención.

Tabla 14. Matriz de gestión del riesgo en abandono de pozos

Riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de riesgo	Medida de control
Pérdida de control del pozo	Media	Alta	Alto	Control de presión, BOP
Fallas en cementación	Media	Alta	Alto	Verificación y diseño adecuado

Migración de gas	Baja	Alta	Alto	Barreras múltiples
Incertidumbre del pozo	Alta	Media	Alto	Evaluación previa
Corrosión a largo plazo	Media	Media	Medio	Selección de materiales

Nota. Tomado con base en Khalifeh & Saasen (2020); Davies et al. (2019).

En síntesis, el abandono de pozos petroleros constituye un proceso altamente técnico que requiere la integración de principios de integridad de pozo, técnicas de aislamiento, procedimientos operativos y estrategias de gestión del riesgo. El análisis desarrollado en este capítulo evidencia que las fallas en cualquiera de estos componentes pueden derivar en eventos de impacto significativo, como lo demuestra el caso del pozo Lizama 158. En este contexto, la adopción de enfoques sistemáticos y herramientas de gestión resulta fundamental para garantizar la efectividad de las operaciones de abandono. Sobre esta base, el siguiente capítulo presenta la propuesta de un manual integrado que busca consolidar criterios técnicos, ambientales y operativos para la gestión del abandono de pozos en Colombia.

6 Capítulo 4 - Manual integrado para el abandono de pozos de petróleo en Colombia

6.1 Introducción al manual

El abandono de pozos de petróleo constituye una operación crítica dentro del ciclo de vida de los activos de producción, debido a que de su correcta ejecución depende la protección del subsuelo, la prevención de pasivos ambientales y el cumplimiento de las obligaciones técnicas, ambientales y legales del operador. En el contexto colombiano, esta actividad exige la articulación

de criterios de integridad de pozo, procedimientos operativos estandarizados, medidas de gestión ambiental y mecanismos de verificación que permitan asegurar la estabilidad del pozo en el largo plazo.

El presente manual se formula como una herramienta de consulta y aplicación práctica para orientar la planeación, ejecución, verificación y cierre de operaciones de abandono de pozos en Colombia. Su propósito es consolidar en una estructura operativa única los principales lineamientos técnicos, ambientales y regulatorios aplicables, de manera que los responsables del proceso cuenten con una guía clara, secuencial y verificable para la toma de decisiones y la ejecución en campo.

Este manual está dirigido a ingenieros de petróleo, ingenieros de producción, supervisores de operaciones, personal técnico de abandono, consultores y profesionales responsables de la planeación y seguimiento del cierre de pozos. Su aplicación busca promover procesos de abandono técnicamente consistentes, ambientalmente responsables y trazables desde el punto de vista documental.

6.2 Sustentación metodológica y trazabilidad de la construcción del manual

La construcción del presente manual no se concibe como una recopilación aislada de recomendaciones técnicas, sino como el resultado aplicado del proceso investigativo desarrollado en la monografía. Su formulación se sustenta en la revisión, análisis e integración de la información técnica, ambiental y normativa abordada en los capítulos precedentes, los cuales permitieron identificar los principales elementos que intervienen en el abandono de pozos de petróleo en Colombia. En este sentido, la propuesta presentada en este capítulo mantiene una relación directa con el problema de investigación, con los objetivos formulados y con el desarrollo analítico que orientó el estudio.

La trazabilidad del manual se evidencia en la forma en que cada uno de sus componentes responde a los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación. En primer lugar, el análisis del contexto técnico, ambiental y regulatorio permitió justificar la necesidad de contar con una herramienta integrada para orientar estas operaciones. En segundo lugar, la revisión del marco normativo facilitó la identificación de obligaciones y lineamientos que debían incorporarse en la estructura del manual. Finalmente, el estudio de las técnicas de abandono, los principios de integridad de pozo, los riesgos operacionales y los criterios de verificación proporcionó la base para organizar una secuencia operativa coherente y aplicable al contexto colombiano.

