

IDENTIFICACIÓN, EVALUACIÓN Y MANEJO DE RIESGOS GEOLÓGICOS  
SOMEROS PARA LA PERFORACIÓN COSTA AFUERA. (GEOHAZARDS Y  
SHALLOW HAZARDS)

FREDY LÓPEZ MEDINA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2012

IDENTIFICACIÓN, EVALUACIÓN Y MANEJO DE RIESGOS GEOLÓGICOS  
SOMEROS PARA LA PERFORACIÓN COSTA AFUERA. (GEOHAZARDS Y  
SHALLOW HAZARDS)

FREDY LÓPEZMEDINA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

MSc. HEBENLY CELIS LEGUIZAMO  
DIRECTORA

MSc. ALEXANDER MARTINEZ RAMIREZ  
CO-DIRECTOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2012

## DEDICATORIA

*A mi madre Ana Delfina Medina de López, y a mi padre Pablo Antonio López por brindarme el apoyo en todos los sentidos durante el desarrollo de mi proyecto universitario, por sus sabios consejos y por la vida.*

*A mis hermanos: Efrén, Henry Antonio, Rigoberto, Ángel Yesid, Flor María y Luz Neira por su cariño, por su apoyo, por el compañerismo, por la unidad familiar, por creer y confiar en mis capacidades.*

*A mi familia en general: sobrinos, sobrinas, cuñadas, abuelos, tíos y demás por el apoyo y confianza depositada en mí para que este proyecto se hiciera realidad.*

*A toda la comunidad de Encino, mi pueblo natal a que le debo mi formación inicial y las enseñanzas primarias que me permitieron visionarme para alcanzar lo que hoy, para mi es una meta cumplida.*

*A mis mejores amigos de la Universidad Industrial de Santander, en especial a Miguel Ángel Fuentes Bonilla, Fredy Andrés Reyes Sánchez, Diego F, Víctor Hugo, Eliana K, Katherine L, Genny, Ambrosio G, Ingrid C, Raúl A Puesme, Carlos Barrera y demás compañeros que tuvimos el honor y la gracia de compartir grandes momentos.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Universidad Industrial de Santander por ofrecerme las Becas de Estudiante Distinguido, Residencias Universitarias y Comedores que me permitieron terminar satisfactoriamente mi carrera.*

*Al Club Rotario Internacional, FONEDUCAR Bucaramanga, Socorro Huella Comunera, por la confianza y colaboración a cada semestre.*

*A mis compañeros de Residencias Universitarias, especialmente durante el periodo 2009-2012 por la gran enseñanza, la experiencia en liderazgo y por los momentos compartidos.*

*Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozos GIEP, Al Magister y Codirector de esta tesis Alexander Martínez por su continua orientación y ayuda.*

*A la Magister Hebenly Celis por su orientación desde la Dirección de este proyecto, a todos los profesionales de la Escuela de Ingeniería de petróleos de la UIS.*

*A la Familia Guardón Gonzales por su hospitalidad, colaboración, los sabios consejos en la etapa inicial de mi carrera universitaria.*

*A la asociación de Egresados de la Universidad Industrial de Santander ASEDUIS-Caño Limón por el aporte y colaboración en los últimos semestres de mi carrera Universitaria.*

*A la Universidad Industrial de Santander sede Socorro y su planta de profesores, por la colaboración y ayuda durante la el ciclo básico de mi formación Ingenieril.*

# TABLA DE CONTENIDO

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	24
1 ESTADO DEL ARTE	26
2 BASES TEÓRICAS Y DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	30
3 RIESGOS GEOLÓGICOS	41
3.1 GENERALIDADES	41
3.2 RIESGOS A NIVEL DEL MAR.	46
3.2.1 Mareas altas	47
3.2.2 Tormentas	48
3.2.3 Huracanes	49
3.2.4 Tsunamis	50
3.2.5 Corrientes marinas	52
3.2.5.1 Batimetría.	56
3.2.5.2 Efecto Coriolis.	58
3.2.5.3 Viento geostrófico:	58
3.2.5.4 Principales mecanismos que impulsan las corrientes oceánicas	61
3.2.5.5 Corrientes impulsadas por gradientes de densidad.	61
3.2.5.6 Corrientes de mareas.	62
3.2.5.7 Corrientes impulsadas por el viento.	64
3.3 RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL LECHO MARINO	67
3.3.1 Fallas Escarpadas	70
3.3.2 Ventanas de gas	71
3.3.3 Volcán de Lodo	74
3.3.4 Inestabilidad de Taludes	76
3.3.5 Avalanchas	80
3.3.6 Otros	82

3.4	RIESGOS SOMEROS (SHALLOW HAZARDS)	85
3.4.1	Hidratos de Gas	89
3.4.2	Shallow Water Flow SWF (Flujos de Agua Somera)	101
3.4.2.1	Generalidades de los SWF	103
3.4.2.2	Mecanismos de formación de SWF en arenas	104
3.4.2.3	Principales problemas asociados a SWF	105
3.4.2.4	Dificultades presentes en el flujo de aguas someras	105
3.4.3	Shallow Gas Flow SWF (Flujos de Gas Somero)	109
3.4.4	Domos salinos	114
3.4.4.1	Riesgos potenciales de perforación en la sal y sus adyacencias	117
3.4.4.2	Problemas potenciales de perforación en la sal y sus adyacencias.	118
3.4.4.3	Sarta de Revestimiento y Desplazamiento del pozo.	119
3.4.5	Anomalías de Sobrepresión	121
3.4.6	Terremotos	125
3.5	RIESGOS ARTIFICIALES	126
4	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICO	128
4.1	GENERALIDADES	128
4.2	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS A NIVEL DEL MAR	139
4.2.1	Generalidades	139
4.2.2	Tormentas, mareas altas y corrientes marinas	140
4.2.3	Tsunamis y Terremotos	152
4.3	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN FONDO MARINO	155
4.3.1	Generalidades	155
4.3.2	Fallas Escarpadas	156
4.3.3	Ventanas de gas	157
4.3.4	Volcanes de lodo	159
4.3.5	Inestabilidad de Taludes	163
4.3.6	Avalanchas	164
4.3.7	Otros	169
4.4	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS A PROFUNDIDADES SOMERAS	172
4.4.1	Generalidades	172
4.4.2	Hidratos de Gas	172
4.4.3	Shallow Water Flow (SWF)	178

4.4.4	Shallow Gas Flow (SGF)	187
4.4.5	Domos Salinos	191
4.4.6	Anomalías de Sobrepresión	199
4.5	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS ARTIFICIALES	203
5	ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS	204
5.1	GENERALIDADES	204
5.2	ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	211
5.2.1	Aproximaciones de modelado y simplificaciones	211
5.2.2	Análisis Determinístico	212
5.2.2.1	Predicción / análisis de esfuerzos efectivos y las condiciones de presión de poro	214
5.2.2.2	Respuesta a terremotos in situ y reducción de esfuerzos	216
5.2.2.3	Análisis de estabilidad de taludes	217
5.2.2.4	Limites de Equilibrio	218
5.2.2.5	Análisis de técnicas numéricas como Elementos Finitos	219
5.2.2.6	Ablandamiento del terreno	220
5.2.2.7	Análisis de fallas progresivas	220
5.2.2.8	Análisis de deslizamientos retrogrado	221
5.2.2.9	Análisis computacional de la dinámica de fluidos.	223
5.2.3	Análisis probabilístico	223
5.2.4	Probabilidad anual de falla	225
5.3	ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS	228
5.3.1	Método sistemático	229
5.3.2	Área de extensión de estabilidad del fondo marino	230
5.3.3	Fuerzas de las avalanchas sobre las estructuras	230
5.3.4	Vulnerabilidad de estructuras y sistemas	231
5.3.5	Generación de Tsunamis	231
5.4	EVALUACIÓN DE RIESGOS	232
5.4.1	Evaluación de riesgos geológicos a nivel del mar	233
5.4.2	Evaluación de riesgos geológicos en fondo marino	234
5.4.3	Evaluación de riesgos geológicos a profundidades someras	234
5.4.4	Evaluación de riesgos artificiales	235
6	CONTROL, MITIGACIÓN Y MANEJO DE RIESGOS GEOLÓGICOS	237
	CONCLUSIONES	248

RECOMENDACIONES	252
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	254

# LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

FIGURA 1: Estructura del análisis de Riesgos NORSOK Z-013 (2001) .....	28
FIGURA 2: Esquema general de los riesgos Geológicos (Geohazards).....	41
FIGURA 3: Representación de los 4 tipos de riesgos geológicos.....	42
FIGURA 4: Mapa Mundial de riesgos sísmicos.....	43
FIGURA 5: Diagrama de secuencia de las etapas del proyecto de análisis y evaluación de riesgos geológicos. ....	44
FIGURA 6: Etapas del análisis de riesgos geológicos asociados a la perforación Offshore. ....	45
FIGURA 7: Procedimiento esquemático de las etapas, identificar lugar, caracterizar riesgos, hacer mediciones, interpretarlos y mitigarlos.....	46
FIGURA 8: Riesgos geológicos en el lecho marino. ....	47
FIGURA 9: Mareas altas que alcanzan 18,5 ft de altura.....	48
FIGURA 10: Enorme ola generada de una tormenta afecta la estabilidad de la plataforma.....	49
FIGURA 11: Plataforma petrolífera en Paramaribo en medio de una Huracán .....	49
FIGURA 12: Representación gráfica del Tsunami ocurrido en Japón 2004.....	50
FIGURA 13: Generación de Tsunamis por convergencia o divergencia de placas tectónicas.....	51
FIGURA 14: Mapa mundial de pendientes submarinas generadas por ondas oceánicas.....	52
FIGURA 15: Corrientes Oceánicas frías y calientes. ....	53
FIGURA 16: Forzamiento dinámico en la superficie oceánica.....	54
FIGURA 17: Patrones globales del viento. ....	55
FIGURA 18: Factores que modifican las corrientes costeras. ....	55
FIGURA 19: Instrumentos acústicos que se utilizan para mapear los fondos marinos. ....	56
FIGURA 20: Metodología para construir mapas batimétricos a partir de la batimetría.....	57
FIGURA 21: Efecto de coriolis a nivel global. ....	58
FIGURA 22: Viento geostrófico ideal dado por el equilibrio entre la fuerza de coriolis y el gradiente de presión.....	59

FIGURA 23: Sección del globo con vientos y corrientes producidas por el giro de la tierra sin continentes.....	60
FIGURA 24: Sección del globo con vientos y corrientes producidas por el giro de la tierra con continentes.....	60
FIGURA 25: principales mecanismos que impulsan las corrientes oceánicas.....	61
FIGURA 26: Secuencia de la representación ideal de una corriente de densidad.....	63
FIGURA 27: Corrientes de marea producidas por la atracción de la luna. ....	64
FIGURA 28: Representación de las corrientes impulsadas por el viento que afectan el Caribe Colombiano.....	65
FIGURA 29: Isocurvas de velocidad de las corrientes oceánicas en el Caribe Colombiano.....	66
FIGURA 30: Mapa mundial de distribución de los deltas de los ríos. ....	70
FIGURA 31: Movimiento Ascendente de material en un escarpe de falla. ....	71
FIGURA 32: Mapa mundial de distribución de los eventos de falla en escarpes o pendientes submarinos.....	72
FIGURA 33: Formación de la ventana de gas a partir del Hidratos. ....	73
FIGURA 34: Montículo de la salida de gas a través de las ventanas. ....	73
FIGURA 35: Burbuja de gas en un volcán de lodo Rumania. ....	75
FIGURA 36: Grupo de Volcanes de Lodo en el Campo Troll, Mar de Noruega. ....	76
FIGURA 37: Mapa mundial donde se destaca la presencia de volcanes de lodo.....	77
FIGURA 38: Caída de Rocas Submarinas.....	78
FIGURA 39: Deslizamiento y depresiones.....	79
FIGURA 40: Flujo Submarino de sedimentos. ....	79
FIGURA 41: Flujo Submarino de Turbaditas. ....	80
FIGURA 42: Migración de suelos.....	82
FIGURA 43: Mapa mundial donde se indica la cantidad de terremotos ocurridos en los últimos años. ....	85
FIGURA 44: Modelos de plataformas a distintas profundidades.....	86
FIGURA 45: Anclaje de plataformas al fondo marino. ....	87
FIGURA 46: Principales riesgos someros.....	88
FIGURA 47: Riesgos someros en Aguas Profundas. ....	88
FIGURA 48: Modelo de una Molécula de Metano dentro de la Molécula de Agua.....	89
FIGURA 49: Estructura cristalina de los hidratos de gas.....	89
FIGURA 50: Diagramas de fase para hidratos de metano en Permafrost y Ambientes Marinos.....	91
FIGURA 51: Modelos micro-estructurales de la disposición de hidratos de gas en los poros de la roca.....	92
FIGURA 52: Diagrama de Fases de Estabilidad de los Hidratos de Metano. ....	93
FIGURA 53: Líneas de formación de hidratos para varios componentes. ....	94
FIGURA 54: Tipos y estructura de los hidratos de gas.....	95
FIGURA 55: Diagrama de Fases de Estabilidad de los Hidratos de Metano. ....	97
FIGURA 56: Distribución de los Hidratos de gas a nivel mundial. ....	99
FIGURA 57: Distribución de los Hidratos de gas en Colombia.....	100
FIGURA 58: Esquema general de los Shallow Water Flow. ....	102

FIGURA 59: Mecanismos de Formación de SWF.....	104
FIGURA 60: Problemas de perforación offshore asociados a SWF por movimientos y dilatación de arenas. ....	106
FIGURA 61: Blowout generado por SWF Turmekistan.....	108
FIGURA 62: Blowouts generado por SWF Texas EU. ....	108
FIGURA 63: Esquema general de los Shallow Gas Flow. ....	109
FIGURA 64: Variación de la gravedad especifica en Blowouts de gas en una plataforma semisumergible. ....	111
FIGURA 65: Desnivel en la plataforma inducido por blowouts a causa se SGF. .	112
FIGURA 66: SGF genera perdida boyancia del agua y hundimiento de plataforma. ....	112
FIGURA 67: Accidente de Piper Alfa causado por SGF, Mar del Norte.....	113
FIGURA 68: Estructura geológica donde se encuentra los Domos Salinos.....	114
FIGURA 69: Estructura geológica donde se encuentra los Domos Salinos.....	115
FIGURA 70: Distribución de prospectos petroleros en aguas profundas relacionadas con formaciones salinas. ....	116
FIGURA 71: Riesgos asociados a la perforación de domos salinos y sus formaciones adyacentes. ....	117
FIGURA 72: problemas potenciales asociados a la perforación de domos salinos y sus formaciones adyacentes.....	119
FIGURA 73: Principales problemas asociados al daño de la tubería por desplazamiento del domo salino.....	120
FIGURA 74: Esquema grafico de sobrepresión con la profundidad.....	122
FIGURA 75: estrato sobrepresionado generado por actividad tectónica (falla). ..	123
FIGURA 76: sobrepresión causada por características estructurales.....	124
FIGURA 77: Esquema general de identificación de riesgos .....	129
FIGURA 78: Definición de la combinación de los posibles eventos y mecanismos de activación que pueden afectar las instalaciones planeadas y la tercera parte. ....	132
FIGURA 79: Correntómetros fijos y mapa geográfico para caracterizar zonas a nivel local o regional. ....	141
FIGURA 80: Boyas de deriva y mapa de direcciones de boyas en el atlántico norte durante un mes en 2006. ....	142
FIGURA 81: Mediciones satelitales de las corrientes del Océano Indico en 2006. ....	142
FIGURA 82: Vectores de corrientes superficiales medidas con un radar de alta frecuencia en diciembre de 2006. ....	143
FIGURA 83: Series temporales tomadas en la entrada de la bahía de Galveston, Golfo de México. ....	144
FIGURA 84: Serie temporal de mareas con diagramas a trazos. ....	144
FIGURA 85: Representación sísmica ecosonda monohaz y multihaz. ....	145
FIGURA 86: Esquema representativo de reflexión sísmica. ....	146
FIGURA 87: Multihaz y Sonar de Barrido Lateral (MBS) usados en cartografía batimétrica. ....	146
FIGURA 88: Mareógrafo RBR.....	147

FIGURA 89: XBT, sensor de temperatura y velocidad del sonido con la profundidad para estudios de batimetría.....	147
FIGURA 90: Integración de herramientas para caracterizar la geomorfología y profundidad del lecho marino.....	148
FIGURA 91: Batimetría de la plataforma continental en los Ángeles EU.....	149
FIGURA 92: Batimetría de sistema multihaz fondo marino, Cartagena.....	150
FIGURA 93: Batimetría en la costa Caribe Colombiana.....	150
FIGURA 94: Salinidad en la superficie del agua oceánica (gramos de sal por kilogramos de agua).....	151
FIGURA 95: Transferencia media anual de calor en el Atlántico Norte del mar a la atmósfera (watios/metros cuadrado).....	151
FIGURA 96: Registros sísmicos de COBS.....	152
FIGURA 97: Principales herramientas usadas en las redes sismológicas.....	153
FIGURA 98: Tectónica y sismicidad en el Caribe Colombiano.....	154
FIGURA 99: Robots vehículos operados a control remoto.....	155
FIGURA 100: Robots vehículos operados a control remoto.....	156
FIGURA 101: Ventanas de gas y sedimentos enterrados en el Caribe colombiana.....	157
FIGURA 102: ventanas de gas y canales enterrados en el Caribe colombiana.....	158
FIGURA 103: Volcanes de Lodo Isis y Amon en el Mar Mediterráneo.....	159
FIGURA 104: Batimetría de detallada de Volcanes de Lodo Isis y Amon en el Mar Mediterráneo.....	160
FIGURA 105: Imágenes del volcán de lodo Amón por AUV y ROV.....	160
FIGURA 106: Imágenes del volcán de lodo Isis por AUV y ROV.....	161
FIGURA 107: Volcanes de lodo en el Caribe Colombiano mediante sísmica.....	162
FIGURA 108: Modelo numerico de simulación de estabilidad de pendiente y deslizamientos en el fondo marino.....	164
FIGURA 109: Mapa esquemático de depósitos y transporte de masas e identificación por medio de sísmica en el Golfo de Mexico.....	165
FIGURA 110: Deslizamiento de sedimentos que generan avalanchas, en las costas Trinidad.....	166
FIGURA 111: Deslizamiento de sedimentos que generan avalanchas, en las costas Trinidad.....	168
FIGURA 112: Distribución de pendientes en el Mar Caribe Colombiano.....	169
FIGURA 113: Elementos geomorfológicos en el bloque RC4 del Mar Caribe Colombiano.....	170
FIGURA 114: Mapa de pendientes y del fondo marino bloque RC4 Caribe Colombiano.....	171
FIGURA 115: Sísmica 3D para caracterizar el lecho marino y el subsuelo.....	173
FIGURA 116: Representación gráfica de la zona de estabilidad de hidratos de gas y la relación con el BSR.....	174
FIGURA 117: Identificación de hidratos de gas mediante registros de lecho marino usando reflexión de ondas electromagnéticas.....	174
FIGURA 118: Modelamiento y análisis de hidratos de gas: los 5 pasos del proceso.....	176

FIGURA 119: Análisis de registros en la identificación de hidratos de gas.....	177
FIGURA 120: Sección sísmica que muestra montículos de hidratos de gas en un análisis de estratigrafía general. ....	178
FIGURA 121: Propiedades elásticas de las arenas y arcillas y la región típica de sedimentos en la zona de SWF. ....	179
FIGURA 122: Análisis por medio de la técnica AVO en la identificación de SWF. ....	181
FIGURA 123: Identificación de SWF mediante el análisis de tiempo contra la relación $V_p/V_s$ .....	182
FIGURA 124: Identificación de SWF mediante el análisis de tiempo contra la relación $V_p/V_s$ y la relación de Poisson. ....	183
FIGURA 125: Compactación asociada a fenómenos de sobrepresión y generadora de riesgos geológicos a nivel somero. ....	184
FIGURA 126: Condiciones típicas de formación de SWF y otros riesgos someros. ....	185
FIGURA 127: Condiciones típicas de formación de SWF y otros riesgos someros. ....	186
FIGURA 128: Análisis de sísmica 3D HR para identificar flujos de gas somero en la costa de finneidfjord Noruega. ....	188
FIGURA 129: Anomalías en sísmica 3D HR asociadas a SGF. ....	189
FIGURA 130: Anomalías en sísmica 3D HR asociadas a SGF. ....	190
FIGURA 131: Anomalías en fondo marino presentadas por la salida del gas somero y presencia de gas somero en el Caribe Colombiano.....	191
FIGURA 132: Escarpe Sigsbee en el Golfo de México.....	192
FIGURA 133: Identificación de cuerpos salinos mediante análisis de apilamiento en Gran Canyon.....	193
FIGURA 134: Identificación de cuerpos salinos mediante análisis de apilamiento en Gran Canyon.....	194
FIGURA 135: Imagen debajo de un bloque salino colgante del Golfo de México con migración en tiempo y en profundidad. ....	195
FIGURA 136: Resultados de un modelo de inversión suave. ....	196
FIGURA 137: Mapa de cuerpo salino integrando técnicas MMT y FTG. ....	197
FIGURA 138: Modelo espacial dependiente de múltiples parámetros y dominios geofísicos.....	198
FIGURA 139: Modelo bidimensional para identificar cuerpos salinos en el subsuelo usando graficas de velocidad de Ondas P, Resistividad y Densidad.....	198
FIGURA 140: Modelo tridimensional para cálculo de volumen de sal usando una estructura compleja a varias escalas. ....	199
FIGURA 141: Modelo previo a la perforación de estimación de la presión de poro con la profundidad. ....	200
FIGURA 142: Imagen en 3D de presión de poro obtenida de una inversión sísmica.....	201
FIGURA 143: Imagen en 2D, corte transversal de un modelo 3D. ....	202
FIGURA 144: Sección transversal de velocidad: A) presión, B) inversión de la presión. ....	202

FIGURA 145: Niveles para el análisis y desarrollo para una adecuada evaluación de riesgos. ....	207
FIGURA 146: Enfoque de la evaluación de riesgos desde el nivel del riesgo y la complejidad de este. ....	209
FIGURA 147: Ejemplo de matriz de riesgos .....	210
FIGURA 148: Componentes del análisis de frecuencias en la interpretación y estimación de riesgos. ....	211
FIGURA 149: Sistema de caracterización y mapeo del fondo marino para simular el comportamiento en terremotos usando RIM (Real-time Interactive Mapping System).....	217
FIGURA 150 : Resultados de un análisis de estabilidad de taludes. ....	218
FIGURA 151: Malla generada del modelamiento numérico de deslizamientos progresivos. ....	222
FIGURA 152: Modelo de simulación dinámico para deslizamientos retrogradados	222
FIGURA 153: Modelo de deslizamiento dinámico comparado con modelo de interpretación sísmica. ....	223
FIGURA 154: Esquema de evaluación de frecuencias por medio de un análisis probabilístico. ....	224
FIGURA 155: Distribución de mecanismo de activación.....	226
FIGURA 156: Distribución de frecuencias de los mecanismos de activación de fallas. ....	227
FIGURA 157: Esquema de estimación de consecuencias por medio de un análisis probabilístico.....	229
FIGURA 158: mapa de riesgos para shallow hazards .....	236
FIGURA 159: pasos a tomar dentro del procedimiento de reducción de riesgos geológicos someros. ....	239
FIGURA 160: conceptos un diseño inherentemente seguro. ....	239
FIGURA 161: Riesgos someros durante la perforación asociados a la interacción con la formación.....	243

## LISTA DE TABLAS

PÁGINA

TABLA 1: Principales Accidentes Ocasionados por Blowouts entre 1969 y 1980	29
TABLA 2: TIPO DE MOVIMIENTO DEL SUELO MARINO	82
TABLA 3: Fallamiento y morfología de las deformaciones del subsuelo marino superficial	84
TABLA 4: Tipos de dificultades presentes en el flujo de aguas someras	107
TABLA 5: Recolección de Información existente para la definición de las propiedades del sistema	133
TABLA 6: Recolección de Información del proyecto exploratorio para la definición de las propiedades del sistema	134
TABLA 7: Enfoque de identificación de Geohazards por etapas	136
TABLA 8: Principales Herramientas o Métodos de identificación de Riesgos Geológicos	139
TABLA 9: Propiedades aproximadas de los hidratos de gas	175
Tabla 10: Análisis geotécnico de escenarios de falla, revisión retrospectiva de los eventos de falla presentados	213
Tabla 11: Aspectos a considerar en el análisis determinístico de estimación de riesgos	213
Tabla 12: Características en las cuales se presentan los deslizamientos en el fondo marino de acuerdo a la base de datos hasta 2003	228
Tabla 13: factores que influyen en la selección de medidas de reducción de riesgos	240
Tabla 14: riesgos someros durante la perforación asociados a la interacción con la formación	244
Tabla 15: Técnicas de control para eventos asociados a los hidratos de gas	246
Tabla 16: Técnicas de control para eventos asociados a los hidratos de gas	247
Tabla 17: Registro de riesgos para determinar el grado de riesgo y establecer controles	245

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

2D	Dos dimensiones (X, Y)
3D	Tres Dimensiones (X, Y, Z)
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia.
API	Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute USA/International)
AUV	Vehículo Subacuático Autónomo (Autonomous underwater vehicle)
AVO	Variación de la amplitud con el Desplazamiento (Amplitude Variation with Offset)
BOP	Preventoras (Blowout Preventer)
BS	Normas Británicas (British Standards)
BSR	Reflector Sísmico Simulador de Fondo (Bottom Simulating Reflector)
CARA	Análisis de Confiabilidad con Soporte Computarizado (Computer Aided Reliability Analysis)
COFS	Centro de investigación de los fundamentos de sistemas costa afuera (Centre for Offshore Foundation Systems)
CCA	Análisis Causa-Consecuencia (Cause Consequence Analysis)
CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe
DIMAR	División Marítima Colombiana
EN	Normativa Europea (European Norm)
ETA	Árbol de análisis de fallas (Fault Tree Analysis)
FAR	Tasa de accidentes mortales (Fatal Accident Rate)

FTG	Tensor de Gravedad Total (full-tensor gravity)
GHSZ	Zona de estabilidad de hidratos de gas (Gas hydrate stability Zone)
GHZ	Riesgos Geológicos (Geohazards)
GIT	Grupo Tecnológico de Geología e Información (Geology and Information Technology Group- The University of Western Australia)
GoM	Golfo de México (Gulf of Mexico)
HAZOP	Peligros Operacionales (Hazard and Operability)
HP/HT	Alta Presión/Alta Temperatura (High pressure/High temperature)
HSE	Salud Ocupacional, Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (Health and Safety Executive)
ICG	Centro Internacional de Peligros Geológicos (International Centre for Geohazards)
ILCI	Instituto Internacional de Control de Perdidas (International Loss Control Institute)
IODP	Programa integrado de perforación oceánica (Integrated Ocean Drilling Program)
ISO	Organización internacional Para Estandarización de Normas (International Organization for Standardization)
JOI	Instituto Oceanográfico Unido (Joint Oceanographic Institute)
MMCI	Múltiples mediciones de Imágenes con restricciones (Multimeasurement Constrained Imaging)
MMS	Servicio Administración de Minerales (Minerals Management Service USA)
MMT	Magneto-telúrica Marina (Marine Magnetotellurics)
MV	Volcán de Lodo (Mud Volcano)
MWD	Mediciones Mientras se Perfora (Measurement While Drilling)
NGI	Instituto Geotécnico de Noruega (Norwegian Geotechnical Institute)

NGU	Servicio Geológico de Noruega (Norwegian Geological Survey)
NORSAR	Registros Sísmicos de Noruega (Norwegian Seismic Array)
NPD	Dirección Noruega del Petróleo (Norwegian Petroleum Directorate)
NTNU	Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología
OSD	División de Seguridad Costa Afuera (Offshore Safety Division (UK))
OTC	Conferencias de tecnología en Costa Afuera (Offshore Technology Conference)
OTO	Reporte de Tecnología Costa Afuera (Offshore Technology Report)
QRA	Análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantified risk analysis)
RC	Ronda Caribe
ROV	Vehículo Operado a Control Remoto (Remotely operated underwater vehicle)
SGF	Flujos de Gas Somero (Shallow Gas Flow)
SH	Riesgos Someros (Shallow Hazards)
SINTEF	Fundación para la Investigación Científica e Industrial (Stiftelsen for industriell og teknisk forskning)
SPE	Sociedad de Ingenieros de Petróleos
SWF	Flujos de agua somera (Shallow Water Flow)
USGS	Servicio Geológico de Los Estados Unidos (U.S. Geological Survey)
VLf	Muy baja Frecuencia (Very Low Frequency)
Vp	Velocidad de las Ondas Primarias (Ondas P)
Vs	Velocidad de las Ondas Secundarias (Ondas S)
WAZ	Acimut Amplio (Wide-Azimuth)
WOAD	Base de datos de los accidentes costa fuera (World Offshore Accident Databank (Norway))

## RESUMEN

**TÍTULO:** IDENTIFICACIÓN, EVALUACIÓN Y MANEJO DE RIESGOS GEOLÓGICOS SOMEROS PARA LA PERFORACIÓN COSTA AFUERA. (GEOHAZARDS Y SHALLOW HAZARDS)\*

**AUTOR:** LÓPEZ MEDINA, Fredy\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Riesgos Geológicos, Riesgos Someros, Flujos de Agua Somera, Flujo de Gas Somero, Hidratos de Gas, Exceso de Presión de Poro, Perforación Costa Afuera, Deslizamientos en el fondo marino.

### DESCRIPCIÓN:

Los recursos energéticos relativos a los hidrocarburos son no renovables y cada día se hace más difícil la búsqueda y explotación onshore, debido a esta realidad se están implementando búsqueda de hidrocarburos costa fuera donde las exigencias para el desarrollo de un campo es mayor y por tal motivo se hace necesario el estudio de riesgos para evitar peligros y daños ambientales, humanos y pérdidas materiales para las empresas. Ecopetrol como empresa colombiana está incursionando en este tipo de exploración, pero no tiene experiencia en la extracción de recursos a nivel offshore, por lo tanto es indispensable que tenga el conocimiento de los procedimientos y practicas a tener en cuenta para mantener el control de las operaciones y evitar situaciones no deseadas. La importancia de un estudio de riesgos geológicos y riesgos someros asociados a la perforación costa afuera radica en la cantidad de accidentes y catástrofes medioambientales que se han presentado a lo largo de la historia de la industria petrolera por causa de éstos. Este estudio busca mostrar una metodología de identificación, evaluación, control y mitigación de riesgos geológicos asociados a las operaciones de perforación costa fuera para reducir la incertidumbre asociada a proyectos de explotación y minimizar los eventos de falla o accidentes con consecuencias humanas y medioambientales irreparables. En este trabajo investigativo se reúnen los principales riesgos geológicos y se hace énfasis especial en los que se pueden presentar en las costas Colombianas.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela Ingeniería de Petróleos. Directora: Hebenly Celis Leguizamo, MSc en Ingeniería Civil. Co-Director: Alexander Martínez Ramírez, MSc en Hidrocarburos.

## SUMMARY

**TITLE:** IDENTIFICATION, ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF GEOHAZARDS AND SHALLOW HAZARDS FOR OFFSHORE DRILLING\*

**AUTHOR:** LÓPEZ MEDINA, Fredy\*\*.

**KEY WORDS:** Geohazards, Shallow Hazards, Shallow Water Flow, Shallow Gas Flow, Gas Hydrates, Excess Pore Pressure, Offshore Drilling, Seabed Landslides.

### DESCRIPTION:

The energetic resources relative to hydrocarbons are nonrenewable and every day becomes more difficult to find and exploitation onshore, due this reality are being implemented search for hydrocarbons offshore where the requirements for the development of a field is higher and for that reason is necessary a study to prevent danger risks and environmental damage, human and material losses for companies. ECOPETROL like Colombian company is inroads into this type of exploration, but it haven't experience in the extraction of resources in offshore environments, so it is essential to have knowledge of procedures and practices to keep in mind to maintain control of operations and avoid undesirable situations. The importance of a study of Geohazards and shallow associated with offshore drilling lies in the number of accidents and environmental disasters that have occurred throughout the history of the oil industry caused by them. This study seeks to present a methodology for identification, assessment, control and mitigation of Geohazards and shallow hazards associated with offshore drilling operations to reduce the uncertainty associated with development projects and minimizes the event of failure or accidents with potentially serious consequences irreparable in human resources and environmental. In this research study meets main Geohazards and shallow hazards and special emphasis is made on which may occur in the Colombian coast.

---

\* Grade Thesis.

\*\* Faculty Physique Chemical Engineering's, School of Petroleum's Engineering. Director: Hebenly Celis Leguizamo, MSc in Civil Engineering. Co-Director: Alexander Martinez Ramirez, MSc in Hydrocarbons.

# INTRODUCCIÓN

La cercanía de la Costa Caribe Colombiana al Golfo de México, la importancia de conservar los ecosistemas marinos y el medio ambiente, los registros de accidentalidad en el mundo por reventones asociados a riesgos someros y riesgos geológicos constituyen unas de las razones fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Son varios los aspectos que se deben estudiar en cuanto a la identificación, control, mitigación y evaluación de riesgos geológicos por lo que fue necesario hacer una consulta multidisciplinaria que comprenda la integración de la geología, la petrofísica, la geomecánica, la geofísica, la geotecnia los aspectos de estabilidad de pozos para la comprensión y desarrollo adecuado de la investigación.

El estudio, a continuación, se basó fundamentalmente en identificar los distintos riesgos someros asociados a la perforación costa afuera para hacer una posterior evaluación e implementar un plan de manejo que permita disminuir la incertidumbre y reducir riesgos geológicos y someros asociados proyectos de perforaciones costa fuera.

Con el estudio se buscó realizar un análisis de riesgos someros para la perforación costa fuera donde tengan en cuenta la mayoría de estos de tal forma que el estudio puede aplicarse para cualquier campo a perforar en costa fuera, aunque el objetivo más cercano es una aplicación a las operaciones que se adelantan en el mar Caribe colombiano.

Los primeros avances de la Empresa Colombiana de Petróleos en cuanto a operaciones costa fuera las adelanta en la Costa Caribe Colombiana, hasta el momento fue una zona poco explorada pero se tiene conocimiento de la presencia de hidratos de gas, y otros riesgos que representan una amenaza y una advertencia para las futuros proyectos de explotación de los hidrocarburos allí existentes.

La evaluación de riesgos geológicos antes de la perforación se ha convertido en un componente esencial de la planificación de pozos, Además el costo de predicción de riesgos no es significativo por la seguridad que ofrece a la operación. Además en la actualidad, no se perfora ningún pozo en un área marina sin la evaluación de riesgos geológicos.

Los datos sísmicos de alta calidad constituyen la clave para efectuar estimaciones precisas de presión de fluidos antes de la perforación. El comportamiento de las velocidades de las rocas en función de la profundidad, aporta valiosa información acerca del estado de la presión de poro que puede esperarse en el subsuelo. Las presiones de poro mayores a la presión la presión hidrostática se denominan sobrepresiones, la sobrepresión es causada fundamentalmente por un fenómeno que se conoce como compactación por desequilibrio. A bajas velocidades de compactación, los granos de roca de decantan y el volumen de los poros disminuye al expulsarse el agua. La rápida sedimentación de finos impide que el agua escape del volumen de sedimentos lo cual mantiene un gran volumen poroso. Cuando el agua queda en sedientos que luego son enterrados, el peso de la masa suprayacente es sustentado no solo por el contacto entre granos sino también, en parte por el agua atrapada en los espacios porosos.

# 1 ESTADO DEL ARTE

Los riesgos someros son uno de los principales problemas en la perforación costa fuera; desde 1955 se han venido presentando accidentes de gran magnitud que han provocado enormes daños a la vida, la salud, el medio ambiente y los bienes de las empresas (NOAA/HMRAD, 1992).

En 1974 Jean Surry de acuerdo a un análisis de factores riesgos en las distintas actividades industriales concluye que la actividad petrolera costa fuera era la de mayor accidentalidad (Holand, 1997); Esto llevó a algunos gobiernos a restringir la explotación de hidrocarburos costa fuera; debido a la restricción y la accidentalidad presentada en la década del 70. Algunas organizaciones internacionales y los mismos centros de investigación se empezaron a preocupar y buscar soluciones buscando la causa de los accidentes que se manifestaban principalmente en forma de reventones (Blowouts). En 1976 Beall publica un método de control de Shallow Hazards para reducir los factores de riesgos en perforaciones offshore (Beall, 1976).

Hasta 1985, se hicieron esfuerzos, reportes e identificación de causas, para este año Westergaard Rich publicó el libro "All about Blowout" donde llama la atención las consecuencias que generaban los reventones. En 1990 Adams, N.J. y L.G. Kulman muestran que gran parte de los Blowouts ocurridos fueron debidos a Shallow Gas Flow (Adams & Kuhlman, Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts, 1990) y Hellstrand. T advierte sobre la necesidad de implementar planes de control y manejo de riesgos someros (Hellstrand, 1990).

En 1995 ya existían muchos accidentes (OTO, Offshore accident and incident statistics report 1993. Hazard Analysis and Mitigation Unit of HSE, 1994) y se empezó a restringir operaciones costa fuera en el mar del Norte (OTO, 1995). Debido a estas restricciones, aumentaron los estudios en operaciones costa fuera y se publicó un método estructurado teórica, y analíticamente fundamentado en técnicas de diseño y con ayuda de la simulación numérica de yacimientos.

Los reportes mensuales de OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT HSE demostraron la gran cantidad de accidentes que ocurrían entre 1970 y 2000.

En 1997 Holand. P publicó “Offshore Blowouts, Causes and control” con este logro reducir la accidentalidad puesto que reunía muchas características que le permitieron a las empresas elaborar planes de prevención, control, y manejo de los riesgos someros y demás que ocasionaban los Blowouts (Holand, 1997).

En 2001 Norsok Standard publicó la norma “Risk and emergency preparedness analysis” también conocida como NORSOK Z-013 donde se establecieron los requisitos para planificación, ejecución y manejo de riesgos, Además aplica a algunos aspectos de evaluación de éstos (NORSOK, 2001).

En 2009 el reporte No 425 de OGP “Geohazards from seafloor instability and mass flow” por medio de flujogramas y secuencias estructuradas establecieron una serie de actividades a seguir en cuanto a planeación, caracterización y evaluación de riesgos geológicos asociados a operaciones petroleras offshore para ejecutar planes que integren las disciplinas de geología y geotecnia al servicio de proyectos petroleros (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

La investigación ha sido prolífica en cuanto a la reducción de riesgos a nivel de todas las operaciones offshore incluida la perforación, en este informe se destacan los documentos más relevantes a nivel general, aunque se han escrito muchos papers que mencionan el control y manejo de riesgos por separado.

Los reventones o patadas de pozo son uno de los resultados que más ha generado investigación y el riesgo más estudiado por su relación con los Blowouts es los estratos someros saturados de gas que se encuentran sobrepresionados o Shallow Gas; Aberdeen en 2004 muestra los accidentes registrados por riesgos geológicos (Geohazards) a nivel somero entre 1957 y 1990 donde se presentaron: 4 plataformas de perforación perdidas y 16 dañadas además de 16 taladros perdidos y 19 dañados solo por la pérdida del control de pozo debido a salida incontrolada de fluidos sin contar los demás riesgos asociados a la perforación (Reed, 2004).

La figura 1 muestra la estructura del análisis de riesgos planteado desde 2001 en el cual se incluye la planeación del análisis de riesgos, la definición del sistema de análisis, la identificación de riesgos dentro del sistema, la estimación de dicho riesgo, la evaluación del mismo y finalmente la mitigación y control de los peligros presentes para obtener un proyecto sin inconvenientes en la operación de perforación Offshore (NORSOK, 2001).

**FIGURA 1: Estructura del análisis de Riesgos NORSOK Z-013 (2001)**



Fuente: Modificada de NORSOK Z-013 (2001).

Los esquemas planteados para el estudio de riesgos son la planeación, la identificación, el análisis y evaluación, el control y reducción de riesgos (NORSOK, 2001), finalmente se establecen los criterios de aprobación y desaprobarción el proyecto teniendo en cuenta los selección y el tipo de riesgos presentes en el lugar (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

En la tabla 1 se observa los cinco principales accidentes ocurridos entre 1969 y 1980 que llevó a posteriores restricciones y búsqueda de alternativas de solución en las actividades de perforación offshore (NOAA/HMRAD, 1992).

**TABLA 1: Principales Accidentes Ocasionados por Blowouts entre 1969 y 1980**

Imagen	Accidente ocasionados por Blowouts	Fecha	Empresa (Lugar)	Barriles Derramados
	1. Sedco 135F and the IXTOC-1 Well	Junio 3 de 1979	PEMEX (Golfo de México)	3,500,000
	2. Ekofisk Bravo Platform	Abril 22 de 1977	Phillips Petroleum Company (Costa de Noruega)	202,381
	3. Funiwa No. 5 Well	Enero 17 de 1980	TEXACO Costa de Nigeria	200,000
	4. Hasbah Platform Well 6	Octubre 2 de 1980	ARAMCO Golfo de Arabia	100,000 (19 muertos)
	5. Union Oil Platform Alpha Well A-21	Enero 28 de 1969	Union Oil Company Santa Barbará E.U	80,000

Fuente: Modificada de Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts (Adams & Kuhlman, Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts, 1990).

## **2 BASES TEÓRICAS Y DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

En la actualidad no existen estudios de evaluación y manejo de riesgos someros asociados a la perforación costa fuera, lo que implica la necesidad de establecer una herramienta teórica que permita optimizar esta operación offshore en cuanto a evitar accidentes no deseados que causan daños a la salud, la vida, los equipos y las empresas. Además la costa Caribe colombiana que es el caso de estudio de esta investigación hace parte del Mar Caribe donde también se encuentra ubicado el Golfo de México, lugar donde se han presentado la mayoría de accidentes a nivel de perforación costa fuera por lo tanto es recomendable hacer este estudio para evitar accidentes que generen daños delicados (Holand, 1997).

El objeto de estudio de esta investigación es la identificación de riesgos geológicos y someros asociados en la costa Caribe colombiana dentro de los que se pueden encontrar volcanes de lodo, transporte de masas y sedimentos en el lecho marino, estratos de carbón, fallas someras, anomalías con Gas somero, agua somera, zonas sobrepresionadas, fallas escarpadas, tsunamis y otros tipos de riesgos que pueden ser dados por la meteorología y por actividades del hombre (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

Después de 1980 se comenzó a publicar documentos de riesgos y accidentes asociados a perforaciones costa fuera, y posteriormente se publican documentos que permiten reducir los riesgos mediante medidas de análisis y evaluación de las zonas de estudio (NOAA/HMRAD, 1992), (HSE & Oil and Gas Uk, 2009),

(Adams & Kuhlman, Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts, 1990), (Kvitrud, Ersdal, & Leonhardsen, 2001).

La herramienta más poderosa que constituye la búsqueda y localización de Shallow Hazards según la opinión de muchos autores es la Sísmica especialmente la Sísmica 3D la cual ayuda con la caracterización somera del prospecto a perforar ubicando los Shallow Gas, Shallow agua, zonas de hidratos de gas, zonas sobrepresionadas, domos salinos, fallas, flujo de sedimentos entre otros (Strout & Tjelta, 2007), ( Thomson, 2010), (Zakeri, 2008), (Sheahan & DeGroot, 2009) .

Por otra parte la búsqueda y localización de riesgos someros ayudan a la reducción de accidentes para la empresa, es un factor importante en la planeación de proyectos de perforación y en los cuales las empresas deben invertir económicamente para estudios sísmicos de tal forma que se disminuya considerablemente el número de accidentes costa fuera para así contribuir al cuidado de la salud e integridad humana el medio ambiente y los mismos bienes materiales de las empresas (geotechnical research groups), (ICG, 2012), (GIT, 2012).

Para un estudio detallado de Shallow Hazards es indispensable seguir un procedimiento que permita hacer un estudio completo y detallado, para este fin se debe seguir los siguientes pasos: primero la planeación y el desarrollo de análisis de riesgos; segundo, definir el sistema de trabajo que constituye el área y las herramientas con que se cuenta para el desarrollo del estudio; tercero, la identificación de los riesgos someros que se hace con corridas de sísmica y otras herramientas; cuarto, la estimación y análisis de los riesgos previamente identificados y finalmente la evaluación de los riesgos que pueden afectar de manera significativa los recursos humanos, ambientales y materiales de la empresa (NORSOK, 2001), (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor

instability and mass flow, 2009), (NGI, Offshore geohazards Summary Report Research institution-based strategic project 2002 - 2005, 2005).