Desde esta perspectiva, la sustentación académica del manual radica en que su contenido fue estructurado a partir de un proceso de síntesis y articulación metodológica de los hallazgos de la monografía. Por ello, sus etapas, criterios y herramientas operativas no surgen de manera independiente, sino de la integración de referentes técnicos, regulatorios y ambientales previamente analizados. Bajo este criterio, el manual se presenta como un producto académico derivado de la investigación documental realizada, cuya validez se apoya en la consistencia entre la revisión teórica, el análisis normativo y la propuesta práctica formulada.

6.3 Marco de aplicación del manual

El manual aplica principalmente a pozos terrestres de petróleo localizados en Colombia que se encuentren en alguna de las siguientes condiciones: pozos en declinación próximos al cierre, pozos suspendidos, pozos inactivos, pozos con requerimientos de abandono permanente y pozos que requieran intervención correctiva por fallas en su condición de aislamiento.

Su alcance cubre las fases de planeación, preparación del pozo, ejecución del abandono, verificación de la integridad de las barreras, cierre superficial, restauración del área y seguimiento post-abandono. No sustituye las obligaciones regulatorias establecidas por la ANH,

la ANLA ni los requerimientos contractuales del operador, sino que organiza su aplicación práctica dentro de un procedimiento técnico coherente.

El manual se fundamenta en principios de integridad de pozo, barreras múltiples, aislamiento zonal, gestión del riesgo y restauración ambiental. Su aplicación debe realizarse bajo el criterio técnico del equipo responsable, adaptando cada procedimiento a las condiciones particulares del pozo y del yacimiento.

6.4 Criterios técnicos para el abandono de pozos

Las operaciones de abandono deben diseñarse y ejecutarse bajo criterios que garanticen la integridad del pozo y la permanencia del aislamiento entre formaciones y superficie. Para tal efecto, se adoptan como criterios rectores los siguientes:

Integridad de pozo. El pozo debe mantener la capacidad de contener fluidos y evitar migraciones no controladas durante y después del abandono.

Barreras múltiples. El diseño del abandono debe contemplar barreras independientes y verificables, de manera que la falla de un elemento no comprometa el sistema completo.

Aislamiento zonal. Debe garantizarse la interrupción de cualquier posible comunicación entre formaciones productoras, acuíferos y superficie.

Selección técnica de materiales y métodos. La elección de tapones, cementos, barreras mecánicas y procedimientos de instalación debe responder al estado mecánico del pozo, a sus condiciones de presión y temperatura y al comportamiento esperado a largo plazo.

Verificación obligatoria. Ninguna barrera debe considerarse efectiva sin un proceso de verificación técnica que confirme su desempeño.

Enfoque de largo plazo. El abandono debe diseñarse considerando degradación de materiales, corrosión, cambios geomecánicos y estabilidad del sistema en el tiempo.

6.5 Procedimiento técnico de abandono de pozos

6.5.1 Estructura general del procedimiento

El abandono de pozos debe desarrollarse como un proceso secuencial y controlado, organizado en cinco etapas: planeación y diagnóstico, preparación del pozo, ejecución de las barreras, verificación de integridad y cierre con seguimiento post-abandono. Cada etapa debe completarse satisfactoriamente antes de avanzar a la siguiente, dejando evidencia documental suficiente para soportar la trazabilidad del proceso.

6.5.2 Etapa 1. Planeación y diagnóstico del pozo

La operación inicia con la consolidación de la información técnica e histórica del pozo. En esta etapa, el equipo responsable debe recopilar y analizar los registros de perforación, completamiento, producción, intervenciones previas, pruebas de presión, registros de cementación y antecedentes de integridad. El objetivo es construir un diagnóstico actualizado que permita definir la estrategia de abandono más adecuada.

Con base en esta revisión, se debe identificar la arquitectura del pozo, la ubicación de zonas productoras, acuíferos, intervalos con presión diferencial y cualquier evidencia de falla previa en casing, cemento o barreras mecánicas. Si la información es insuficiente o presenta incertidumbres críticas, deberán programarse registros adicionales y pruebas diagnósticas antes de aprobar el diseño del abandono.

Posteriormente, se debe establecer el tipo de abandono a ejecutar, definir las barreras requeridas, seleccionar los materiales de sellado y estructurar el programa operativo, incluyendo recursos, equipos, tiempos, riesgos y controles. Esta etapa concluye con la aprobación del plan técnico de abandono y del plan ambiental asociado.

6.5.3 Etapa 2. Preparación del pozo

Una vez aprobada la estrategia, se procede al acondicionamiento del pozo. Esta etapa tiene como finalidad dejar el sistema en condiciones seguras y operables para instalar las barreras de abandono. En primer lugar, debe asegurarse el control del pozo mediante la selección del fluido de control apropiado y la verificación de las condiciones de presión en superficie y subsuelo.

Luego se ejecuta la limpieza interna del pozo, removiendo residuos, incrustaciones, sólidos depositados y cualquier elemento que pueda interferir con la correcta colocación de los tapones. De forma complementaria, se deben retirar tubing, válvulas, accesorios y equipos de completamiento que no formen parte del diseño final de abandono.

Finalizada la limpieza y el retiro de equipos, el pozo debe quedar libre de obstrucciones y con acceso efectivo a las profundidades de interés. Si el diseño lo requiere, en esta fase se desarrollan registros de integridad, evaluación de cemento o pruebas adicionales para confirmar el estado del pozo antes de la instalación de barreras.

6.5.4 Etapa 3. Ejecución de las barreras de abandono

La ejecución del abandono corresponde a la instalación de las barreras definidas en el diseño. Esta etapa debe realizarse bajo control operativo estricto, asegurando que los materiales, equipos y parámetros de bombeo correspondan a las condiciones establecidas en el programa técnico.

El proceso inicia con la colocación de barreras en las zonas críticas del pozo, principalmente intervalos productivos, zonas con presión diferencial, acuíferos y secciones superiores próximas a superficie. Los tapones de cemento deben instalarse en posiciones y longitudes que garanticen continuidad hidráulica y estabilidad mecánica. Cuando el diseño lo requiera, se complementan con barreras mecánicas que mejoren la confiabilidad del sistema.

Durante la ejecución se deben monitorear volúmenes bombeados, presiones, retornos y comportamiento del pozo, con el fin de detectar oportunamente anomalías como pérdidas de circulación, fallas en el desplazamiento del cemento, inestabilidad de presión o dificultades en la colocación de tapones. Cualquier desviación significativa debe detener la operación y activar una revisión técnica antes de continuar.

La etapa concluye cuando todas las barreras planeadas han sido instaladas y existe evidencia operativa suficiente para proceder a su verificación.

6.5.5 Etapa 4. Verificación de integridad

Instaladas las barreras, se debe confirmar su efectividad mediante pruebas de verificación. Esta fase es obligatoria, ya que el abandono no puede considerarse técnicamente aceptado sin evidencia de que las barreras cumplen con su función de aislamiento.

Las actividades de verificación pueden incluir pruebas de presión sobre los tapones, registros de cementación, evaluación de aislamiento zonal y revisión de parámetros operativos observados durante la instalación. La selección de las pruebas dependerá del diseño de abandono y de las condiciones del pozo.

Si los resultados son satisfactorios, se valida la integridad del sistema y se autoriza el cierre definitivo. En caso contrario, deben programarse acciones correctivas, como recementación, instalación de barreras adicionales o repetición de pruebas, antes de avanzar a la etapa final.

6.5.6 Etapa 5. Cierre superficial y post-abandono

La fase final comprende el cierre físico del pozo en superficie, el desmantelamiento de las instalaciones y la restauración del área intervenida. En esta etapa se realiza el corte del casing a la profundidad establecida, el sellado superficial, la instalación de marcadores o placas de

identificación y el retiro de facilidades de producción, líneas, estructuras y demás equipos remanentes.

De manera paralela, se ejecutan las acciones de restauración ambiental del sitio, incluyendo nivelación del terreno, disposición de residuos, estabilización de áreas intervenidas y revegetalización, según corresponda al plan de manejo ambiental.

Cuando el contexto técnico y ambiental lo requiera, debe implementarse un programa de monitoreo post-abandono orientado a verificar la estabilidad del sitio y la ausencia de efectos posteriores, como emisión de gases, alteración de agua o inestabilidad del terreno.