La aprobación de un proyecto de perforación depende en gran parte de la evaluación de riesgos someros, si dentro de los criterios de evaluación el proyecto se considera muy riesgoso se debe desistir en el proyecto o redefinir el sistema de riesgos de tal forma que los riesgos se puedan mitigar y el proyecto se pueda llevar a cabo teniendo en cuenta medidas de manejo y precaución. El cumplimiento estricto de dichas medidas es indispensable para no tener inconvenientes o situaciones no deseables durante el desarrollo de las operaciones de perforación costa fuera (The University of Texas at Austin, 2005, pág. 21), (MARTIN, 1989).

### **Definición de Términos Básicos.**

En esta sección se definen los principales conceptos que están relacionados a estudio de riesgos someros asociados a las operaciones de perforación costa afuera.

**Amenaza:** Es un fenómeno natural que puede producir daños, esta amenaza puede ser existente (como deslizamiento progresivo) o un riesgo potencial (como Sedimentos potencialmente inestables).

**Batimetría:** estudio de la profundidad marina; Además es una metodología muy útil y prácticamente necesaria en cualquier objetivo, permite obtener datos precisos de profundidad y estudiar la morfología del fondo con detalles. En su modalidad actual multihaz (Multibeam) se hace muy productiva y rápidamente permite localizar zonas de interés con un cubrimiento amplio del área en estudio. Es imprescindible para evaluar las condiciones y geometría del arrastre de otros equipos en su desplazamiento cercano al fondo en etapas posteriores.

**Blowout:** Un flujo incontrolado de fluidos desde la cara o desde el fondo del pozo es considerado como Blowout (REVENTÓN). A menos que se especifique lo contrario, Un flujo desde la tubería no es considerado Blowout siempre y cuando las válvulas de control en la cabeza de pozo se puedan activar, pero, si las válvulas no se pueden intervenir a tiempo entonces dicho flujo es considerado como Blowout (Holand, 1997).

**BOP (Blowout Preventer):** La preventora de reventones BOP es un mecanismo de válvulas instalado en el extremo superior del pozo, que permite controlar los desequilibrios de presión del pozo durante la perforación. Al cerrar las válvulas de puede reiniciar los procedimientos para incrementar la densidad del lodo de perforación hasta que sea posible controlar nuevamente las presiones de los fluidos de la formación (Holand, 1997).

**Causas de los Blowouts:** Son 4 las causas principales asociadas a lo accidentes ocurridos por Blowouts: Las causas externas que hayan contribuido, las barreras primarias, las barreras secundarias si las primarias son vencidas y finalmente los errores humanos, que casi nunca se dan con claridad puesto que tienden a disfrazarse en otros eventos (Holand, 1997).

**Características de los Blowouts:** Las características asociadas a los Blowouts son 12 y son las siguientes: trayectoria del flujo, putos de salida, cantidad promedio del flujo, la velocidad de salida, el tipo de incendio provocado, las pérdidas de producción del campo, el número de muertos, el tipo de consecuencia legales y demás asociadas, las pérdidas materiales para la empresa y la contaminación al medio ambiente (Holand, 1997).

**Consecuencia:** en el análisis de riesgos en Offshore, es el resultado o consecuencia de un peligro que se está produciendo (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

**Corrientes de arrastre:** Ocurren en la superficie de la masa de agua, son por la acción directa del viento. Son de mayor intensidad cuando el viento es constante sobre una masa de agua que es extensa, por ejemplo, los vientos alisios que soplan en el Atlántico y Pacífico creando corrientes de grandes masas de agua en dirección Oeste. Ver corrientes marinas (Haeger & Bol, 2007).

Estas corrientes de arrastre también están relacionadas con tornados, ciclones y otros eventos en los que influye el viento en desplazamientos de grandes volúmenes de agua en la superficie oceánica, estas corrientes se deben tener muy en cuenta en el análisis y construcción de la plataforma, pues representa un riesgo directo para los recursos humanos, tecnológicos y físicos que se encuentran en la embarcación o plataforma desarrollando actividades petroleras dentro de las que se encuentra la perforación (Ramirez, 2006).

**Corriente de densidad:** Se produce una variación de densidad entre las masas de agua situadas en distintas profundidades debido a diferencias de temperatura y salinidad entre ellas. La tendencia natural es a compensar esta diferencia de densidad, por lo que una de las masas se desplaza hacia la otra a una velocidad proporcional a la diferencia de densidad. Estas corrientes generalmente son suaves. Las aguas más frías o con mayor salinidad son más densas y tienden a hundirse, mientras que las aguas más cálidas o menos salinas tienden a ascender. De esta forma se generan corrientes verticales unidas por desplazamientos horizontales para remplazar el agua movida. Por ejemplo, el agua de la superficie puede sufrir un aumento de salinidad por evaporación y a partir de esto originarse una corriente en el sitio (Haeger & Bol, 2007).

**Corrientes de mareas:** Ocurren exclusivamente por la variación del nivel del mar debido a la atracción entre la luna y el sol, y su dirección cambia a la vez que cambian las mareas. La velocidad de estas corrientes depende de la configuración de la costa, aunque suele ser muy intensa. Pueden llegar a ser un peligro para los buceadores y los barcos. Generalmente en altamar carecen de importancia, pero

en las operaciones de perforación costa afuera pueden tener cierto grado de influencia (Haeger & Bol, 2007).

**Corrientes marinas:** Una corriente es un desplazamiento de una masa de algún fluido, ya sea líquido o gaseoso, en el caso de las corrientes marinas el fluido es el agua; Las corrientes marinas son masas de agua con desplazamientos propios dentro de los océanos con profundidades diversas y con determinadas direcciones (Heck). Pueden ser consideradas como "ríos dentro del océano". Su existencia hasta ahora se atribuye a diferencias de temperatura y de salinidad entre masas de agua, a la rotación terrestre, a los vientos, etc. (Haeger & Bol, 2007).

Para muchos trabajos realizados en el mar, las corrientes marinas son un factor importante que se debe tener en cuenta en la caracterización de un área marina determinada (Calzada, Mut, Marín); Por ejemplo en el desarrollo de operaciones petroleras como la perforación o la toma de sísmica, como también en los factores de boyancia para evitar el hundimiento de embarcaciones o plataformas.

Las corrientes marinas se clasifican según su origen en corrientes de arrastre, de densidad, y de mareas; Además las corrientes marinas tienen características propias que permiten diferenciar las mareas en distintos lugares, estas características dependen de la temperatura, dirección, velocidad, profundidad, ancho y caudal de la marea (Haeger & Bol, 2007).

**Deslizamiento marino (submarine slides):** Los deslizamientos submarinos son fenómenos que consisten principalmente en corrimiento y deslizamiento de los sedimentos en el fondo del mar, estos son provocados principalmente por la desestabilización de sedimentos y generalmente se da con mayor frecuencia en pendientes menores que en mayores; estos eventos pueden durar desde pocas horas hasta días y puede causar graves daños en la estabilidad de la plataforma, la tubería, y las instalaciones en el lecho marino (Feeley, 2007).

**Efecto Coriolis:** Es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial) cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia (Haeger & Bol, 2007).

**Elementos en riesgo:** Son todos los recursos de la empresa que están expuestos a factores de riesgo que pueden convertirse en accidentes; dichos recursos pueden ser: personas, equipos, herramientas, instalaciones, recursos económicos, recursos naturales, entre otros.

**Falla:** Se entiende por falla, al movimiento gradual o súbito generalizado de la masa del suelo, en el que se rebasa su resistencia al movimiento y que compromete la integridad y/o estabilidad de estructuras desplantadas en él. A diferencia de lo que ocurre en la superficie terrestre, el movimiento de del suelo y la inestabilidad de este se da a pendientes menores a nivel del suelo marino, dependiendo de varios factores las pendientes pueden ser menores de un grado en la plataforma continental hasta mayores de 25 grados en taludes.

**Formación:** Unidad litoestratigráfica fundamental. Cuerpo de rocas identificado por sus características litológicas y su posición estratigráfica.

**Frecuencia:** Es una medida de la probabilidad expresado como el número de ocurrencias de un evento específico en un momento dado o en un número determinado de ensayos.

**Geohazards:** Riesgo geológico que se da a nivel local o regional y tiene cierta probabilidad de desarrollar un evento de fallo o accidente causando daños a la vida, la salud, el medio ambiente y los bienes de la empresa.

**Hazard:** Probabilidad de ocurrencia de un daño o amenaza particular en un periodo de tiempo dado.

**Inestabilidad de taludes:** Es un fenómeno debido al desequilibrio de esfuerzos en una zona determinada, los que hace que la resistencia del suelo sea vencida y

se genere la inestabilidad del terreno, que es provocado principalmente por la rápida sedimentación, erosión y movimiento de masas en el suelo marino, filtración de gas o fluidos desde capas inferiores que estimulan el desequilibrio en los esfuerzos.

**Isopaca:** Lugar geométrico de los puntos de igual espesor en una unidad litoestratigráfica; Línea representativa en los mapas de isopacas.

**Mud flow:** Masa de partículas heterogéneas, predominantemente de grano fino, lubricada por gran cantidad de agua que se desplaza.

**Peligro:** Fuente o situación con potencial de producir daño, en términos de una lesión o enfermedad, daño a la propiedad, daño al ambiente del lugar de trabajo, o una combinación de éstos. (OSHAS 18001)

El peligro es "real" cuando existe aquí y ahora, y es "potencial" cuando el peligro puede existir a corto, medio, o largo plazo, dependiendo de la naturaleza de las causas que lo crean.

**Posibilidad:** probabilidad condicionada a un resultado dado de un conjunto de datos, basada en información y suposiciones de un modelo; El termino posibilidad también se usa para describir de forma cualitativa la probabilidad y la frecuencia.

**Probabilidad:** Es una medida del grado de certeza, esta medida tiene valores entre cero (imposible) y uno (certeza). Es un estimativo de la posibilidad de magnitud de una cantidad incierta, o de la posibilidad de ocurrencia de un evento futuro.

**Riesgo:** Es la probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre. La vulnerabilidad o las amenazas, por separado, no representan un peligro. Pero si se juntan, se convierten en un riesgo, o sea, en la probabilidad de que ocurra un desastre. El riesgo se refiere sólo a la teórica posibilidad de daño o perjuicio bajo

determinadas circunstancias, mientras que el peligro se refiere sólo a la teórica probabilidad de daño o perjuicio bajo determinadas circunstancias.

**Shallow:** Se refiere a un nivel superficial, para efectos esta investigación se interpreta por Shallow un nivel del subsuelo a poca profundidad en relación al lecho marino, es decir una profundidad somera.

**Shallow Gas:** Es una capa de gas que se encuentra a pocas profundidades contadas a partir del lecho marino, se presenta en mayor cantidad en los campos costa fuera por las condiciones en las que se encuentran los campos, la sísmica 2D y 3D combinadas constituyen la mejor herramienta para identificar este tipo de riesgos que ocasiona flujos incontrolables de gas conocidos como patadas.

**Shallow Hazards:** Representa un riesgo o fuente potencial de daño a pocas profundidades contando a partir del lecho marino, estas profundidades están entre 0-3000 pies (0-1000 metros), la mayoría de los riesgos asociados a Shallow Hazards se dice que son los que se encuentran a profundidades superficiales antes de instalar la BOP (BLOWOUT PREVENTOR) (Strout & Tjelta, 2007).

**Shallow Water:** Se presentan en zonas relativamente poco profundas (a menos de 3000 pies de profundidad ), respecto del nivel del suelo marino, y descubiertos en depósitos de grano fino en zonas someras que habitualmente se encuentran en capas; este es un riesgo causado por arenas sobre presionadas que generalmente se da en aguas profundas y puede generar pérdidas millonarias de dinero al no ser tratados a tiempo; la sísmica representa un herramienta significativa en la ubicación y tratamiento de este riesgo (Espinosa & Mateus, 2010, pág. 76).

**Sonografía:** Metodología semejante a la batimetría multihaz brinda información rápida de un área considerable al abarcar su barrido extensiones de hasta kilómetros a ambos lados de la línea de sondeo. Sus resultados brindan una imagen acústica del fondo marino y de esta forma incorpora información que no brinda la batimetría permitiendo detallar las zonas morfológicamente interesantes.

**Suelo:** Es la capa de la corteza terrestre formada por material meteorizado en el mismo lugar donde actualmente se halla, mezclado con materia orgánica muy superficial.

**Talud continental:** Zona de pendiente del margen continental, continuación de la plataforma, que desciende desde los 200 m de profundidad hasta los 4.000 m.

**Temblor:** Es un movimiento vibratorio causado por un deslizamiento repentino de bloques de roca sobre una falla geológica.

**Tsunami:** Es un evento complejo que involucra un grupo de olas de gran energía y de tamaño variable que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Este tipo de olas remueven una cantidad de agua muy superior a las olas superficiales producidas por el viento. Se calcula que el 90% de estos fenómenos son provocados por terremotos, en cuyo caso reciben el nombre más correcto y preciso de maremotos tectónicos.

**Ventanas de gas:** Las ventanas de gas se forman a profundidades someras y están muy asociadas a los hidratos de gas puesto que estos se filtran en la ventana de gas en su viaje a superficie en una columna vertical que se da a través la falla presente en la formación y una vez llega al lecho marino y pasa por las ventanas de agua, es tal la fuerza con que salen estas ventanas que se pueden visualizar en la superficie marina a en columnas de agua de hasta 890 metros.

**Viento geostrófico:** es una aproximación física al viento real. En él se considera que existe un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la fuerza generada por el gradiente de presión o fuerza bórica (a esto se le llama aproximación geostrófica o equilibrio geostrófico).

**Volcán:** Es el lugar donde la roca ígnea, fundida o fragmentada por el calor y gases calientes, emerge a través de una abertura desde las partes internas de la tierra a la superficie.

**Volcanes de lodo:** Son erupciones que eleva una arcilla sumamente hidratada la cual llega a formar superficies fungosas, estos volcanes se deben a emanaciones de gas por la presencia de yacimientos de petróleo y tiene temperaturas más frías que los volcanes con emanaciones de magma, este es un riesgo de especial atención puesto que se convierte en problemas operacionales que generan deslizamientos de material, inestabilidad en el suelo marino, inestabilidad de hidratos y olas que se pueden convertir en Tsunamis.

**Zonas de Hidratos de Gas:** Las zonas de hidratos de gas suelen encontrarse a profundidades someras (100 a 500 metros por debajo del fondo del mar) y a condiciones de altas presiones y bajas temperaturas en su mayoría se encuentran en campos offshore y son la causas de bloqueos a ductos; los hidratos de gas presentan una estructura similar a la del hielo pero no actúan como el hielo ya que se queman cuando son incendiados con un cerillo. Los hidratos de gas también pueden encontrarse en el ártico en profundidades aproximadas entre 200 y 1200 metros bajo la superficie, pero no es el caso de este estudio.

**Zonas sobrepresionadas:** Son zonas donde la presión es mayor a la presión de una formación que presenta un gradiente de presión normal (0,465 psi/pie), generalmente se encuentran el yacimientos que no tienen continuidad con otros reservorios y es común encontrar en estas zonas un gran contenido de arcillas las cuales por propiedades de porosidad-permeabilidad evitan el drenaje de los fluidos y por lo tanto se forman zonas de sobrepresión que generan los Shallow Gas Flow, Shallow Water Flow entre otros.

## 3 RIESGOS GEOLÓGICOS

### 3.1 GENERALIDADES

Riesgo geológico que se da a nivel local o regional y tiene cierta probabilidad de desarrollar un evento de fallo o accidente causando daños a la vida, la salud, el medio ambiente y los bienes de la empresa (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

FIGURA 2: Esquema general de los riesgos Geológicos (Geohazards).



Fuente: Modificada de Excess Pore Pressure Measurement and Monitoring for Offshore Instability Problems.

Los riesgos geológicos asociados a las operaciones de perforación costa afuera son cuatro: riesgos presentados a nivel del mar, riesgos geológicos en el fondo oceánico, Riesgos someros, y riesgos artificiales los cuales se muestran en la figura 2 y 3.

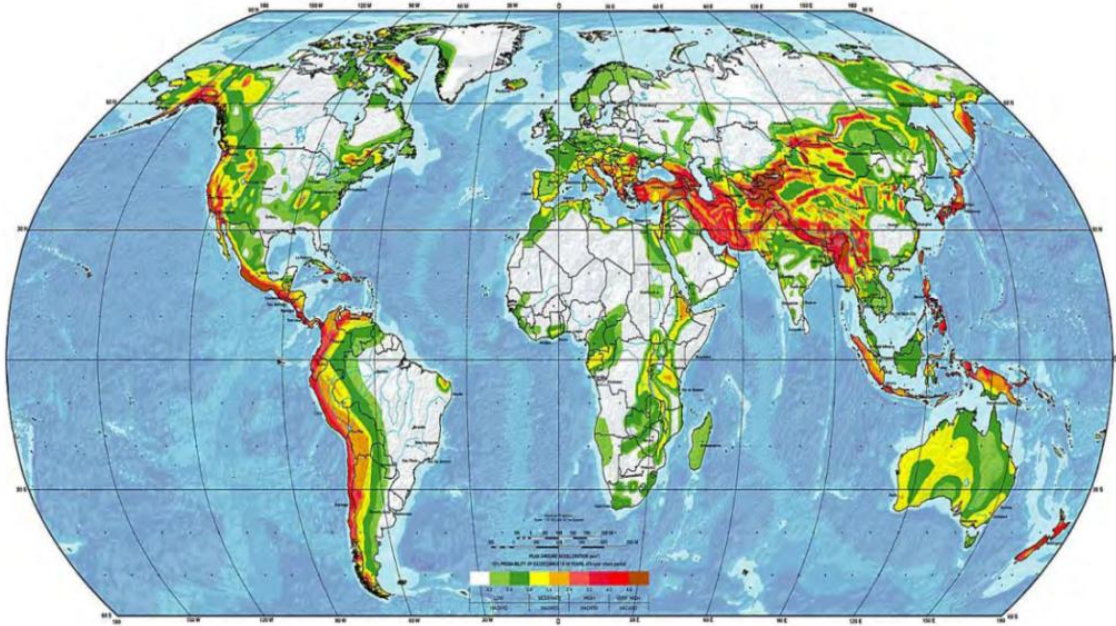
**FIGURA 3: Representación de los 4 tipos de riesgos geológicos.**



Fuente: Modificadas de (IMP, 2011) (Reed, 2004, pág. 13), (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010, pág. 29), (Reuters, 2011).

La figura 4 muestra la distribución de riesgos sísmicos a nivel mundial, las zonas de color rojo, naranja y café representan las zonas de mayor nivel de riesgo sísmico, mientras que las zonas de color blanco, verde y amarillo representan las zonas de menor riesgo sísmico, es de rescatar que las costas Caribe y Pacífica Colombiana presenta un alto riesgo sísmico.

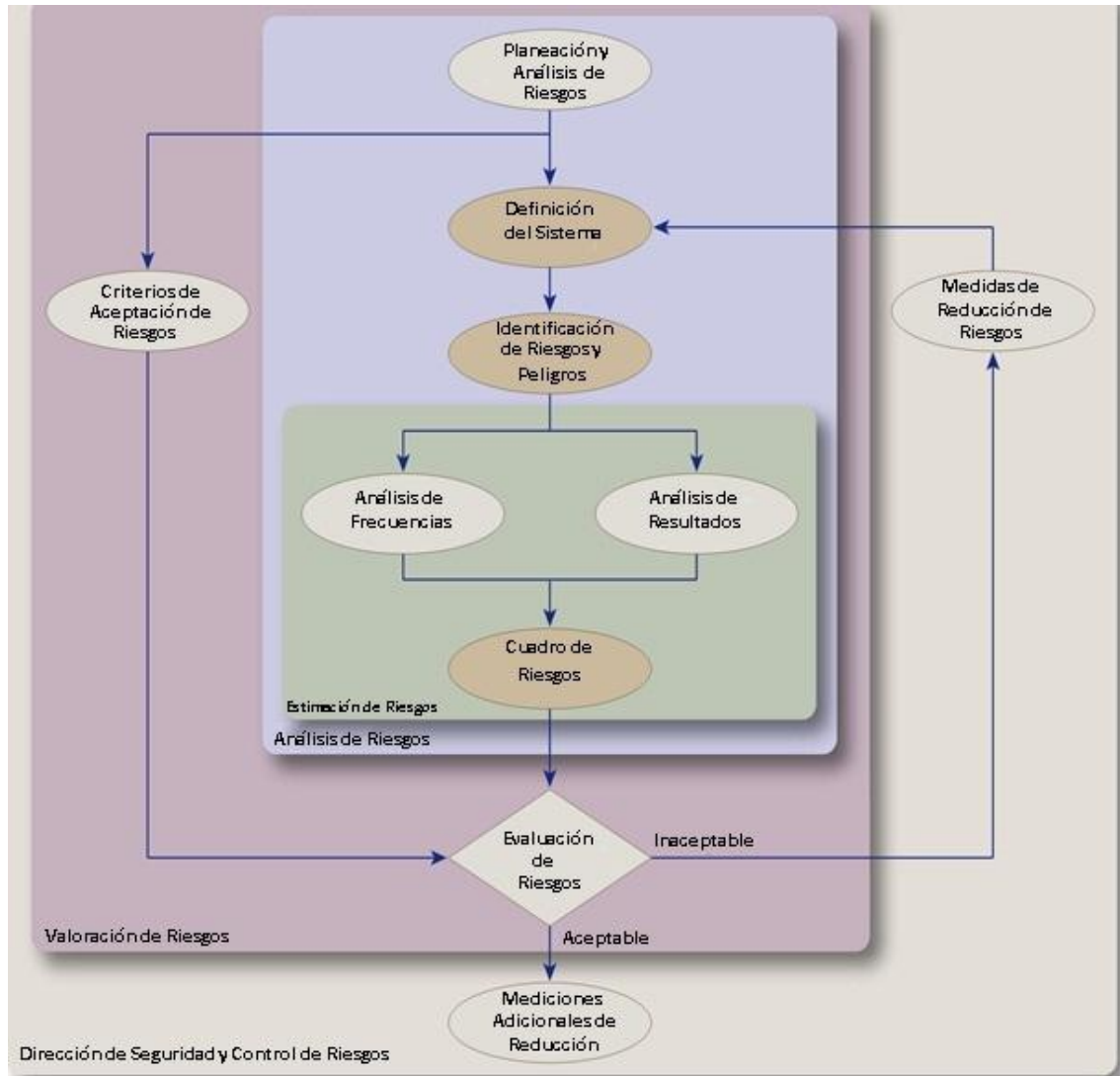
**FIGURA 4: Mapa Mundial de riesgos sísmicos**



Fuente: (Hance & Wright, 2003)

El desarrollo de un proyecto adicional el análisis de riesgos tiene sus propias etapas que comprenden la planeación, la definición del sistema de estudio, la identificación, la evaluación, y mitigación de riesgos geológicos. Estas etapas se desarrollan para estimar y analizar la viabilidad del proyecto de perforación, si el resultado del análisis de riesgos no es favorable, se debe reducir los riesgos y redefinir el sistema de estudio hasta que se dé un escenario de baja incertidumbre donde se pueda continuar con el proyecto teniendo en cuenta las precauciones dadas en el análisis y estimación de riesgos; las figuras 5 y 6 muestran los pasos y procedimientos que se deben tener en cuenta para el desarrollo del proyecto (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

**FIGURA 5: Diagrama de secuencia de las etapas del proyecto de análisis y evaluación de riesgos geológicos.**



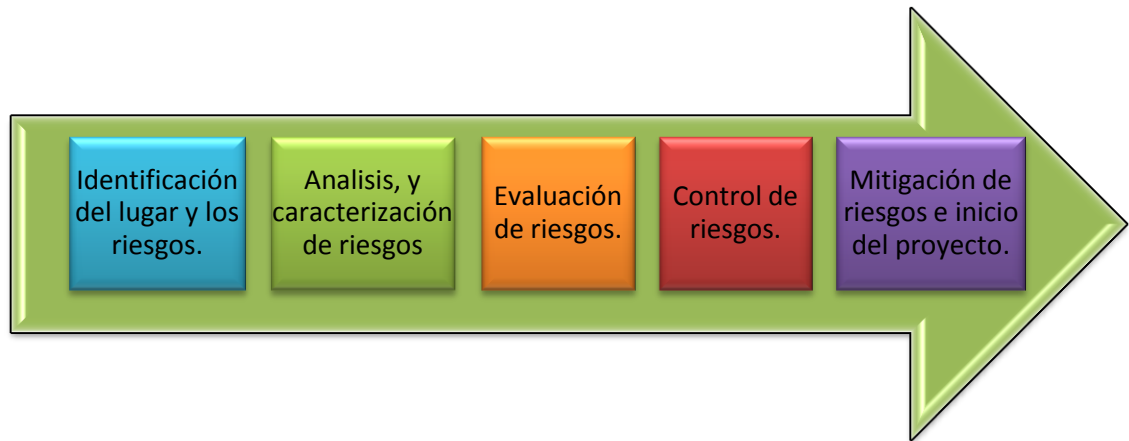
Fuente: Modificada de OGP Reporte 425.

La metodología mostrada en la figura 5 comprende la base del desarrollo de este proyecto, pues se busca hacer un análisis de cada ítem presentado en el diagrama de tal forma que se pueda hacer una caracterización adecuada de cada

uno de los riesgos geológicos someros asociados a los proyectos de perforación costa afuera.

En las figuras 6 y 7 se muestra el procedimiento esquemático que se debe seguir para el análisis detallado de los riesgos geológicos.

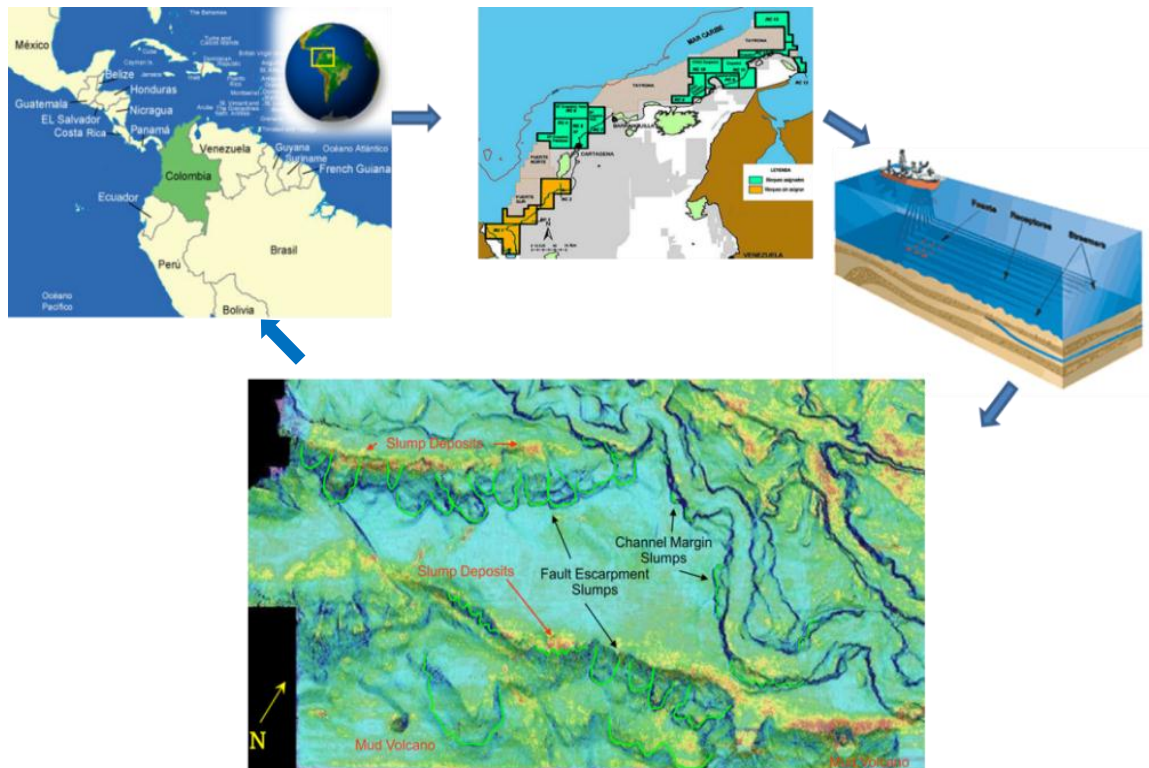
**FIGURA 6: Etapas del análisis de riesgos geológicos asociados a la perforación Offshore.**



Fuente: autor.

Entre en año 1955 y hasta febrero de 2010 se han reportado 573 accidentes debidos a los BLOWOUTS en las etapas de perforación y producción, de los cuales hasta 1990 se han registrado 60 solo por Shallow Gas en perforación, Los principales lugares donde se han presentado estas indeseadas situaciones son El Golfo de México, la costa de Alaska, la costa de Arabia, las costas de Malasia, y el Mar del Norte (NOAA/HMRAD, 1992), (HSE & Oil and Gas Uk, 2009), (Kvitrud, Ersdal, & Leonhardsen, 2001), (Adams & Kuhlman, Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts, 1990).

**FIGURA 7: Procedimiento esquemático de las etapas, identificar lugar, caracterizar riesgos, hacer mediciones, interpretarlos y mitigarlos.**



Fuente: ( Thomson, 2010), (Country Reports), (ANH, 2007).

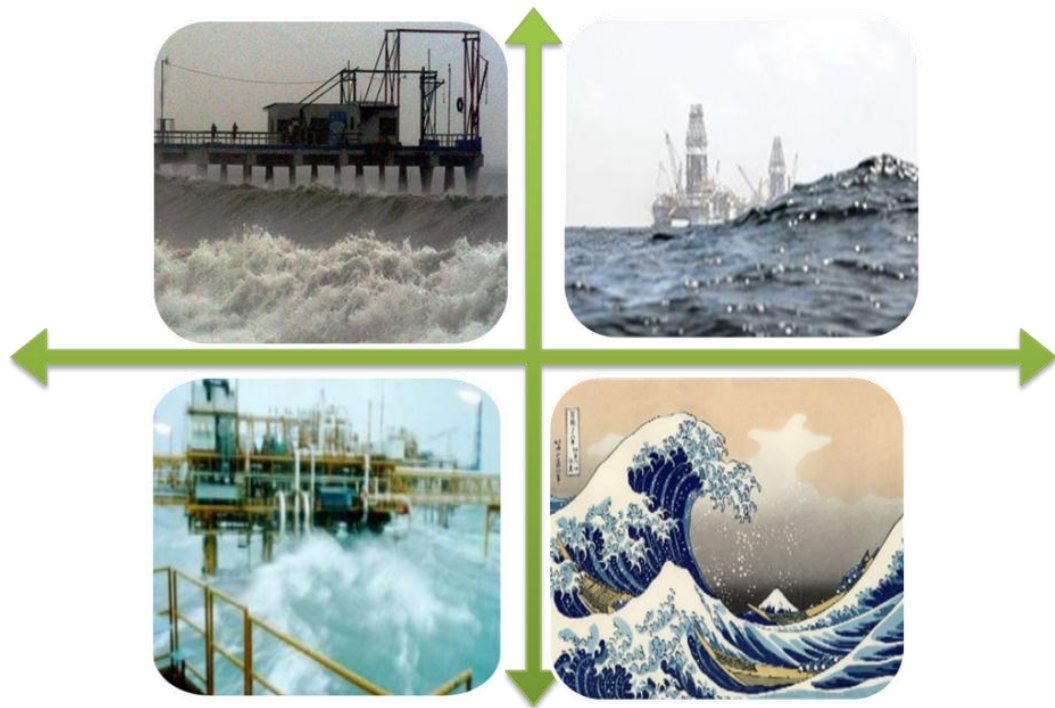
### 3.2 RIESGOS A NIVEL DEL MAR.

Dentro de estos riesgos podemos encontrar todos los eventos que pueden presentarse en la superficie de las aguas marinas, estos riesgos comprenden básicamente: mareas altas, tormentas, huracanes, tsunamis y corrientes marinas algunos de estos riesgos se ilustran en la figura 8.

### 3.2.1 Mareas altas

Se generan por el potencial gravitacional de la luna y el sol. Su propagación y amplitud están influenciadas por fricción, la rotación de la tierra, y la resonancia que está determinada por las formas y profundidades de las cuencas oceánicas y los mares marginales; En figura 9 se observan mareas altas previas a el huracán Adrián.

**FIGURA 8: Riesgos geológicos en el lecho marino.**



Fuente: Modificada de (Sistema Nacional de Protección Civil, 2010), (Herbert/AP, 2010) y (Hokusai, 1830).

Las mareas altas son el máximo nivel del agua en el ascenso y descenso del nivel del mar. Estas están influenciadas en gran medida por el cambio regular en la velocidad y dirección de la corriente (MARN, 29).

Las mareas altas afecta el libre desarrollo de las actividades, puesto que genera incomodidad al personal por el brusco movimiento de las aguas, también afecta la estabilidad de la plataforma sobre todo aquellas que no están ancladas en fondo.

**FIGURA 9: Mareas altas que alcanzan 18,5 ft de altura.**



Fuente: (Sistema Nacional de Protección Civil, 2010)

### **3.2.2 Tormentas**

Son fenómenos atmosféricos violentos asociados a la lluvia, hielo granizo, electricidad, nieve y vientos fuertes, que pueden transportar partículas en suspensión como arena, objetos pequeños o incluso seres vivos; este fenómeno se da principalmente en plataformas cercanas a los márgenes continentales donde las aguas son más someras como el que se indica en la figura 10 (Universidad de la República Oriental del Uruguay, 2012).

Este fenómeno de la meteorología que se describe como parte de la evolución de un ciclón tropical. Específicamente se habla de este tipo de tormenta cuando la velocidad promedio del viento, durante un minuto, alcanza cifras dentro del rango de los 63 a los 118 km/h.

**FIGURA 10: Enorme ola generada de una tormenta afecta la estabilidad de la plataforma.**



Fuente: (Herbert/AP, 2010)

**FIGURA 11: Plataforma petrolífera en Paramaribo en medio de una Huracán**



Fuente: (Google\_Master, 2009)

### **3.2.3 Huracanes**

También llamados Ciclones tropicales, Tifones o simplemente Ciclones; son torbellinos muy violentos de aire que generalmente se originan y desarrollan sobre los mares tropicales, avanzando en grandes círculos. Estos generan situaciones

indeseadas como la que se muestra en la figura 11 donde se muestra una plataforma en medio de un huracán. Sus diámetros crecen a medida que se desplazan, pudiendo llegar hasta unos 100 kilómetros de diámetro, y alcanzar velocidades hasta de unos 200 kilómetros por hora. Generalmente se desarrollan de Este a Oeste (Virgilio, 1993), (Businger, 2008 ).

### 3.2.4 Tsunamis

Son una serie de ondas oceánicas extremadamente largas generadas por perturbaciones asociadas principalmente con sismos que ocurren bajo o cerca del piso oceánico, en aguas someras. También pueden generarse por erupciones volcánicas y derrumbes submarinos. En el mar profundo, el largo entre una cresta de las ondas y la siguiente puede ser de 100 kilómetros o más pero con una altura de unas pocas decenas de centímetros. Ellas no pueden ser apreciadas a bordo de embarcaciones ni tampoco pueden ser vistas desde el aire en el océano abierto. En aguas profundas, estas ondas pueden alcanzar velocidades superiores a 800 kilómetros por hora (NOAA, ITIC, & SHO, 2011).

**FIGURA 12: Representación gráfica del Tsunami ocurrido en Japón 2004**

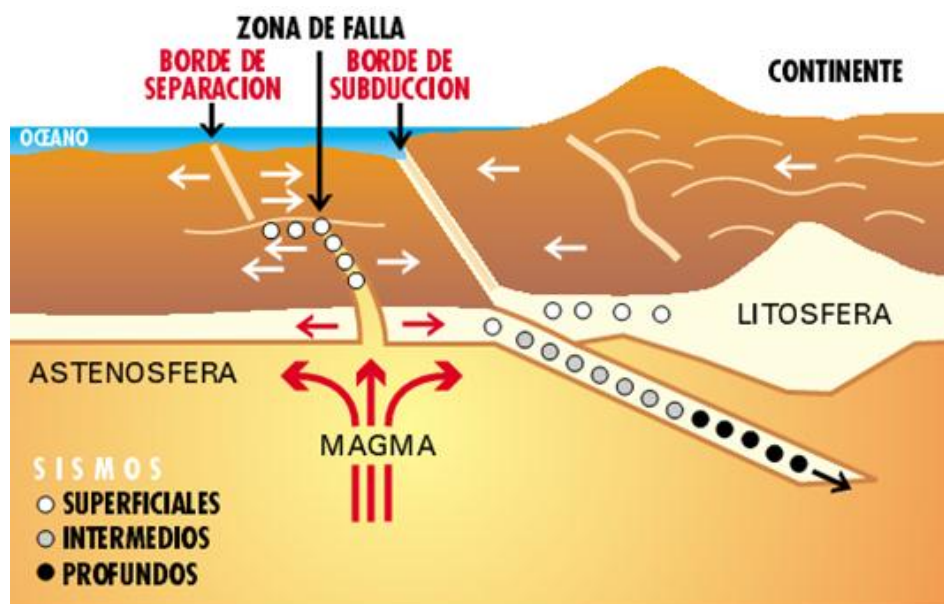


Fuente: Tsunami is a Japanese World, (Hokusai, 1830)

Los Tsunamis se pueden producir por potenciales deslizamientos de rocas y sedimentos en el fondo marino, lo que genera las ondas iniciales y posterior Tsunami, Ver figura 12. (Arbitz, Limsdal, Øvholt, Edersen, & Anneste, 2010), (Stephen N. , 2011).

En la figura 13 se muestra un esquema básico de generación de tsunamis por actividad tectónica entre placas.

**FIGURA 13: Generación de Tsunamis por convergencia o divergencia de placas tectónicas**



Fuente: TSUNAMI, Las Grandes Olas (NOAA, ITIC, & SHO, 2011).

Las ondas grandes oceánicas pueden generar deslizamientos en el fondo marino y viceversa, los dos son fenómenos muy asociados entre si, La figura 14 muestra algunas pendientes en el fondo marino atribuidas a fenómenos de ondas

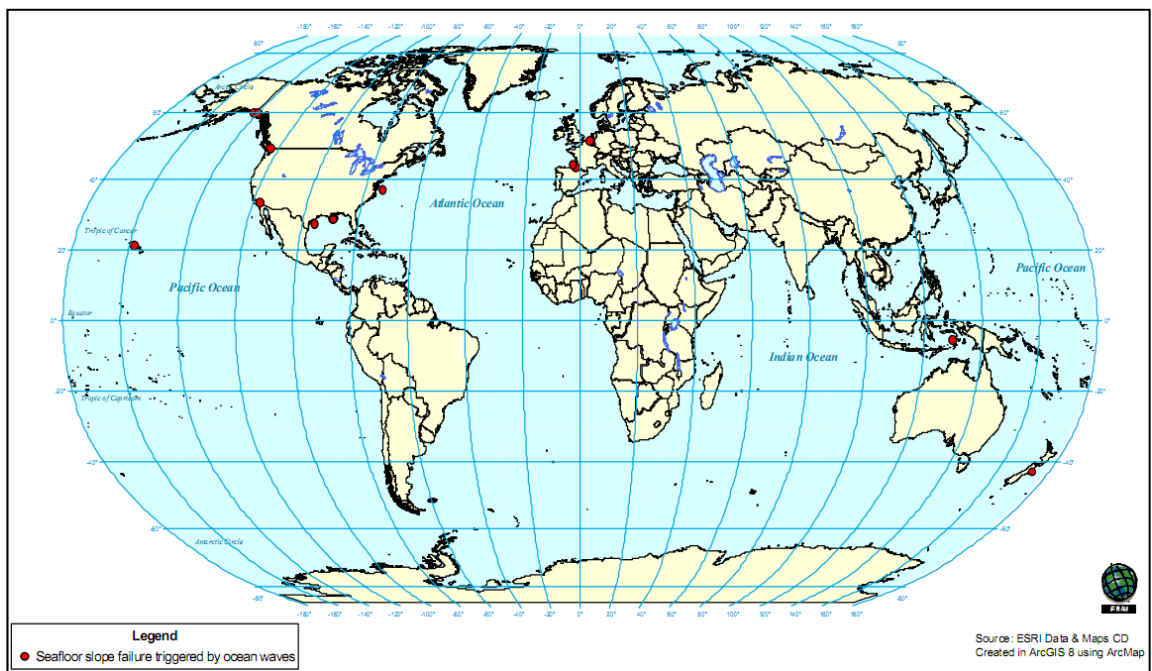
oceánicas o tsunamis, en la figura se observa que para la costa colombiana no se ha presentado caso alguno.

### 3.2.5 Corrientes marinas

Las corrientes marinas también representan un riesgo a nivel del mar, por lo tanto su estudio es indispensable.

Una corriente es el desplazamiento de una masa de algún fluido, ya sea líquido o gaseoso, en el caso de las corrientes marinas el fluido es el agua (Haeger & Bol, 2007), (Ramirez, 2006), (Uriarte, 2007).

**FIGURA 14: Mapa mundial de pendientes submarinas generadas por ondas oceánicas.**



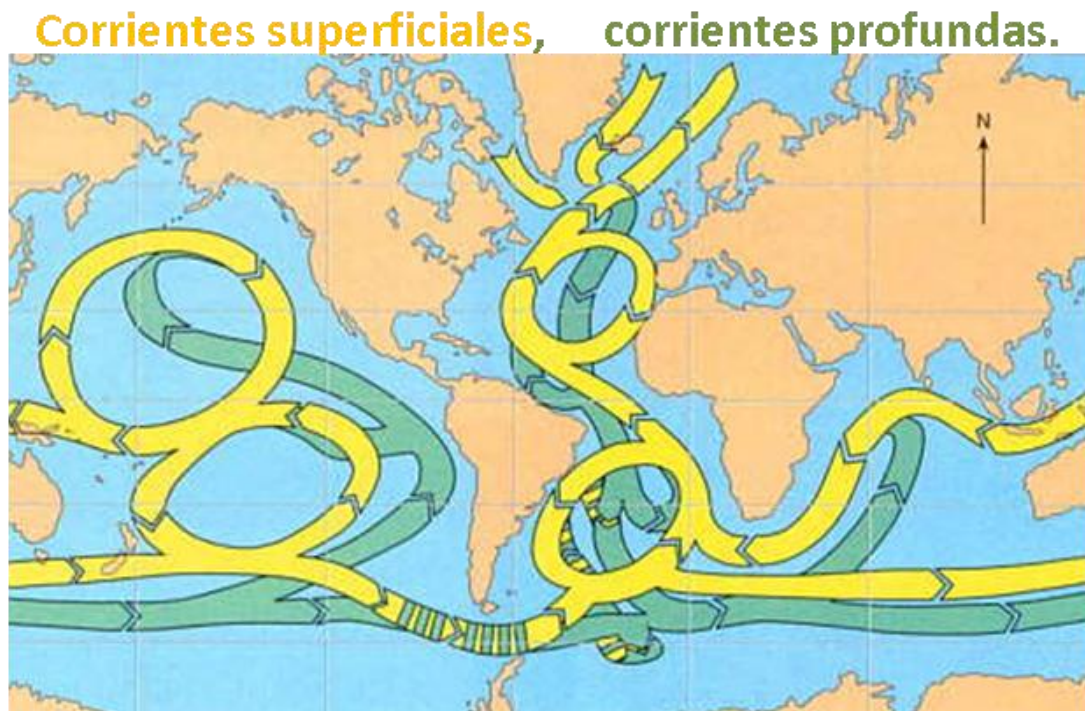
Fuente: (Hance & Wright, 2003)

Las corrientes marinas son masas de agua con desplazamientos propios dentro de los océanos con profundidades diversas y con determinadas direcciones. Según Heck 1976 pueden ser consideradas como ríos dentro de océanos.

Las corrientes marinas son influenciadas por fenómenos dinámicos y constantes como la lluvia, la fuerza gravitacional de la luna, la radiación emitida por el sol, la entrada de corrientes fluviales, el viento, la salinidad y la temperatura (Ver figura 15 al 17).

Las corrientes oceánicas son un fenómeno físico que tienen ligadas unas propiedades como lo son temperatura, dirección, velocidad, profundidad, ancho y caudal.

**FIGURA 15: Corrientes Oceánicas frías y calientes.**



Fuente: Ramírez. J (2006).

Desde hace unas cuantas décadas se sabe que la estructura de las corrientes marinas a escala global es tridimensional, con movimientos horizontales en los que el viento juega un importante papel y con movimientos verticales, en los que la salinidad y las temperaturas son las fuerzas impulsoras. Las corrientes superficiales, observadas y estudiadas desde hace siglos, están por lo tanto ligadas, por movimientos convectivos de agua, a corrientes profundas de características mucho menos conocidas pero cuyo estudio en los últimos años ha recibido un fuerte impulso debido a su importancia oceánica y climática (Ramirez, 2006).