Tabla 15. *Resumen del procedimiento técnico de abandono de pozos*

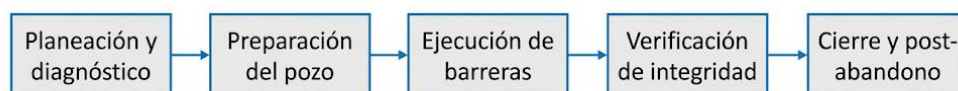
Etapa	Objetivo	Actividades principales	Producto esperado
Planeación y diagnóstico	Definir estrategia de abandono	Revisión histórica, evaluación de integridad, identificación de zonas críticas, selección de técnica	Plan técnico de abandono
Preparación del pozo	Acondicionar el pozo para intervención	Control del pozo, limpieza, retiro de equipos, registros complementarios	Pozo limpio y listo para intervención
Ejecución de barreras	Instalar el sistema de aislamiento	Colocación de tapones, barreras mecánicas, monitoreo operacional	Barreras instaladas
Verificación de integridad	Confirmar el desempeño de las barreras	Pruebas de presión, registros, validación técnica	Integridad confirmada

Cierre y post-abandono	Finalizar el abandono y restaurar el área	el Corte de casing, sellado superficial, y desmantelamiento, restauración y monitoreo	Pozo cerrado y área restaurada
-------------------------------	---	---	--------------------------------

Nota. Elaboración propia.

Figura 8. *Flujo general del procedimiento técnico de abandono de pozos*

Flujo general del procedimiento de abandono de pozos



Nota. Elaboración propia.

6.6 Criterios ambientales para el abandono de pozos

El abandono de pozos debe ejecutarse bajo un enfoque de prevención y control ambiental que garantice la protección de suelos, aguas superficiales, aguas subterráneas, aire, biodiversidad y comunidades cercanas. Estos criterios deben aplicarse desde la planeación hasta el seguimiento post-abandono.

En primer lugar, debe prevenirse cualquier migración no controlada de fluidos o gases mediante un diseño robusto de barreras. En segundo lugar, debe asegurarse el manejo integral de residuos, incluyendo residuos contaminados, fluidos de control, materiales de cementación, elementos impregnados con hidrocarburos y componentes retirados del pozo.

Asimismo, debe ejecutarse la restauración del área intervenida en concordancia con los instrumentos ambientales aplicables, incluyendo remoción de infraestructura, nivelación, recuperación de suelo y revegetalización. Cuando corresponda, debe incluirse monitoreo post-abandono para verificar el comportamiento del sitio y detectar oportunamente cualquier anomalía ambiental.

6.7 Cumplimiento normativo y legal

La ejecución del abandono debe garantizar el cumplimiento de los lineamientos técnicos, ambientales y contractuales aplicables al pozo y al proyecto. Para ello, el operador debe verificar que el programa de abandono esté alineado con los requerimientos de la ANH, con las obligaciones ambientales derivadas del instrumento de licenciamiento y con los compromisos contractuales y documentales vigentes.

El cumplimiento legal implica, como mínimo, contar con soporte documental del diseño del abandono, registro de las operaciones ejecutadas, evidencia de las pruebas de integridad, constancia del cierre superficial, trazabilidad del manejo ambiental y archivo técnico del pozo abandonado. El proceso debe ser verificable por las autoridades y por los sistemas internos de auditoría del operador.

6.8 Gestión del riesgo aplicada al abandono

La gestión del riesgo debe incorporarse como criterio transversal del manual. Cada pozo debe evaluarse en función de sus condiciones de integridad, complejidad operacional, presencia de acuíferos, incertidumbre de información, comportamiento de presión y antecedentes de falla.

Los riesgos deben identificarse antes de la operación, actualizarse durante la ejecución y revisarse después de la instalación de barreras. La gestión del riesgo incluye la definición de

controles operacionales, criterios de parada, acciones de contingencia y responsables de toma de decisión.