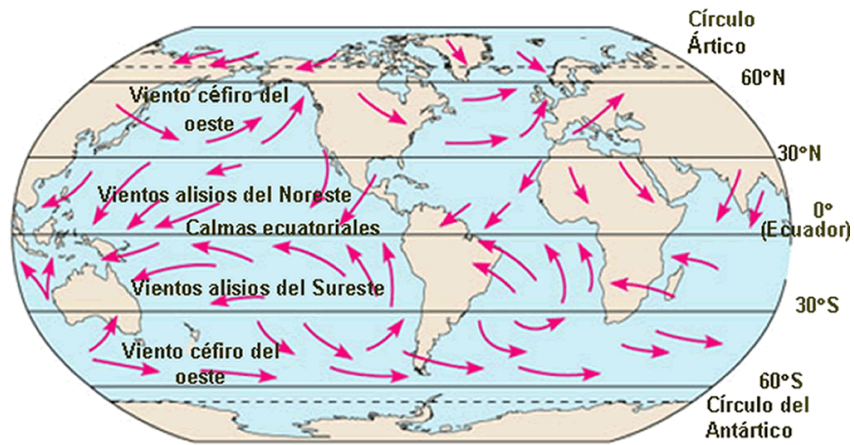
Para muchos trabajos realizados en el mar, las corrientes marinas son un factor importante que se debe tener en cuenta en la caracterización de un área marina determinada; por ejemplo, en las operaciones de perforación Offshore, por lo tanto es necesario conocer los factores que influyen en las corrientes marinas para poder tener controlado y mitigar posibles accidentes.

**FIGURA 16: Forzamiento dinámico en la superficie oceánica.**



Fuente: @The COMET Program, (Haeger & Bol, 2007)

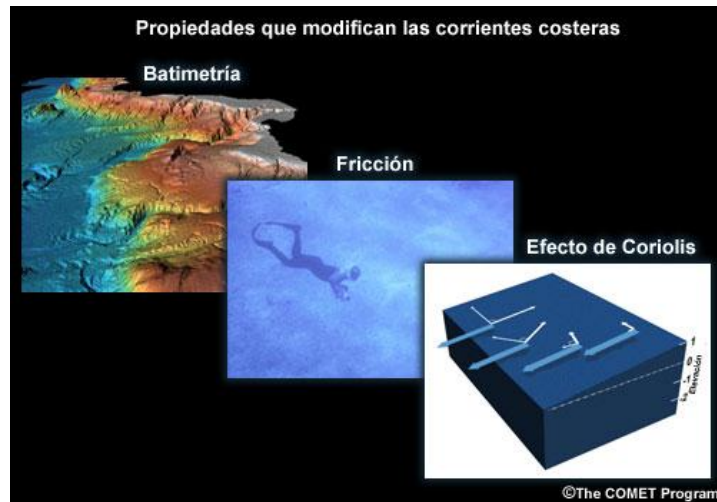
**FIGURA 17: Patrones globales del viento.**



Fuente: (Ramirez, 2006)

Las corrientes marinas pueden ser costeras o en aguas profundas, igualmente pueden darse de forma superficial o corrientes por debajo de la superficie oceánica, Cada tipo de corriente se ve afectada por distintos factores en mayores o menores proporciones, por ejemplo las corrientes costeras ya formadas pueden modificarse principalmente por efectos de batimetría, coriolis y fricción como lo indica la figura 18.

**FIGURA 18: Factores que modifican las corrientes costeras.**



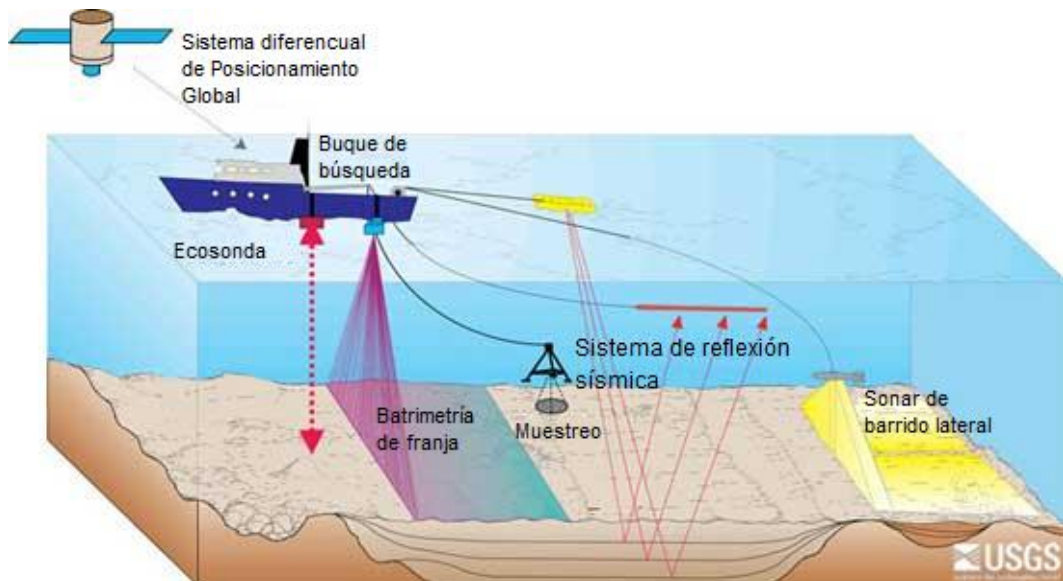
Fuente: @The COMET Program, (Haeger & Bol, 2007).

### 3.2.5.1 Batimetría.

Es el estudio de la profundidad marina; Además es una metodología muy útil y prácticamente necesaria en cualquier objetivo, permite obtener datos precisos de profundidad y estudiar la morfología del fondo con detalles. En su modalidad actual multihaz (Multibeam) se hace muy productiva y rápidamente permite localizar zonas de interés con un cubrimiento amplio del área en estudio. Es imprescindible para evaluar las condiciones y geometría del arrastre de otros equipos en su desplazamiento cercano al fondo en etapas posteriores (ver figuras 19), (Haeger & Bol, 2007), (Ramirez, 2006).

La reflexión sísmica comprende una de las herramientas fundamentales para completar los estudios batimétricos (ver figura 19 y 20).

**FIGURA 19: Instrumentos acústicos que se utilizan para mapear los fondos marinos.**

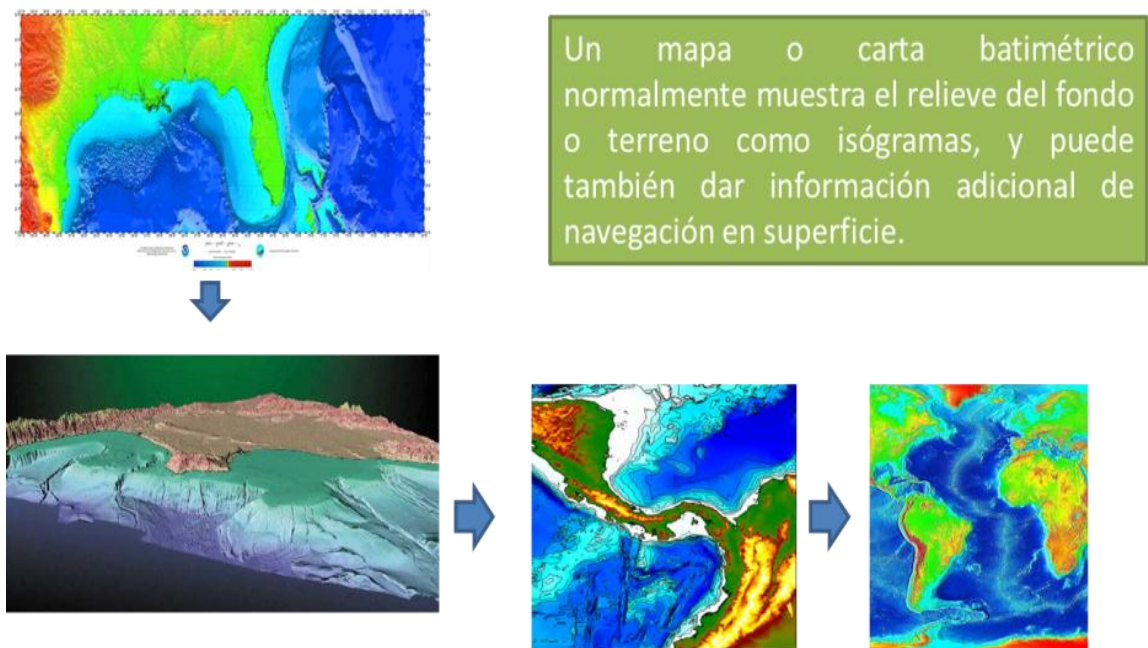


Fuente: U.S Geological Survey, (USGS, Gulf of Maine Mapping Initiative (GOMMI) , Mapping techniques)

Los dispositivos o componentes de un estudio sísmico aplicado a batimetría comprenden:

- GPS
- Ecosonda mide la profundidad del agua
- Batimetría de franja mide profundidad agua e Intensidad del sonido.
- Sistemas de Reflexión sísmica mide intensidad del sonido en suelo marino y subcapas del suelo marino.
- Sidescan-sonar produce el equivalente marino de una fotografía aérea.
- Muestreador de fondo.

**FIGURA 20: Metodología para construir mapas batimétricos a partir de la batimetría.**



Fuente: Modificada de (Guevara Córdoba, 2007, pág. 7), (Frias, 2005), (Biscontin, Pestana, NGI, & USGS), (Bass, 1985)

### 3.2.5.2 Efecto Coriolis.

Es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial) cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia (ver figura 21).

La **fuerza de Coriolis** es una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema en rotación y se describe su movimiento en ese referencial.

### 3.2.5.3 Viento geostrófico

El viento geostrófico es una aproximación física al viento real. En él se considera que existe un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la fuerza generada por el gradiente de presión o fuerza bórica (a esto se le llama aproximación geostrófica o equilibrio geostrófico). (Haeger & Bol, 2007)

**FIGURA 21: Efecto de coriolis a nivel global.**

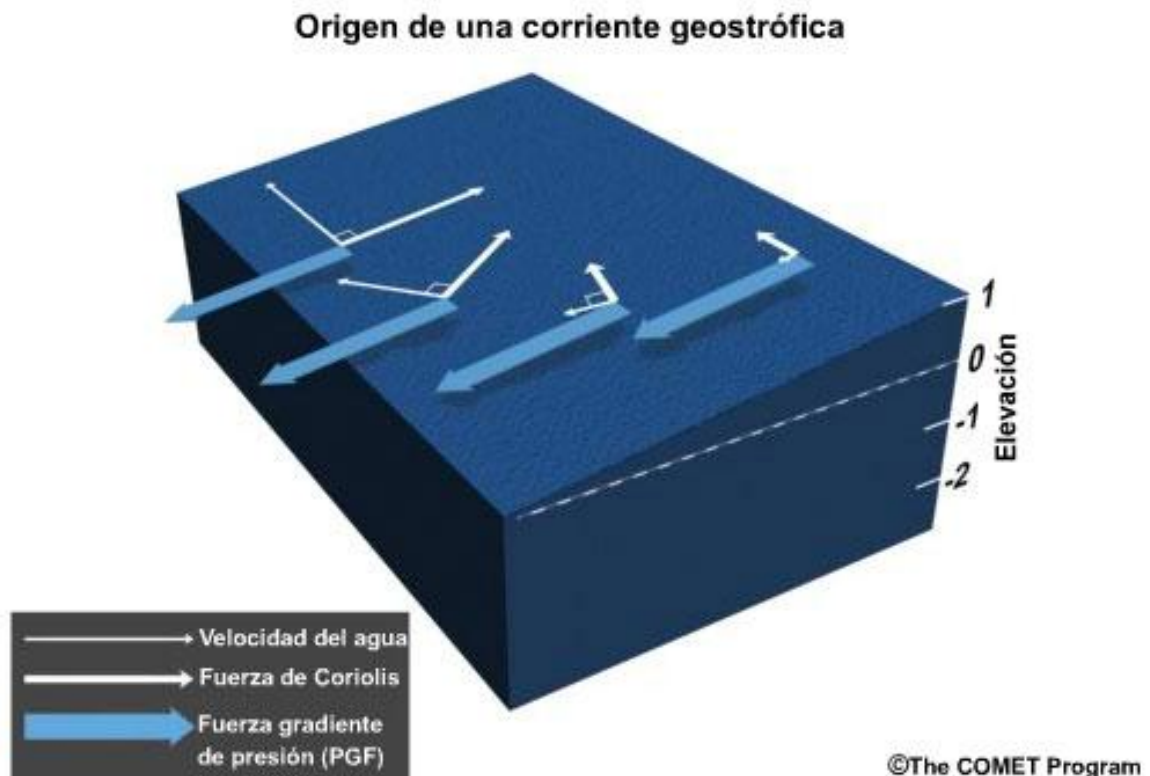


Fuente: Modificada de (Persson, 2005, pág. 3).

El viento Geostrófico por ser ideal no se cumple en toda superficie terrestre, pues el equilibrio entre las fuerzas de coriolis y de gradiente de presión no siempre tiene la misma magnitud (Ver figura 22), es de recordar que la fuerza de coriolis tiene un radio de acción a medida que se acerca al ecuador, pero en esa línea como tal no es visible este efecto (Ramirez, 2006).

La fricción es dada por el roce entre las corrientes que se desplazan en distintas direcciones y el choque contra las costas, de aquí la importancia de estudios batimétricos.

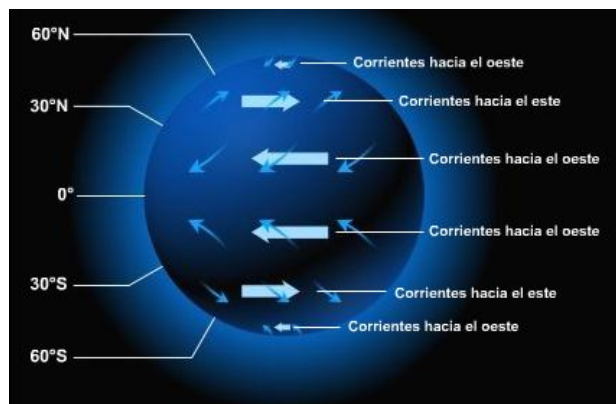
**FIGURA 22: Viento geostrófico ideal dado por el equilibrio entre la fuerza de coriolis y el gradiente de presión.**



Fuente: @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

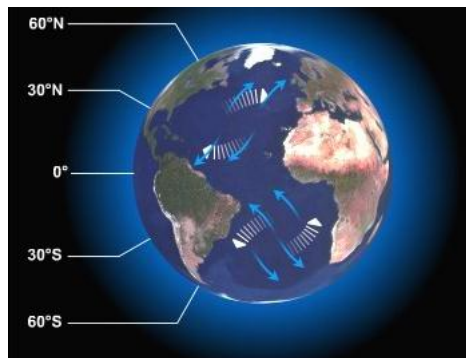
En las figuras 23 y 24 se muestra la representación ideal de corrientes marinas debido a los vientos; en la figura 23 el efecto de vientos paralelos y alisios sin tener en cuenta la fricción con los planteas mientras que en la figura 24 se muestra la influencia de los continentes y el efecto de la batimetría generando giros subtropicales.

**FIGURA 23: Sección del globo con vientos y corrientes producidas por el giro de la tierra sin continentes.**



Fuente: @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

**FIGURA 24: Sección del globo con vientos y corrientes producidas por el giro de la tierra con continentes.**



Fuente: @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

#### 3.2.5.4 Principales mecanismos que impulsan las corrientes oceánicas.

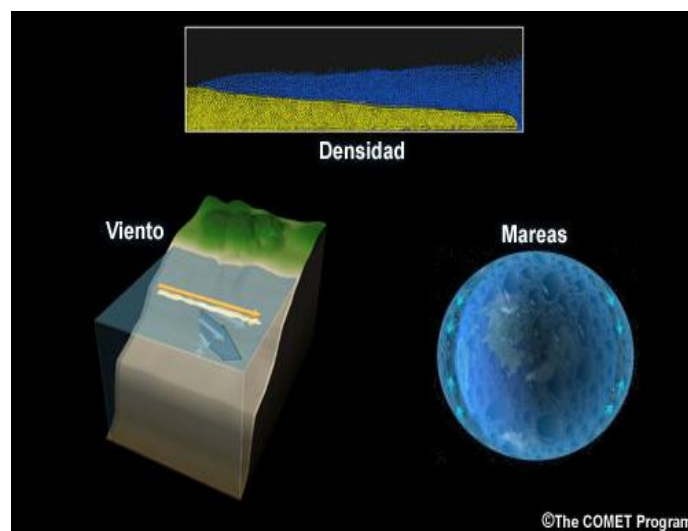
Son 3 los principales mecanismos que aportan la energía que estimulan al movimiento de las masas de agua, estos son el viento, la densidad y las mareas como se observa en la figura 25.

La alta variabilidad espacial y temporal en aguas someras afecta la manera en que medimos y modelamos las corrientes costeras. Las redes de observación requieren una densidad mayor con intervalos temporales menores. Los modelos numéricos requieren una mayor resolución con incrementos temporales menores para simular las corrientes costeras con precisión (Haeger & Bol, 2007).

#### 3.2.5.5 Corrientes impulsadas por gradientes de densidad.

Cuando se juxtaponen dos masas de agua de diferentes densidades en sentido horizontal, el agua de menor densidad tiende a fluir sobre el agua de mayor densidad y el agua de mayor densidad tiende a fluir debajo del agua de menor densidad (Haeger & Bol, 2007).

**FIGURA 25: principales mecanismos que impulsan las corrientes oceánicas.**



Fuente: @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

Varios procesos que ocurren cerca de los litorales llevan a diferencias de densidad horizontales:

- escorrentía de aguas dulces proveniente de tierra firme
  - escorrentía estacional (semanas)
  - intensas lluvias locales (horas - días)
- evaporación en bahías poco profundas
- afloramiento
- calentamiento/enfriamiento estacional
- mezcla vertical impulsada por el viento
- advección horizontal de temperatura o salinidad.

Las corrientes forzadas por eventos de escorrentía estacional o vientos persistentes desarrollan un componente geostrófico importante. La figura 26 muestra la secuencia de arriba hacia abajo de una representación ideal de corrientes de densidad, donde una masa de agua dulce de mayor densidad inicialmente entra en contacto con una masa de agua salada, pero como la corriente de agua dulce es más densa la corriente de agua salada sale sobre está generando el movimiento (Ramirez, 2006).

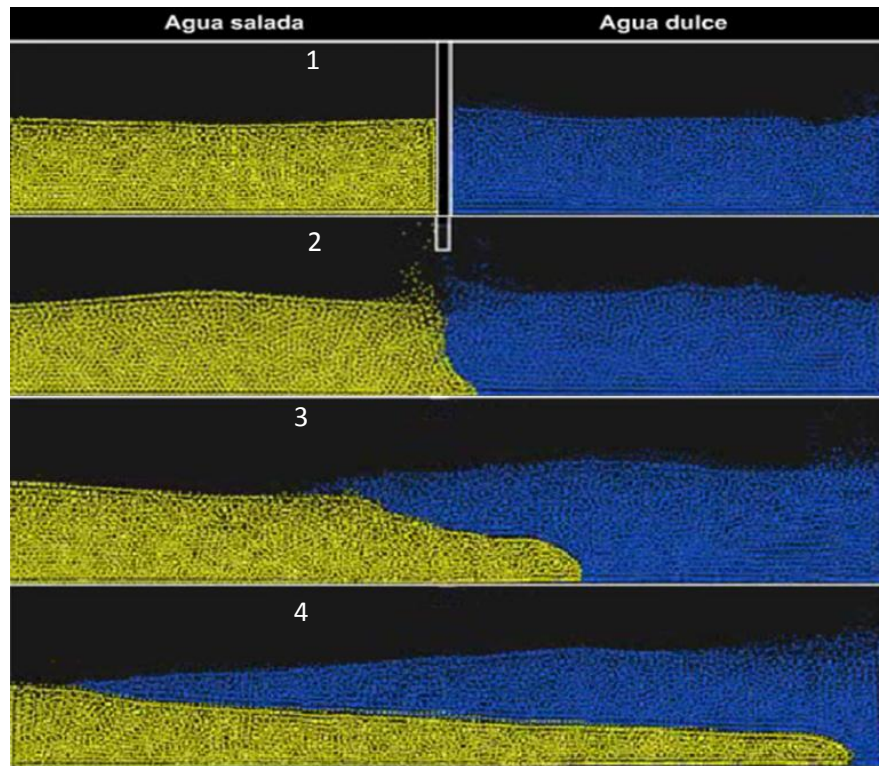
#### **3.2.5.6 Corrientes de mareas.**

La atracción gravitacional del Sol y de la Luna produce fuerzas de tracción horizontales. Estas fuerzas de tracción hacen deslizar el agua sobre la superficie de la Tierra y producen las corrientes de marea. Una mayor amplitud de mareas suele producir velocidades de corriente de marea mayores.

Lejos de tierra firme, las corrientes de marea tienden a describir una elipse en cada ciclo de mareas. En las bahías y los estuarios cerrados, las corrientes de

marea tienden a cambiar de dirección rápidamente después de un breve período de "repunte" (ver figura 27).

**FIGURA 26: Secuencia de la representación ideal de una corriente de densidad.**

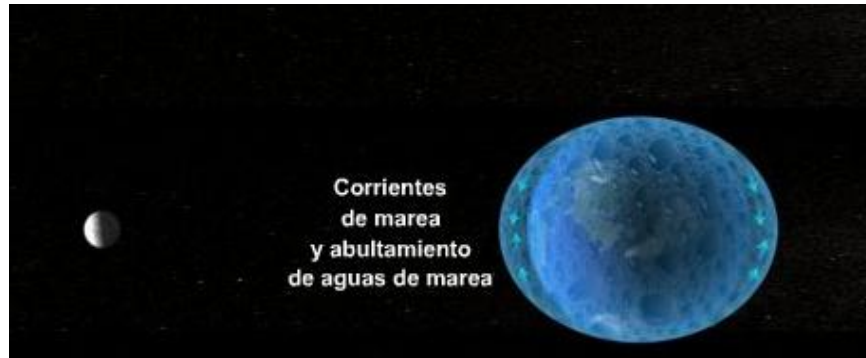


Fuente: Modificada de @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

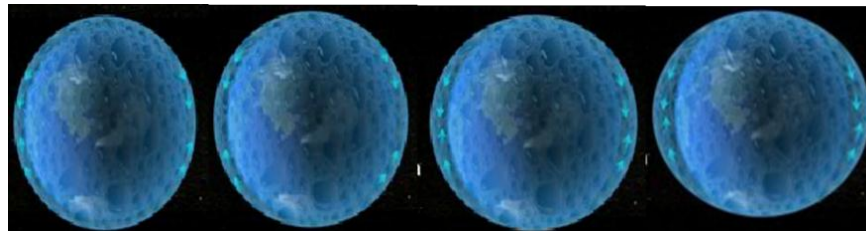
En los canales largos y abiertos las corrientes más intensas coinciden con la pleamar y la bajamar, un patrón que se denomina onda progresiva. En las pequeñas cuencas cerradas, el repunte coincide con la pleamar y la bajamar, un patrón que llamamos onda estacionaria.