Tabla 16. *Matriz simplificada de control de riesgos durante el abandono*

Riesgo	Etapa en que puede presentarse	Control principal	Acción requerida
Pérdida de control del pozo	Preparación / ejecución	Fluido de control y control de presión	Suspender operación y estabilizar pozo
Falla en cementación	Ejecución	Diseño y monitoreo de colocación	Reevaluar e intervenir barrera
Información insuficiente del pozo	Planeación	Registros y diagnóstico adicional	No iniciar abandono hasta completar evaluación
Migración de fluidos	Verificación / post-abandono	Pruebas de integridad y monitoreo	Implementar corrección técnica
Manejo inadecuado de residuos	Cierre / restauración	Segregación y gestión autorizada	Corregir disposición y documentar

Nota. Elaboración propia.

6.9 Herramientas operativas del manual

6.9.1 Checklist de planeación del abandono

Antes de iniciar cualquier operación de abandono, el responsable técnico deberá verificar el cumplimiento de las siguientes condiciones:

Tabla 17. *Checklist de planeación del abandono*

Ítem	Verificación	Cumple	Observaciones
1	Se dispone del historial de perforación, completamiento y producción del pozo		
2	Se cuenta con evaluación actualizada de integridad del pozo		
3	Se identificaron zonas productoras, acuíferos y zonas críticas		
4	Se definió el tipo de abandono a ejecutar		
5	Se seleccionó la técnica de abandono acorde con el estado del pozo		
6	Se identificaron los riesgos operacionales y ambientales		
7	Se validó el cumplimiento normativo y ambiental aplicable		
8	Se aprobó el programa operativo de abandono		
9	Se definieron recursos, equipos y personal requerido		
10	Se cuenta con plan de contingencia para la operación		

Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

6.9.2 *Checklist de ejecución en campo*

Durante la ejecución del abandono, el supervisor de operación deberá verificar la siguiente secuencia:

Tabla 18. *Checklist de ejecución del abandono en campo*

Ítem	Actividad	Cumple	Observaciones
1	El pozo se encuentra bajo control antes de iniciar la intervención		
2	Se ejecutó limpieza interna del pozo		
3	Se retiraron tubing y equipos previstos en el programa		
4	Se verificó la profundidad libre para instalación de barreras		
5	Se colocaron los tapones de cemento conforme al diseño		
6	Se instalaron barreras mecánicas cuando el diseño lo requirió		
7	Se monitorearon presiones y volúmenes durante la operación		
8	Se registraron desviaciones operacionales y acciones correctivas		
9	Se completó la instalación de todas las barreras programadas		
10	Se preparó el pozo para la fase de verificación		

Nota. Elaboración propia.

6.9.3 *Checklist de verificación y cierre del pozo*

La aceptación técnica del abandono debe sustentarse en un proceso formal de verificación:

Tabla 19. *Checklist de verificación y cierre*

Ítem	Verificación	Cumple	Observaciones
1	Se realizaron pruebas de presión sobre las barreras instaladas		
2	Se ejecutaron registros de cementación cuando aplicó		
3	Se confirmó el aislamiento zonal del pozo		
4	La evidencia técnica soporta la integridad del abandono		
5	Se ejecutó el corte del casing y el sellado superficial		
6	Se instaló marcador o placa de identificación del pozo		
7	Se retiró la infraestructura de superficie programada		
8	Se gestionaron los residuos conforme a requisitos ambientales		
9	Se ejecutó la restauración del área intervenida		
10	Se archivó el informe final de abandono y cierre		

Nota. Elaboración propia.

6.9.4 *Formato mínimo de registro del abandono*

Tabla 20. *Formato mínimo de registro técnico del abandono*

Campo	Información requerida
Identificación del pozo	Nombre, código, campo, ubicación
Estado previo del pozo	Productor, suspendido, inactivo
Tipo de abandono	Temporal, permanente, parcial
Diagnóstico previo	Estado del casing, cemento, presión, riesgos

Barreras instaladas	Tipo, profundidad, longitud, material
Pruebas realizadas	Tipo de prueba, fecha, resultado
Cierre superficial	Método aplicado, profundidad de corte, sello
Gestión ambiental	Residuos, restauración, monitoreo
Responsables	Supervisor, ingeniero, interventor
Fecha de cierre	Fecha final del abandono

Nota. Elaboración propia.