En algunos ríos cerca de la costa, la corriente del cauce nunca cambia de dirección, pese a que la elevación del agua aumenta y disminuye (Ramirez, 2006).

**FIGURA 27: Corrientes de marea producidas por la atracción de la luna.**



**Abultamiento de aguas de mareas.**



Fuente: Modificada de @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

### **3.2.5.7 Corrientes impulsadas por el viento.**

La velocidad de las corrientes impulsadas por el viento es mayor en la superficie y disminuye rápidamente con la profundidad.

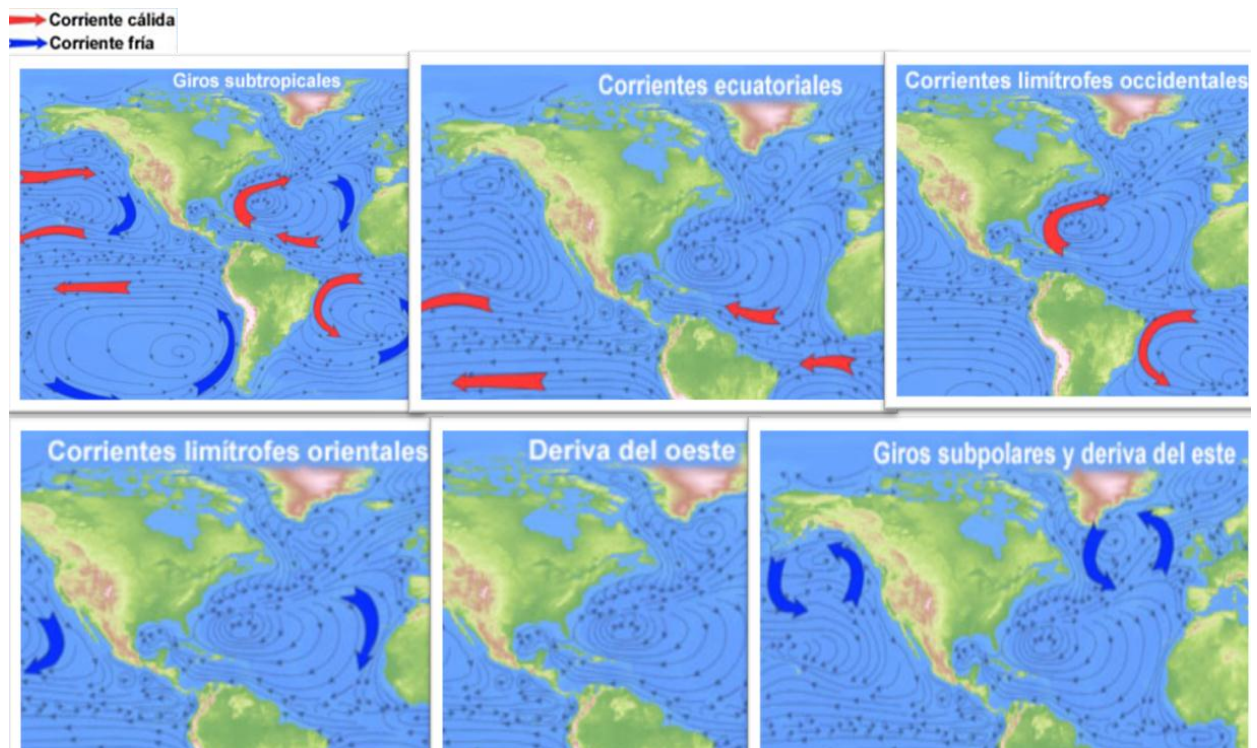
Las aguas someras no son lo suficientemente profundas para producir una espiral de Ekman completa; En consecuencia, a medida que el agua se vuelve menos profunda la dirección de la corriente se acerca a la dirección del viento y la velocidad de la corriente disminuye.

Cuando el viento empuja el agua hacia el litoral, el nivel local del mar aumenta (ascenso) y cuando el viento aleja el agua del litoral, el nivel local del mar disminuye (descenso). En aquellas áreas con una amplitud de mareas relativamente pequeña, esta corriente impulsada por el viento puede predominar sobre la corriente de marea.

Cuando los vientos sostenidos se aflojan de repente, la corriente forzada por el viento sigue impulsada por momento como corriente inercial. Esta corriente inercial se ve como una espiral cuyas vueltas van disminuyendo en amplitud (Hellstrand, 1990).

En la figura 28 se observa que las corrientes que más afectan el Caribe colombiano son las corrientes cálidas de giros subtropicales, las corrientes cálidas ecuatoriales, y en menor medida las corrientes cálidas limítrofes occidentales y las frías limítrofes orientales.

**FIGURA 28: Representación de las corrientes impulsadas por el viento que afectan el Caribe Colombiano.**

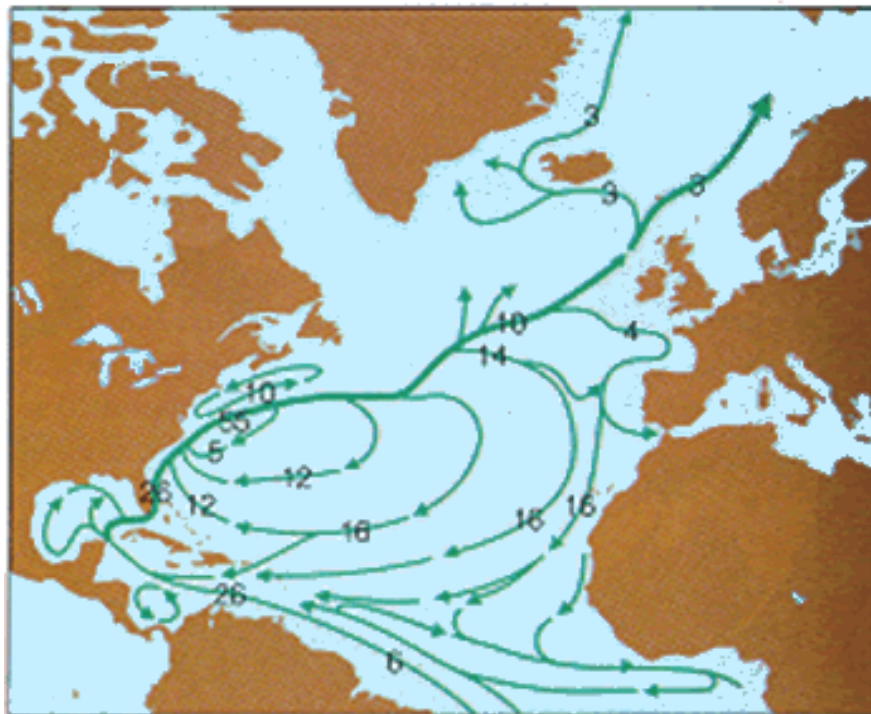


Fuente: Modificada de @ The COMET Program (Haeger & Bol, 2007).

Los oceanógrafos identifican el movimiento de las masas de agua a través de grandes distancias mediante la medición de salinidad y la temperatura del agua de masas de agua que se hunden y conservan estas propiedades.

Las velocidades de flujo en corrientes oceánicas se miden en sverdrups, (1sv = 1 millón de metros cúbicos de agua por segundo), en el Caribe Colombiano las velocidades de las corrientes oscilan alrededor de 15 Sv (Uriarte, 2007) Ver figura 29.

**FIGURA 29: Isocurvas de velocidad de las corrientes oceánicas en el Caribe Colombiano.**



Fuente: (Ramirez, 2006)

### 3.3 RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL LECHO MARINO

Los riesgos a nivel del lecho marino son todos los eventos o circunstancias que se dan en la superficie del suelo marino y representan un riesgo para las instalaciones de fondo, la tubería en la columna de agua y la estabilidad de la plataforma en superficie por inestabilidad en los anclajes.

Los movimientos de suelos, masas y sedimentos del fondo marino se generan por distintos mecanismos de activación relacionados a la dinámica natural y a las operaciones realizadas por el hombre; a continuación se mencionan los mecanismos naturales, los mecanismos artificiales se mencionan en la sección de riesgos artificiales

**Mecanismos de activación de movimientos en el suelo marino:** La naturaleza en toda su dimensión es dinámica y el fondo del mar no es la excepción, por tal razón son distintos los mecanismos naturales los que ayudan a activar el movimiento de sedimentos, masas y sedimentos; estos movimientos requieren de un análisis y cuidado especial en las operaciones de perforación puesto que representan la generación de riesgos adicionales a la del movimiento en sí de los componentes del fondo oceánico.

Los mecanismos de mayor importancia y estudio considerados como acatadores de la dinámica del fondo oceánico son:

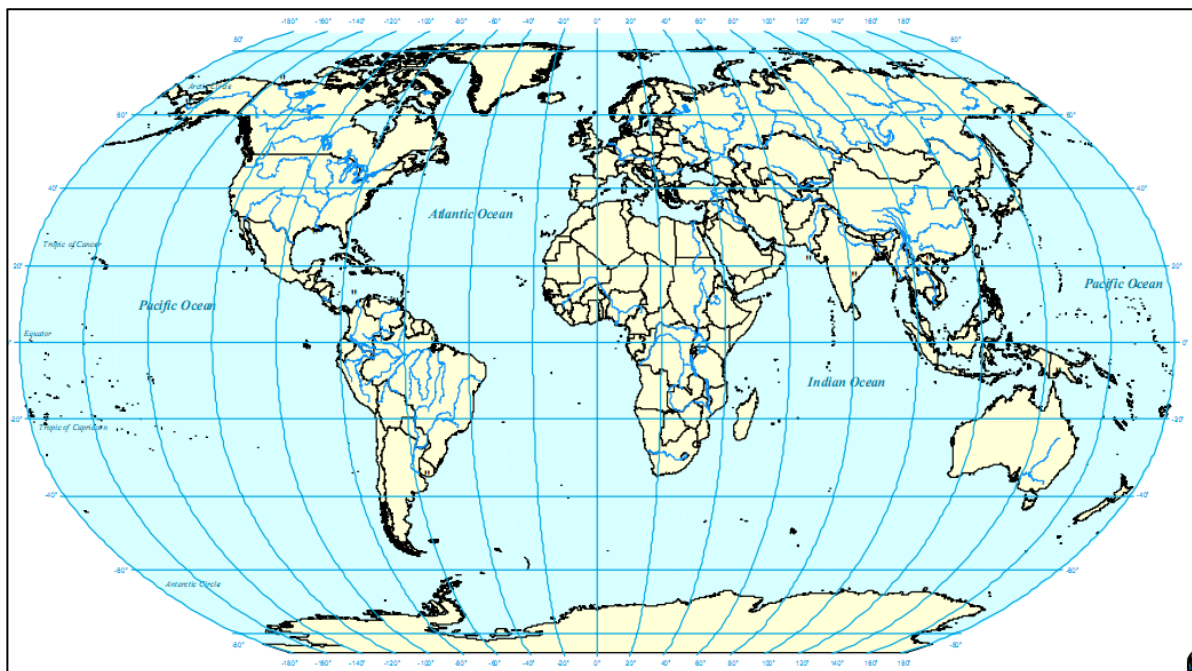
- **Altas velocidades de sedimentación:** Estas generan un exceso de las condiciones de la presión de poro, baja consolidación en los sedimentos y un incremento en el nivel de esfuerzo cortante en el talud marino.
- **Aumento de la presión de poro:** Pueden darse aumentos desproporcionados de presión de la formación debido a fenómenos de licuefacción o descomposición.

- **Erosión en los sedimentos superficiales:** La erosión ayuda a formar grandes inclinaciones del talud e incrementan las fuerzas gravitacionales y el esfuerzo cortante a lo largo de superficies potenciales al movimiento.
- **Disociación de hidratos de gas:** La resistencia del suelo e incrementos en la presión de poro son resultado de la fusión de hidratos de gas a causa de un aumento de temperatura o reducción de presión.
- **Flujo de fluidos:** Algunas áreas son propensas a la expulsión de fluidos, como es el caso de los volcanes de lodo o las ventanas de gas, en cualquiera de estos casos los fluidos salen al fondo marino, y si es gas, este tiende a salir a superficie oceánica.
- **Desplazamiento de masas:** Los procesos de diapirismo y los volcanes de lodo tienden a desplazar masas en el fondo oceánico disminuyendo la resistencia de este y aumentando la posibilidad del movimiento de sedimentos.
- **Actividad sísmica:** Debido al cambio de régimen de esfuerzos ocasionados por fallas, sinclinales y otros eventos geológicos, se pueden obtener estratos con sobrepresión y estratos poco consolidados; ayudando de esta forma a tener riesgos de flujo somero por un lado y por otro el movimiento de sedimentos en fondo marino.
- **Inversión de esfuerzos:** Los esfuerzos pueden invertirse por el cambio en la dirección de las corrientes marinas, las tormentas son las encargadas de cambiar la dirección de las corrientes e invertir los esfuerzos por medio de la aplicación de esfuerzos cortantes.

- **Suelos sensibles:** En suelos poco consolidados se pueden dar deslizamientos retrogresivos y aumentar la zona afectada a causa de colapso de estos.
- **Presión de la columna hidrostática:** En este caso la columna hidrostática es la correspondiente a la presión ejercida por el agua de mar, puesto que un aumento o disminución del nivel del mar puede ocasionar la disociación de hidratos de gas, y expansión de gas libre superficial. El gas liberado por estos eventos ayuda al movimiento de masas en el fondo marino, como deslizamientos que incluso pueden generar Tsunamis.
- **Aumentos de Temperatura:** Gracias a las épocas de sequía y de verano prolongadas se puede aumentar la temperatura en fondo marino por medio de las corrientes marinas ayudando así a la fusión de hidratos de gas y el movimiento del suelo marino.

En la figura 30 se muestra el mapa mundial de los principales deltas, hay que rescatar la desembocadura de los ríos tiene un gran aporte el desarrollo de los riesgos geológicos debido a que aumenta la rata de sedimentación y descarga de sedimentos en el lecho marino.

**FIGURA 30: Mapa mundial de distribución de los deltas de los ríos.**



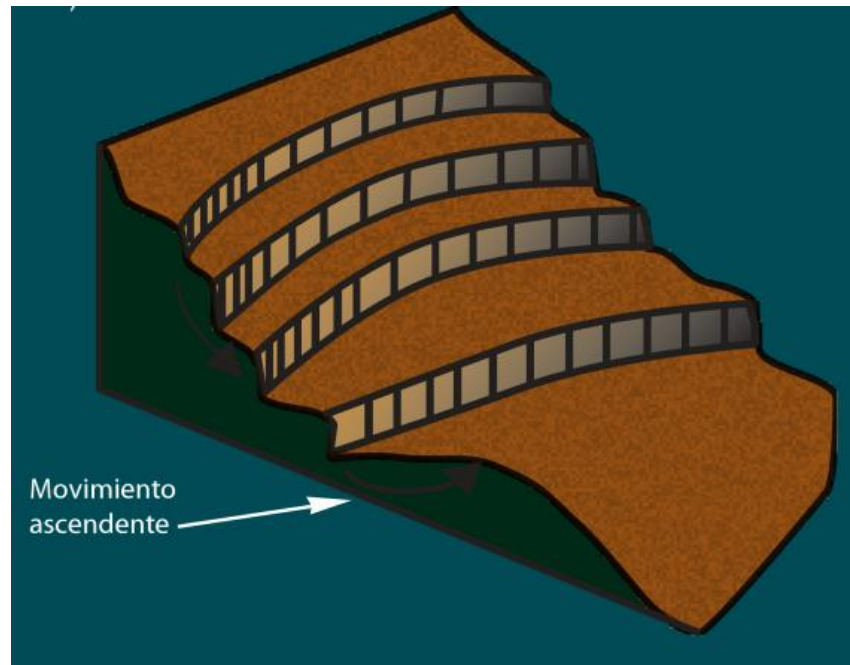
Fuente: (Hance & Wright, 2003)

### **3.3.1 Fallas Escarpadas**

Los periodos de huracanes las fallas de desgarre generan los escarpes (rift valley) y la inestabilidad del suelo marino, si los escarpes generados son muy grandes esto provoca la erosión ver figura 31.

Los escarpes presentan facetas de formas triangulares o trapezoidales, consecuencia de la acción de los barrancos que corren perpendicularmente a ellos y se dirigen hacia el labio hundido de la falla (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010).

**FIGURA 31: Movimiento Ascendente de material en un escarpe de falla.**



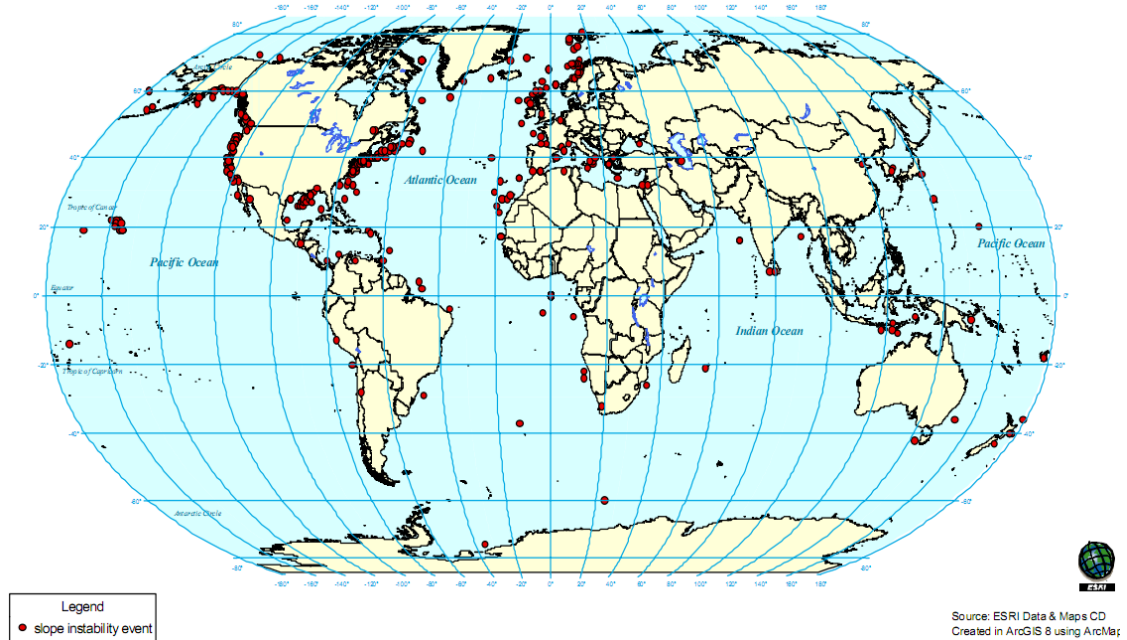
Fuente: (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010)

La figura 32 muestra el mapa mundial de distribución de eventos de falla en pendientes submarinas, dentro de los que se destacan algunos en la costa Caribe colombiana, sin embargo no es un mapa muy actualizado, porque se pueden encontrar más eventos asociados a la costa Caribe colombiana.

### **3.3.2 Ventanas de gas**

Las ventanas de gas (Gas Vents) son importantes porque tienen inicialmente un material el cual cristaliza el gas hidrato y porque este dispersa en sedimentos el manejo de procesos microbiales que resultan de altos contenidos de roca carbonatada (Van Rossom, 2007). Las abundantes burbujas de gas que se generan en el suelo marino debido a las ventanas de gas pueden ser observadas en la superficie del mar más o menos a unos 890 m de profundidad.

**FIGURA 32: Mapa mundial de distribución de los eventos de falla en escarpes o pendientes submarinos.**

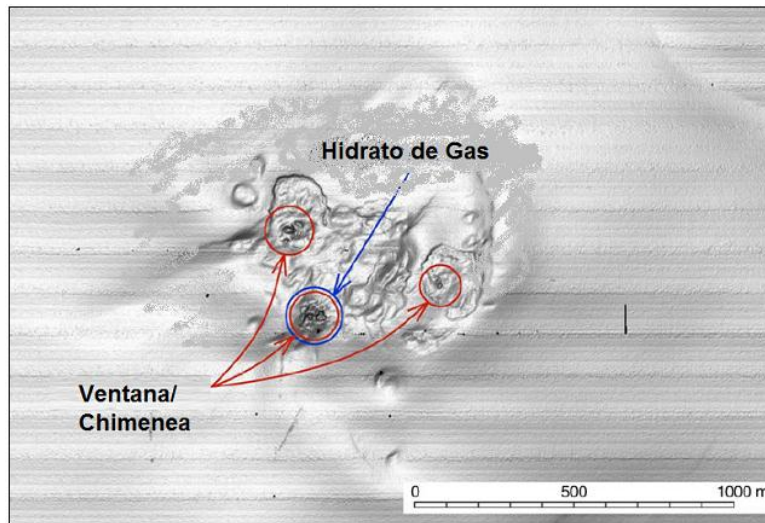


Fuente: (Hance & Wright, 2003)

El gas que migra por las ventanas de gas se cristalizan rápidamente, al encontrarse e interactuar con agua, y pueden observarse como sólidos blancos, a través de ellos llena la fractura de hidratos de gas con lodo en el suelo marino, es por eso que se dice que los hidratos están asociados con las ventanas de gas por que se filtran a través de las Fracturas (Gallagher, 2003). (Ver figuras 33 y 34).