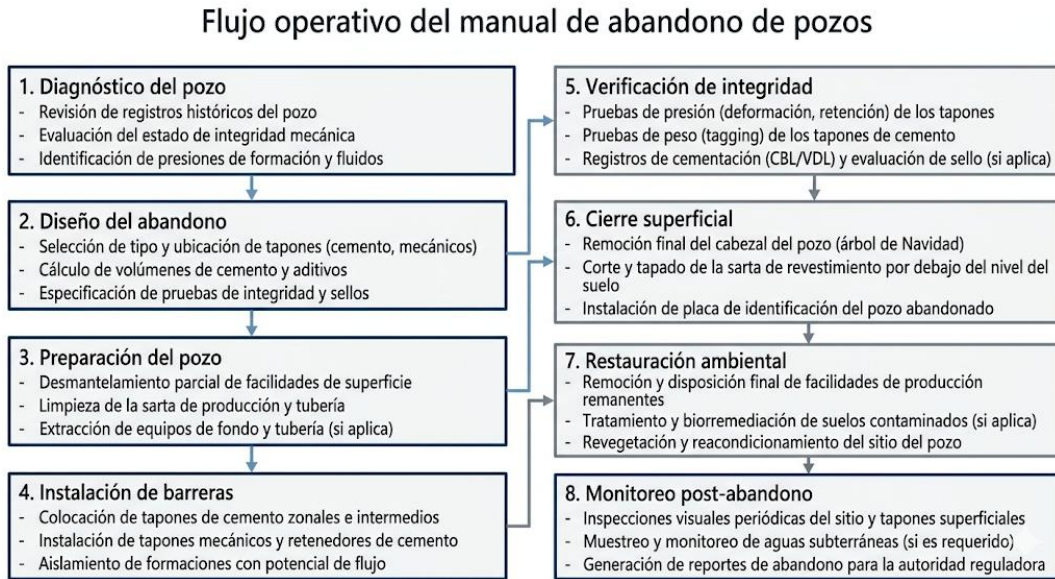
6.9.5 Criterio de decisión para aprobación del abandono

Tabla 21. *Criterio de decisión para aceptación técnica del abandono*

Condición evaluada	Resultado	Decisión
Barreras instaladas conforme al diseño	Sí	Continuar verificación
Pruebas de integridad satisfactorias	Sí	Aprobar cierre
Pruebas de integridad no satisfactorias	No	Corregir e intervenir
Evidencia ambiental completa	Sí	Aprobar restauración
Evidencia documental incompleta	No	No cerrar expediente

Nota. Elaboración propia.

Figura 9. Diagrama general del flujo de trabajo del manual



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

Figura 10. Mapa de procesos del manual de abandono de pozos



Nota. Elaboración propia con apoyo de IA.

6.10 Recomendaciones para implementación y actualización del manual

La implementación del presente manual requiere que cada operador lo adapte a sus condiciones operativas, a la naturaleza de sus activos y a su sistema de gestión documental y de riesgos. Para su aplicación efectiva, se recomienda:

- capacitar al personal responsable en integridad de pozo y abandono;
- integrar el manual con los procedimientos internos del operador;
- actualizar periódicamente los formatos y listas de verificación;
- revisar la vigencia normativa y contractual aplicable;
- incorporar lecciones aprendidas derivadas de eventos operacionales y auditorías;
- mantener trazabilidad documental completa de cada operación de abandono.

El manual debe entenderse como una herramienta dinámica, susceptible de mejora continua a partir de la experiencia operativa, el avance tecnológico y la evolución del marco regulatorio colombiano.

7 Conclusiones

La presente monografía permitió analizar de manera integral el abandono de pozos petroleros como una etapa crítica dentro del ciclo de vida de los campos de hidrocarburos, evidenciando que su adecuada ejecución no solo responde a requerimientos operativos, sino que constituye un elemento determinante en la prevención de impactos ambientales, la gestión de riesgos y la sostenibilidad de la actividad petrolera.