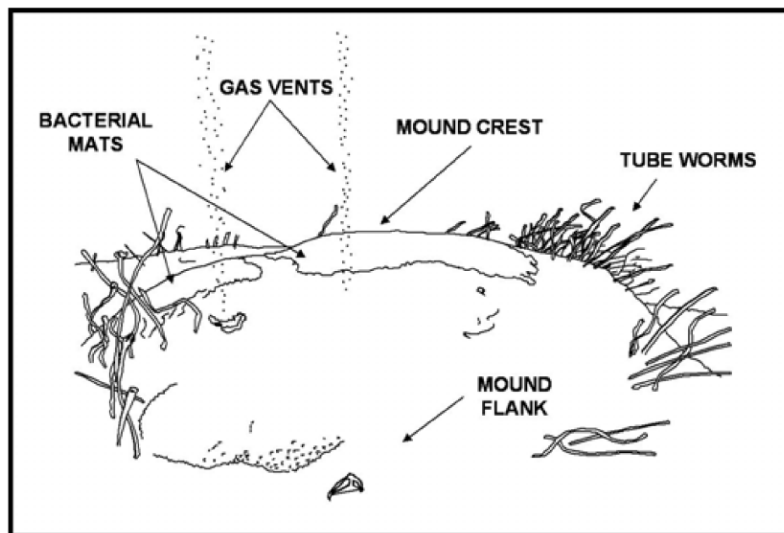
La figura 33 muestra la morfología irregular del fondo marino donde además se observa que ha cambiado gracias a la aparente aparición de ventanas de gas en una zona donde previamente se ha identificado hidratos de gas (Sassen, Roberts, Jung, & Lutken, 2006).

**FIGURA 33: Formación de la ventana de gas a partir del Hidratos.**



Fuente: (Sassen, Roberts, Jung, & Lutken, 2006)

**FIGURA 34: Montículo de la salida de gas a través de las ventanas.**



Fuente: (Sassen, Milkov, & Defreitas, 2002)

Los gases de hidrocarburos a menudo se observan en afloramientos en el fondo oceánico como resultado de la disociación de hidratos de gas de los sedimentos

someros. MacDonald et al en 1994 sugirieron que estas ventanas de gas se originaban por la descomposición de los hidratos de gas como se observa en la figura 34. No obstante, la hipótesis ha sido probada en la vertiente del Golfo de México mediante el análisis de las propiedades moleculares e isotópicas de los gases emitidos por la ventana de gas al agua como resultado de la disociación de los hidratos (Sassen, Milkov, & Defreitas, 2002).

### **3.3.3 Volcán de Lodo**

Es un fenómeno geológico característico de los márgenes continentales originado por la acumulación de los sedimentos al pie de los taludes continentales.

Grandes cantidades de hidrocarburos se escapan de los fondos marinos, a través de simples chimeneas gaseosas, conocidas como volcanes de lodo o pockmarks. Los científicos denominan a estos derrames "surgencias frías", en oposición a las fuentes hidrotermales, muy calientes, presentes en las proximidades de las dorsales oceánicas, donde la actividad volcánica es intensa. "Estas emanaciones, de metano principalmente (Ver figura 35), son el resultado de la descomposición de la materia orgánica contenida en los sedimentos, o pueden originarse a más profundidad en los depósitos de petróleo. El metano, así como el agua contenida en los sedimentos, quedan atrapados bajo la capa sedimentaria y, por efecto de la presión, se escapan a través de las fisuras de los fondos marinos" (Espinosa & Mateus, 2010).

En algunos volcanes de lodo una parte del metano emitido queda capturado en forma de cristales de hidrato, una mezcla sólida de gas y agua, que podría constituir una valiosa fuente de energía para el futuro, aunque al mismo tiempo representa un peligro potencial debido al calentamiento de los océanos (Gallagher, 2003), (Strout & Tjelta, 2007).

**FIGURA 35: Burbuja de gas en un volcán de lodo Rumania.**



Fuente: (Radu, 2009)

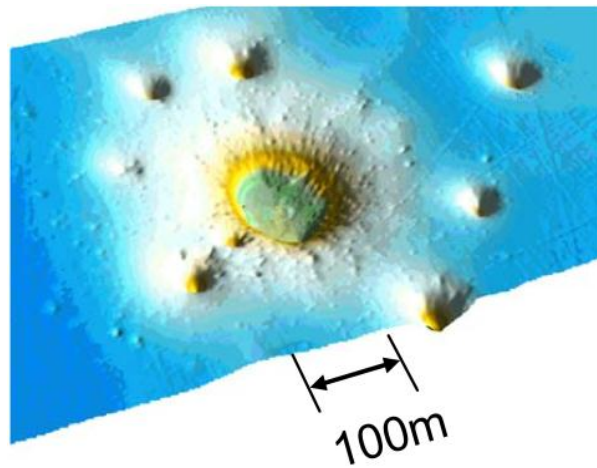
Cada volcán es diferente, por lo que la tarea de los científicos es enorme. Pero ese tipo de estructura es el lugar de vida de los extremófilos, cuya principal fuente de energía no es la fotosíntesis sino la quimiosíntesis, es decir, la producción de energía a partir de los componentes químicos de los fluidos fríos, principalmente del metano.

Los volcanes de lodo representan un problema potencial durante las operaciones de perforación offshore, debido a que provocan deslizamientos de material, inestabilidad del suelo marino, inestabilidad de hidratos y además originan olas que posteriormente se pueden transformar en Tsunamis. Este último, es un problema que requiere de especial cuidado por las consecuencias que deriva en la plataforma y las otras unidades de perforación (Espinosa & Mateus, 2010), (Feeley, 2007), (Strout & Tjelta, 2007).

La mayor concentración de este tipo de volcanes se encuentra en los alrededores del Mar Caspio; aproximadamente, unos 300 entre más de 700 conocidos en todo el mundo.

Un componente importante en la investigación de riesgos someros es la presencia de Volcanes de Lodo, estos son usados como marcas para mediciones de perfiles de presión, gradientes de temperatura y la identificación de trampas de gas; en los volcanes de lodo al igual que las ventanas de gas pueden salir sedimentos y gas como se puede observar en la figura 36, en ésta se muestra volcanes asociados a trampas pasivas de gas somero (Strout & Tjelta, 2007).

**FIGURA 36: Grupo de Volcanes de Lodo en el Campo Troll, Mar de Noruega.**



Fuente: (Strout & Tjelta, 2007)

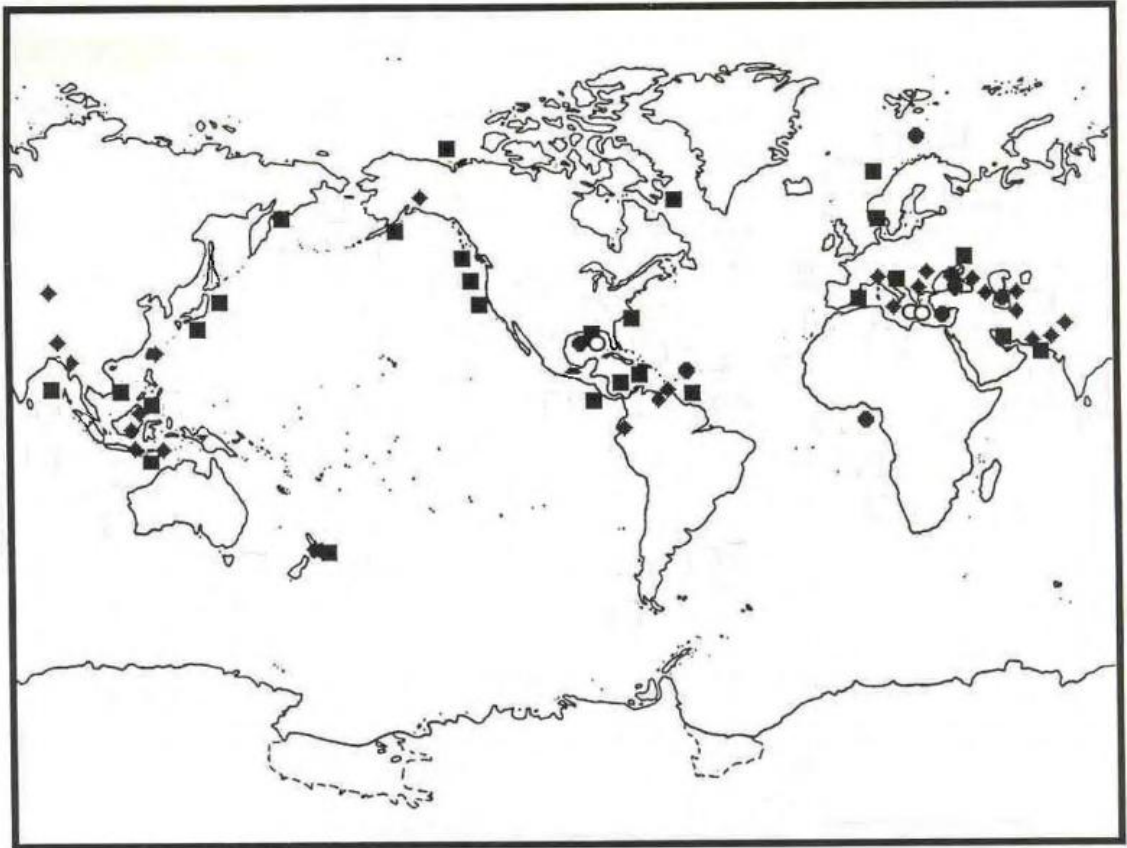
En la figura 37 se muestra el mapa mundial de volcanes de lodo, los círculos y los diamantes representan los volcanes de lodo que ya han sido encontrados y se conoce de ellos, mientras que los cuadros representan los posibles volcanes de lodo que se inferían desde el 2000, estudios realizados en la costa Caribe Colombiana muestran la existencia de volcanes de lodo al igual.

### **3.3.4 Inestabilidad de Taludes**

Este tipo de inestabilidad se genera principalmente por la rápida sedimentación, erosión y movimiento de las masas en el suelo marino, filtración de gas o

fluidos desde capas inferiores, generando una reducción en los esfuerzos, y a su vez provocando su inestabilidad.

**FIGURA 37: Mapa mundial donde se destaca la presencia de volcanes de lodo.**



Fuente: (Strout & Tjelta, 2007)

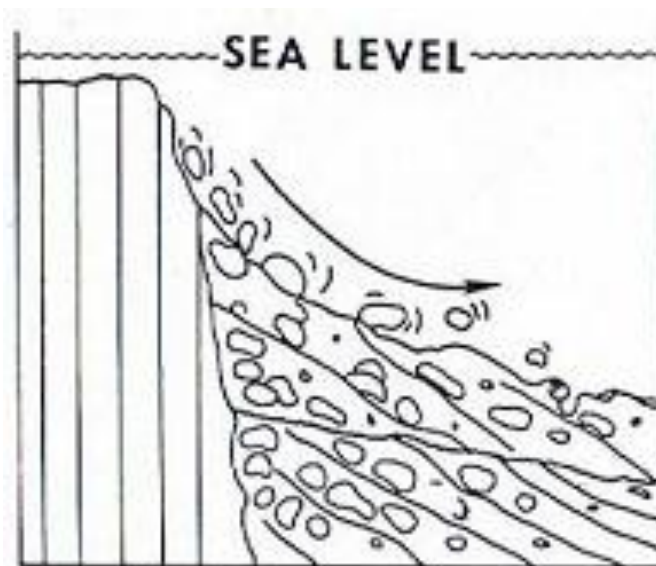
La inestabilidad de las cuestas también es provocada por aumentos en la temperatura, que a su vez, cambia las condiciones de estabilidad de las zonas de hidratos, los cuales sufren una expansión y posterior disociación, generando una capa de gas libre que intenta migrar hacia la superficie. También se ve influenciado por la presencia de fallas activas, que a su vez generan movimientos de tierra. El tectonismo activo, y por lo tanto los terremotos,

también son causantes de la inestabilidad que sufre el suelo marino, después de la plataforma continental.

Existen varios tipos de inestabilidad de taludes en el fondo marino, estos se son: Caída de rocas (Submarine Rockfall), Deslizamiento o depresión de sedimentos (Submarine Slide or Slump), flujo submarino (submarine Flow) y flujo de turbiditas (Submarine Turbidity-Flow).

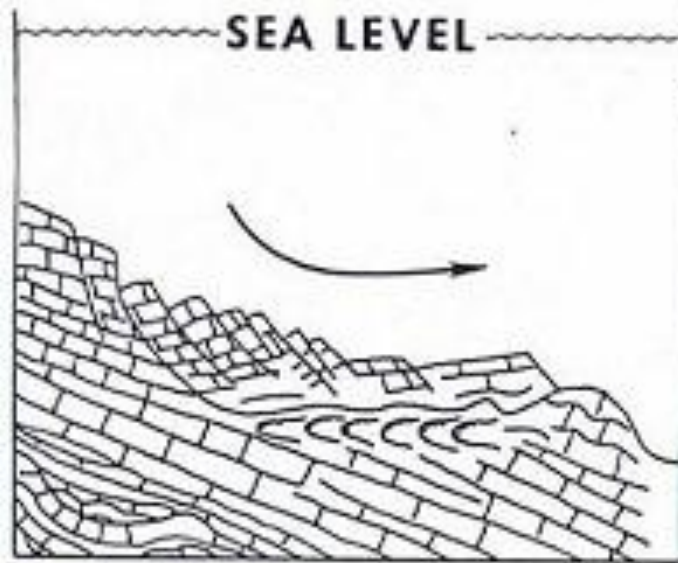
En las figuras 38 a 42 se pueden apreciar detalladamente cada uno los tipos eventos que se pueden considerar como inestabilidad de taludes o que contribuyen a la desestabilización del suelo submarino (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010), (Feeley, 2007).

**FIGURA 38: Caída de Rocas Submarinas**



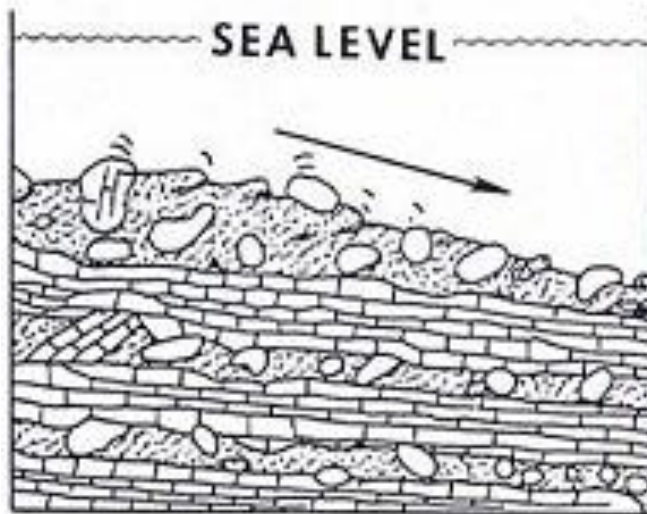
Fuente: (Feeley, 2007)

**FIGURA 39: Deslizamiento y depresiones**



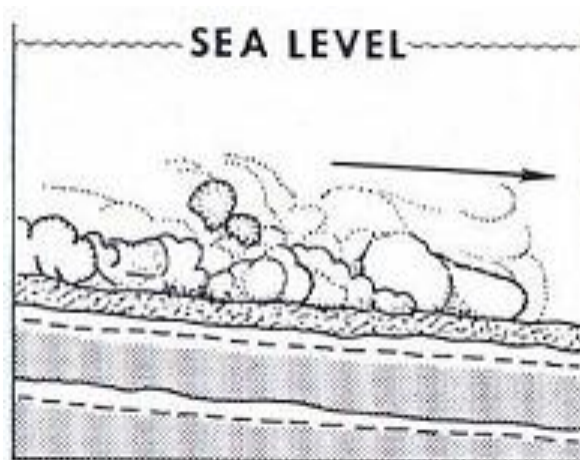
Fuente: (Feeley, 2007)

**FIGURA 40: Flujo Submarino de sedimentos.**



Fuente: (Feeley, 2007)

**FIGURA 41: Flujo Submarino de Turbaditas.**



Fuente: (Feeley, 2007).

Prior y Coleman estudiaron a fondo la dinámica de los deslizamientos y flujo de sedimentos que ocurre en el fondo del mar y a partir de este elaboraron la siguiente clasificación que depende de: la forma de desplazamiento (rotación o translación), del tamaño de grano, si es deslizamiento potencial o flujo de sedimentos, la cantidad de sedimentos desplazados y si este fenómeno es retrógrado (Feeley, 2007).

### **3.3.5 Avalanchas**

Son un tipo de deslizamiento, solo que este es considerado de mayor impacto, puesto que no lleva un solo componente, sino, que lleva una mezcla de sedimentos, rocas, fragmentos orgánicos y otros componentes que se encuentre a su paso (Stephen N. , 2005). Este es un problema que genera gran impacto durante la perforación offshore cuando ocurre cerca de las instalaciones y facilidades del lecho marino puesto que tienen suficiente energía para arrancarlos y llevárselos o para causar daños irreparables, además afecta las instalaciones en superficie marina debido a que la plataforma está anclada en el fondo marino y desde la plataforma se baja tubería que también puede ser impactada por la

avalancha (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009), (Stephen N. , 2005).

La inestabilidad del suelo marino se da en pendientes de poca inclinación; las avalanchas se producen en el fondo marino por la dinámica natural, puesto que allí se encuentra la influencia del transporte aluvial, el movimiento y flujo de sedimentos y las mismas corrientes de turbiditas.

Algunos de los factores que influyen en la formación de avalanchas en el fondo marino son el origen del fondo marino y el ambiente en el cual fue depositado el sedimento que se consolidaron con el tiempo (Espinosa & Mateus, 2010).

Otros factores que intervienen son la profundidad del lecho marino, el viento y el oleaje; por otra parte las corrientes marinas, la inestabilidad del suelo, el flujo de sedimentos, la geomorfología marina, la resistencia del suelo y la sismicidad también son factores que influyen en las avalanchas (Iverson, 1997).

La resistencia y el material del cual está compuesto el lecho marino es fundamental para definir su estabilidad dado que para suelos granulares finos de baja plasticidad es fácil que se dé el deslizamiento, flujo o avalancha de sedimentos.

La figura 42 representa depósitos de suelos finos y granulares y materiales de origen pelágico que a causa de mareas, tormentas, turbidez o corrientes litorales pueden activar movimientos cuando la velocidad del agua iguala o rebasa la velocidad de arrastre de las partículas.

**FIGURA 42: Migración de suelos.**





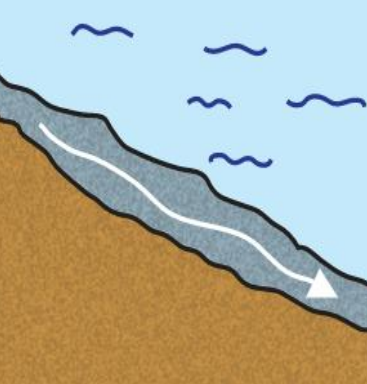
Fuente: (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010).

### 3.3.6 Otros

El fondo del mar está en continuo cambio y son muchas las clasificaciones que se han dado a los movimientos del fondo del mar, dentro de los principales se encuentran 4 tipos de movimientos, cada uno con distintas características de granularidad y eventos de falla como se ilustra en la tabla 2.

**TABLA 2: TIPO DE MOVIMIENTO DEL SUELO MARINO**

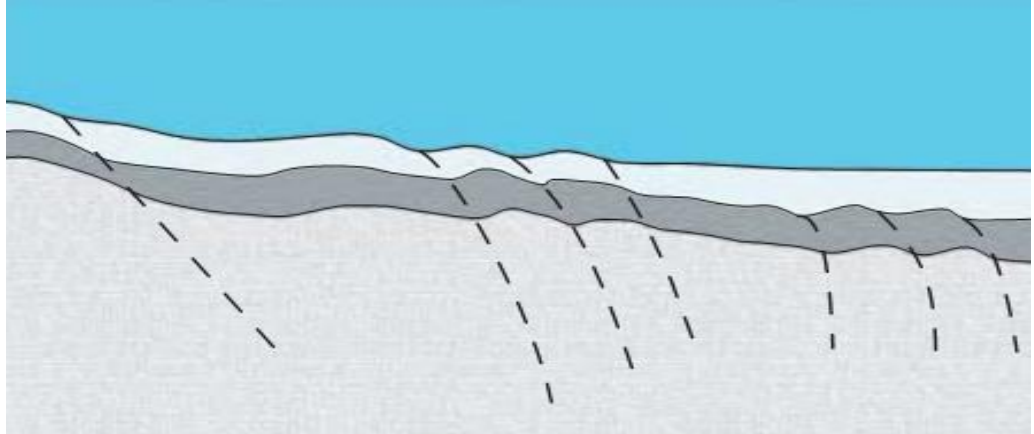
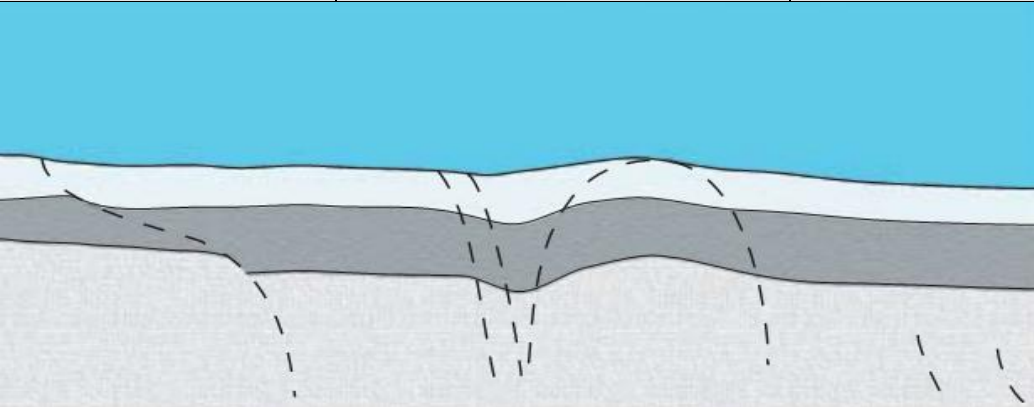
	<p><b>Colapso del Suelo Marino, Sin Transporte:</b> suelos granulares con consistencia blanda o en estado suelto bajo suelos más densos.</p> <p>Las causas de la falla pueden ser sismos, explosiones o expulsiones de fluido o la producción de gas metano. El colapso del suelo marino se ha presentado en pendientes de taludes que están entre <math>0,1^{\circ}</math> y <math>0,25^{\circ}</math>.</p>
--	--

<p>Alta movilidad del sistema en el fondo marino</p> 	<p><b>Migración de Suelos:</b> El suelo presente en este tipo de evento presenta depósitos finos y granulares de sedimento. El material es de origen pelágico. El mecanismo de falla que puede presentarse es que la velocidad del agua iguale o rebose la velocidad de arrastre de las partículas. Las causas probables de falla pueden ser corrientes fuertes debido a mareas, tormentas, turbidez en el agua y corrientes litorales<sup>32</sup>.</p>
 <p>Superficie de falla cóncava</p>	<p><b>Deslizamiento Rotacional de Bloques de Sedimentos, talud abajo:</b> Los depósitos son finos de consistencia blanda que normalmente se encuentran consolidados. Puede haber un aumento del momento o torque actuante sobre el talud. Un aumento rápido del peso sobre la parte alta del talud, el cual es típico en depósitos deltaicos, genera un deslizamiento de este tipo<sup>32</sup>.</p>
	<p><b>Traslación de Sedimentos:</b> Los depósitos son finos de consistencia blanda, que no se encuentran consolidados. Se puede presentar un alto contenido de gas en los poros de los sedimentos y una baja resistencia al esfuerzo cortante debido a su consistencia.</p> <p>El suelo puede presentar baja capacidad de carga y puede haber un aumento en la presión de poro asociado a la existencia de gases. La causa puede ser fluidificación debido a la alteración del equilibrio del sistema suelo-agua-gas, por sobrecarga<sup>32</sup>.</p>

Fuente: (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010)

La forma de la deformación depende del mecanismo de activación, la morfología asociada y el tipo de fallamiento dado en el suelo o subsuelo marino superficial como se muestra en la tabla 3. Estas formas pueden ser lineales, convexa superficial, convexa bajo la superficie, cóncavo-convexo, complejas y profundas.