En primer lugar, se concluye que el abandono de pozos ha evolucionado a nivel global desde un enfoque operativo básico hacia un proceso altamente especializado, sustentado en principios de integridad de pozo, aislamiento zonal y aplicación de barreras múltiples. Este avance ha sido impulsado por la ocurrencia de fallas históricas en pozos abandonados, que han generado impactos ambientales significativos y han obligado a la industria a fortalecer sus estándares técnicos y regulatorios.

En este contexto, el análisis comparativo permitió evidenciar que, mientras en el ámbito internacional se han consolidado enfoques basados en riesgo, verificación rigurosa de barreras y control a largo plazo del comportamiento de los pozos, en Colombia aún persisten desafíos asociados a la gestión de información histórica, la heterogeneidad de condiciones de los pozos y la necesidad de fortalecer la articulación entre criterios técnicos, ambientales y regulatorios. Eventos como el ocurrido en el pozo Lizama evidencian la importancia de adoptar prácticas más robustas y preventivas en el abandono de pozos.

Desde el punto de vista técnico, se concluye que uno de los principales factores asociados a fallas en abandono corresponde a deficiencias en la caracterización del estado del pozo, la calidad del cemento y la verificación de las barreras. La ausencia de diagnósticos adecuados incrementa la incertidumbre y compromete la integridad del sistema en el largo plazo. En este sentido, la

aplicación del principio de barreras múltiples independientes y verificables se reafirma como un elemento esencial para garantizar el aislamiento efectivo.

Asimismo, se establece que el diseño del abandono debe fundamentarse en un análisis detallado del historial del pozo, sus condiciones mecánicas y su comportamiento de presión, permitiendo seleccionar técnicas de aislamiento acordes con las condiciones reales del sistema. La verificación de las barreras mediante pruebas técnicas constituye un requisito indispensable para validar la efectividad del abandono.

Desde el enfoque ambiental, el abandono de pozos se consolida como una actividad con implicaciones directas sobre la protección de recursos hídricos, suelos y ecosistemas. Se evidencia que una ejecución inadecuada puede generar impactos persistentes, lo que resalta la necesidad de integrar criterios ambientales desde la planeación hasta el monitoreo post-abandono, incluyendo la restauración del área intervenida y la gestión adecuada de residuos.

Uno de los principales aportes de la monografía corresponde al desarrollo de un manual integrado para el abandono de pozos en Colombia, el cual traduce los fundamentos técnicos, ambientales y normativos en una herramienta operativa estructurada. Este manual organiza el proceso en etapas secuenciales, incorporando criterios de decisión, verificación y control, así como listas de chequeo que facilitan su aplicación en campo y fortalecen la trazabilidad de las operaciones.

El manual propuesto representa un avance frente a enfoques tradicionales, al proporcionar una herramienta práctica que contribuye a reducir la incertidumbre operativa, mejorar la calidad de la ejecución y asegurar el cumplimiento de estándares técnicos y ambientales. Su implementación puede aportar a la reducción de riesgos asociados al abandono de pozos y a la prevención de pasivos ambientales en el país.

Finalmente, se concluye que el abandono de pozos debe ser entendido como una fase estratégica dentro de la gestión de activos petroleros. La adopción de enfoques estructurados, basados en verificación y control, como el propuesto en esta investigación, resulta fundamental para avanzar hacia una gestión más segura, responsable y alineada con las tendencias globales de la industria.

8 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión del abandono de pozos en Colombia:

En primer lugar, se recomienda a las compañías operadoras fortalecer los procesos de caracterización y diagnóstico de los pozos previo al abandono, asegurando la disponibilidad de información confiable sobre el estado del casing, la calidad del cemento y las condiciones de presión. La reducción de incertidumbre técnica en esta etapa es fundamental para la adecuada selección de las estrategias de abandono.

En segundo lugar, se sugiere adoptar de manera sistemática enfoques basados en gestión del riesgo, similares a los implementados a nivel internacional, que permitan priorizar intervenciones, optimizar recursos y enfocar los esfuerzos en pozos con mayor probabilidad de falla o impacto ambiental.

Adicionalmente, se recomienda fortalecer los procesos de verificación de barreras, incorporando pruebas técnicas rigurosas como requisito obligatorio antes de la aceptación del abandono. La verificación debe ser entendida como un componente esencial del proceso y no como una etapa opcional.

Desde el ámbito ambiental, se propone reforzar la integración de criterios ambientales en todas las etapas del abandono, incluyendo la planeación, ejecución y monitoreo post-abandono. Esto implica no solo cumplir con los requisitos regulatorios, sino adoptar un enfoque preventivo orientado a minimizar la generación de pasivos ambientales.

En el contexto institucional, se recomienda avanzar en la consolidación de lineamientos técnicos más homogéneos y estandarizados a nivel nacional, que permitan alinear las prácticas de la industria con estándares internacionales y reducir la variabilidad en la ejecución de abandonos.

Asimismo, se considera pertinente promover la implementación de herramientas operativas, como el manual desarrollado en esta monografía, que faciliten la estandarización de procesos, mejoren la trazabilidad de las operaciones y fortalezcan la toma de decisiones en campo.

Finalmente, se recomienda desarrollar futuras investigaciones orientadas a la evaluación del comportamiento a largo plazo de pozos abandonados en Colombia, así como al análisis de nuevas tecnologías de aislamiento y monitoreo, con el fin de continuar fortaleciendo la gestión del abandono desde un enfoque técnico, ambiental y sostenible.

Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2020). *Lineamientos para el abandono de pozos y desmantelamiento de instalaciones en actividades de exploración y producción de hidrocarburos en Colombia*. ANH.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2024). *Circular No. 0002 del 16-01-2024. Actualización de la información relacionada con pozos inactivos y de los cronogramas de reactivación o abandono*. ANH.
- Ahmed, T. (2010). *Reservoir engineering handbook* (4th ed.). Gulf Professional Publishing.
- American Petroleum Institute (API). (2018). *API recommended practice 65: Cementing shallow water flow zones* (3rd ed.). API Publishing.
- Contraloría General de la República. (2023). *Informe de auditoría al sector de hidrocarburos sobre pasivos ambientales y abandono de pozos en Colombia*. Contraloría General de la República.
- Dahmani, L., & Hynes, L. (2017). Enhancing well construction for more efficient well abandonment. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, 17-19 October 2017.
- Davies, R. J., Almond, S., Ward, R. S., Jackson, R. B., Adams, C., Worrall, F., Herringshaw, L. G., Gluyas, J. G., & Whitehead, M. A. (2014). Oil and gas wells and their integrity: Implications for shale and unconventional resource exploitation. *Marine and Petroleum Geology*, *56*, 239-254. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.001>
- Economides, M. J., Hill, A. D., & Ehlig-Economides, C. (2013). *Petroleum production systems* (2nd ed.). Pearson Education.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Curtailing methane emissions from fossil fuel operations*. IEA.
- Jackson, R. B., Vengosh, A., Darrah, T. H., Warner, N. R., Down, A., Poreda, R. J., Osborn, S. G., Zhao, K., & Karr, J. D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(28), 11250-11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
- Kang, M., Jackson, R. B., Mauzerall, D. L., Elsworth, D., Chen, Y., & Vengosh, A. (2014). Direct measurements of methane emissions from abandoned oil and gas wells in Pennsylvania. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(51), 18173-18177. <https://doi.org/10.1073/pnas.1408315111>

- Khalifeh, M., & Saasen, A. (2020). *Introduction to permanent plugging and abandonment of wells*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39925-9>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Informe de recursos y reservas con corte diciembre de 2022, insumo para la transición energética justa en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía.
- Oil & Gas UK. (2018). *Guidelines for the abandonment of wells*. Oil & Gas UK.
- Periódico UNAL. (2023, marzo 25). *Cerrar pozos petroleros abandonados costaría más que su operación*. Universidad Nacional de Colombia. <https://periodico.unal.edu.co>
- Townsend-Small, A., Ferrara, T. W., Lyon, D. R., Fries, A. E., & Lamb, B. K. (2016). Emissions of coalbed methane from abandoned oil and gas wells in the United States. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 2283-2290. <https://doi.org/10.1002/2015GL067623>