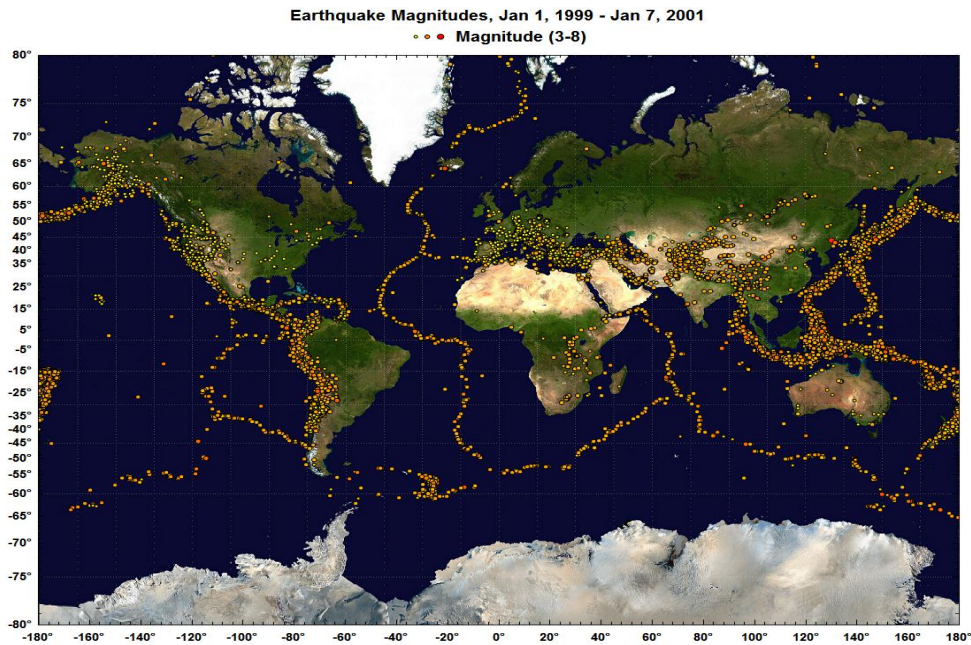
**TABLA 3: Fallamiento y morfología de las deformaciones del subsuelo marino superficial.**

TIPO	Lineal	Convexo superficial	Convexo bajo la superficie
GRÁFICA	 <p>Este diagrama muestra tres tipos de fallamientos: lineal (una sola línea de falla), convexo superficial (falla que se curva hacia arriba cerca de la superficie) y convexo bajo la superficie (falla que se curva hacia abajo cerca de la superficie). Las capas de rocas están representadas en tonos de gris y azul, y las líneas de falla están indicadas con líneas discontinuas.</p>		
TIPO	Cóncavo-convexo	Complejo	Profundo
GRÁFICA	 <p>Este diagrama muestra tres tipos de fallamientos: cóncavo-convexo (falla que se curva hacia abajo cerca de la superficie), complejo (falla con múltiples segmentos y geometrías) y profundo (falla que se curva hacia abajo a gran profundidad). Las capas de rocas están representadas en tonos de gris y azul, y las líneas de falla están indicadas con líneas discontinuas.</p>		

Fuente: (Leyte, Díaz Barriga Arceo, Garibay Febles, & Palacios González, 2010).

En la figura 43 se pueden observar los límites de las placas tectónicas y los terremotos más importantes en los últimos años; En la costa Caribe Colombiana se observan varios terremotos como consecuencia de la convergencia y divergencia de la placa del Caribe, La costa pacifica colombiana también esta influenciada fuertemente por la ocurrencia de terremotos.

**FIGURA 43: Mapa mundial donde se indica la cantidad de terremotos ocurridos en los últimos años.**



Fuente: (Dplot, 2012)

### 3.4 RIESGOS SOMEROS (SHALLOW HAZARDS)

Hacen referencia a los riesgos que se encuentran a profundidades de hasta 2500 ft a partir del lecho marino, rango en el que se pueden encontrar fallas, sedimentos sobrecargados de gas o agua y zonas sobre presionadas (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

También es de considerar otros riesgos someros como los canales enterrados y domos salinos que se pueden presentar a profundidades someras sin importar que tan grande sea la columna de agua sobre el lecho marino (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

Entiéndase riesgo somero (Shallow Hazards) como riesgos ubicados por debajo del nivel del suelo marino, que se pueden presentar tanto en pequeñas columnas de agua en el caso de campos ubicados cerca a los márgenes continentales donde son más comunes dichos riesgos someros, como para aguas profundas; en la figura 44 se muestran los riesgos más comunes y mientras que en la 45 se muestran los riesgos someros en aguas profundas; es decir la profundidad para Shallow Hazards se cuenta del suelo marino hacia abajo sin importar que tanta sea la profundidad le mar, aunque es de aclarar que a mayores columnas de agua la dinámica marina cambia y se pueden presentar ciertas diferencias con respecto a los riesgos que se presentan cerca a las costas (Masarnau & Colotto, 2002).

La clasificación de algunos modelos de plataforma de acuerdo a la profundidad de operación y la fijación al suelo marino se puede observar en la figura 39 donde se muestran también algunas de las extensiones y anclajes en el océano marino (Masarnau & Colotto, 2002).

**FIGURA 44: Modelos de plataformas a distintas profundidades.**



Fuente: (Reed, 2004, pág. 10).

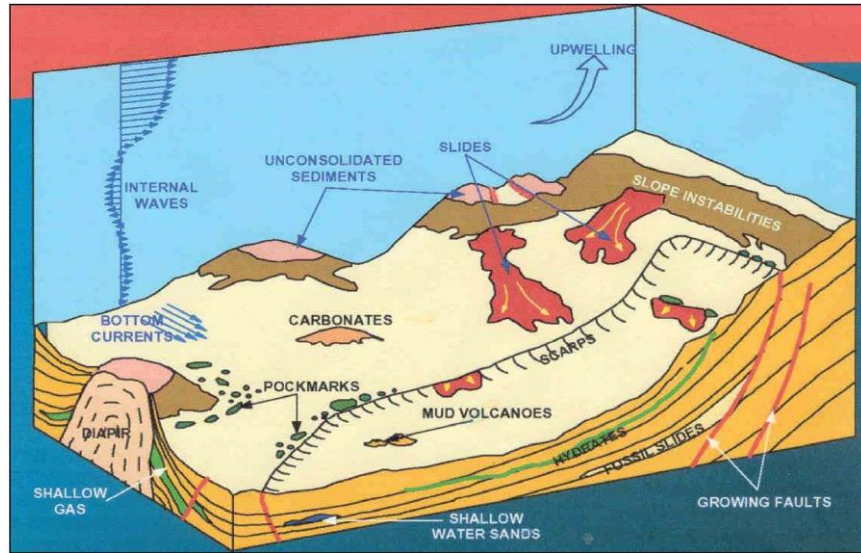
**FIGURA 45: Anclaje de plataformas al fondo marino.**



Fuente: (Randolph, Gaudin, Gourvenec, White, Boylan, & Cassidy, 2011)

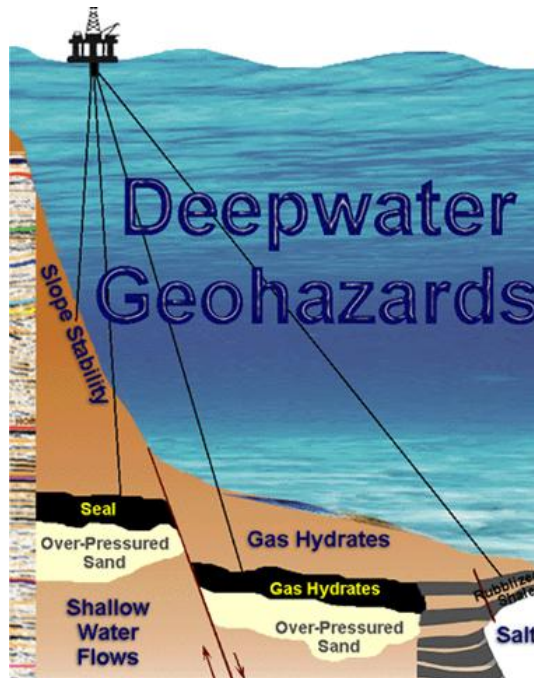
La mayoría de expertos en Shallow Hazards hablan que los riesgos someros están a profundidades de alrededor de 2000 ft aunque pueden considerarse profundidades someras hasta profundidades de 2500 ft (0 ft -2500 ft). Sin embargo, cabe resaltar que a profundidades menores a 1000 ft es donde se presenta la mayoría de riesgos someros y es la consideración que se asignaron cuando se empezó a hablar de riesgos someros en las operaciones de perforación y producción petrolera. (Ver Figuras 46 y 47)

**FIGURA 46: Principales riesgos someros**



Fuente: (Wardlaw & Salisbury, 2010, pág. 19)

**FIGURA 47: Riesgos someros en Aguas Profundas.**

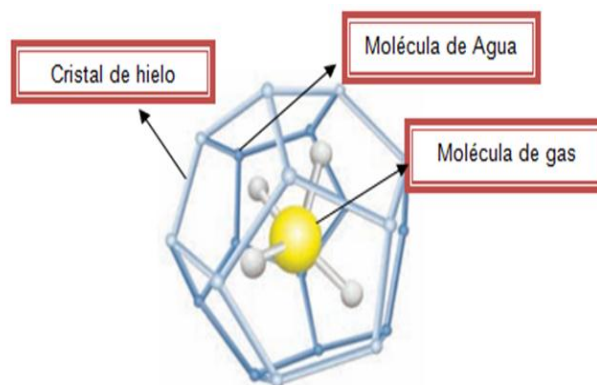


Fuente: (NGI-OffshoreGeohazards, 2005)

### 3.4.1 Hidratos de Gas

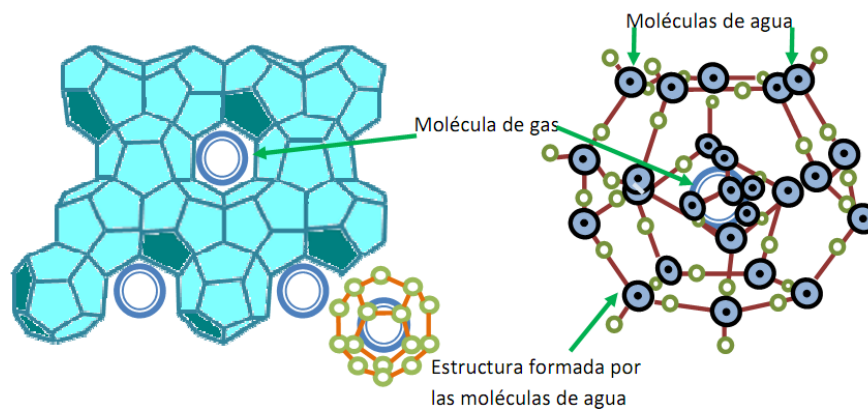
El hidrato de gas es un sólido cristalino, similar en apariencia al hielo, pero constituido por moléculas de gas rodeadas por una malla de moléculas de agua; No debe confundirse con hielo que contiene burbujas de gas comprimido. En los hidratos de gas es un clatrato donde las moléculas de gas generalmente tienen un tamaño de molécula menor a 9 Å están cubiertas por una red de moléculas de agua como se representa en la figuras 48 y 49. (Geresi, Champan, MCGee, & Woolsey), (Sloan & Koh, 2008, pág. 63) y (Sultan N. , 2007).

**FIGURA 48: Modelo de una Molécula de Metano dentro de la Molécula de Agua**



Fuente: Modificada de (NELT, 2011, pág. 8).

**FIGURA 49: Estructura cristalina de los hidratos de gas**



Fuente: (Gil Sánchez & Rojas Parra, 2008)

Las condiciones de formación de los hidratos de gas son a altas presiones y bajas temperatura por esta razón se encuentra principalmente en exploraciones costa fuera y en el ártico donde estas condiciones que son las condiciones más favorables para formarse y mantenerse estable.

Dentro de los hidratos de gas se puede mencionar 4 aspectos principales:

- En cuanto a reservas como gran fuente de energía en forma de Hidrocarburos no convencionales.
- Problema operacional por formación en tuberías durante el transporte de fluidos que contengan gas y agua.
- En el impacto global que causa la liberación de metano generado de la disociación del hidrato en el cambio climático y el efecto invernadero.
- Riesgo asociado a las operaciones de perforación offshore cuando se debe atravesar una zona de estabilidad de hidratos que generan problemas operacionales.

Los problemas de hidratos asociados a la perforación se pueden dividir en dos secciones en los encontrados en permafrost (Depósitos de hidratos de gas en el ártico) y los encontrados en costa fuera.

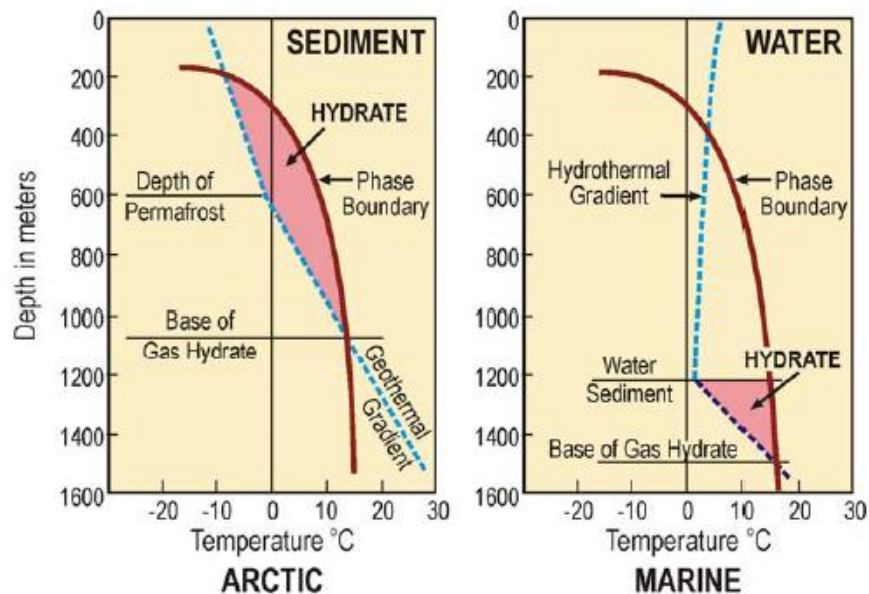
La zona de estabilidad de hidratos se encuentra a profundidades menores (entre 200 y 1200 metros aproximadamente a partir del nivel de la superficie terrestre) en las zonas de Permafrost mientras que en offshore se encuentran a en columnas de agua mayores a 1000 metros y se pueden encontrar desde pocos metros hasta 600 metros por debajo del lecho marino (Sultan N. , 2007); en la figura 50 se muestra un ejemplo de los hidratos encontrados en Alaska.

Los hidratos de gas normalmente se encuentran a temperaturas entre  $-15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$ ; Sin embargo, de acuerdo a la composición del hidrato y de las condiciones

de formación se puede construir un diagrama de presión contra temperatura donde se determina la línea de estabilidad de hidratos (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011).

**FIGURA 50: Diagramas de fase para hidratos de metano en Permafrost y Ambientes**

**Marinos**



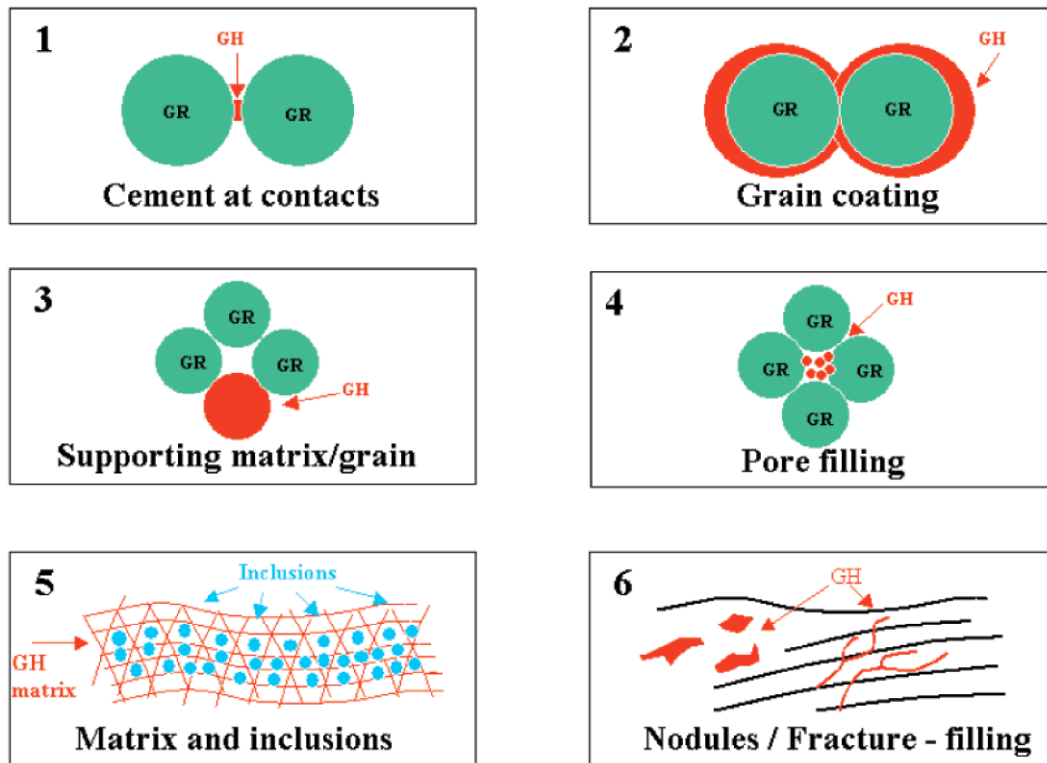
Fuente: (Kennett, 2002, pág. 2).

Para determinar e identificar los problemas que representan los hidratos de gas en operaciones de perforación se hace necesario conocer su comportamiento y su distribución en la formación de forma micro, es decir como interactúa con los granos de roca que está en contacto; por medio de un estudio de modelos micro-estructurales de mantos de hidratos de gas se encontraron 6 modelos que muestran como los espacios vacíos de los poros son ocupados por hidratos (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004) (ver Figura 51).

En la gráfica 47 muestra la existencia de 4 zonas posibles cuando se encuentra agua y gases (que formen hidratos):

- Zona de gas + Agua líquida
- Zona de gas + hielo
- Zona de hidrato + Gas + Agua
- Zona de hidrato + gas + hielo.

**FIGURA 51: Modelos micro-estructurales de la disposición de hidratos de gas en los poros de la roca.**

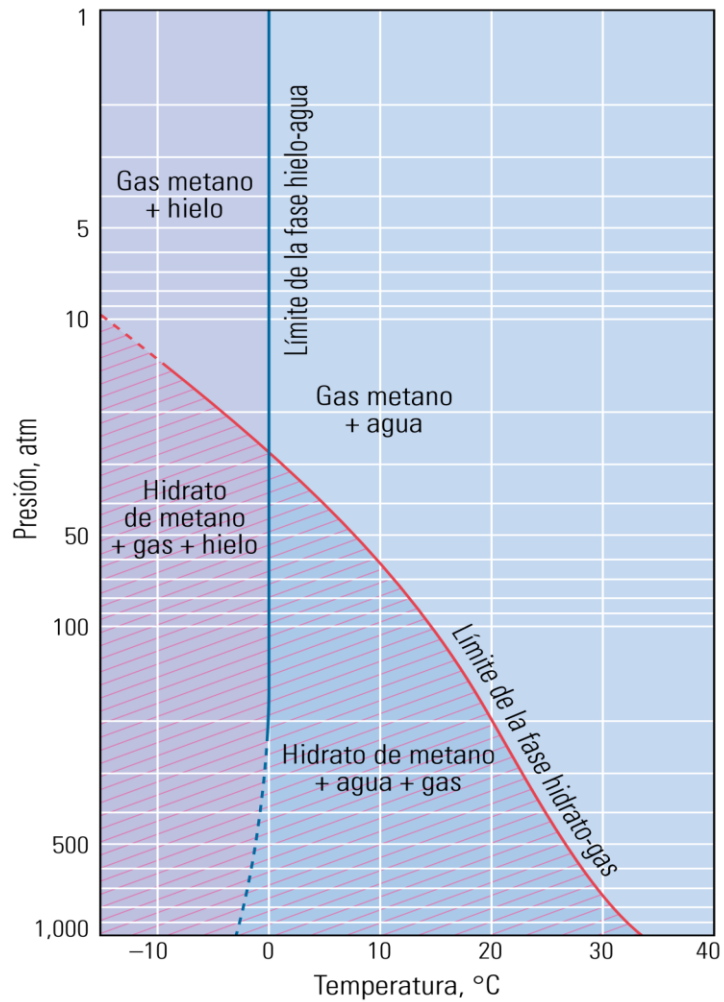


Fuente: (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004)

El tema a tratar en esta investigación es principalmente los problemas asociados a la perforación, puesto que está clasificado como riesgo somero que debido a su disociación, o fusión mientras pasa de sólido a gas puede generar inestabilidad de

pendientes, provoca grandes movimientos submarinos que pueden resultar en Tsunamis, en la figura 52 se muestran las curvas de inestabilidad de algunos gases (Caroll, 2009).

**FIGURA 52: Diagrama de Fases de Estabilidad de los Hidratos de Metano.**



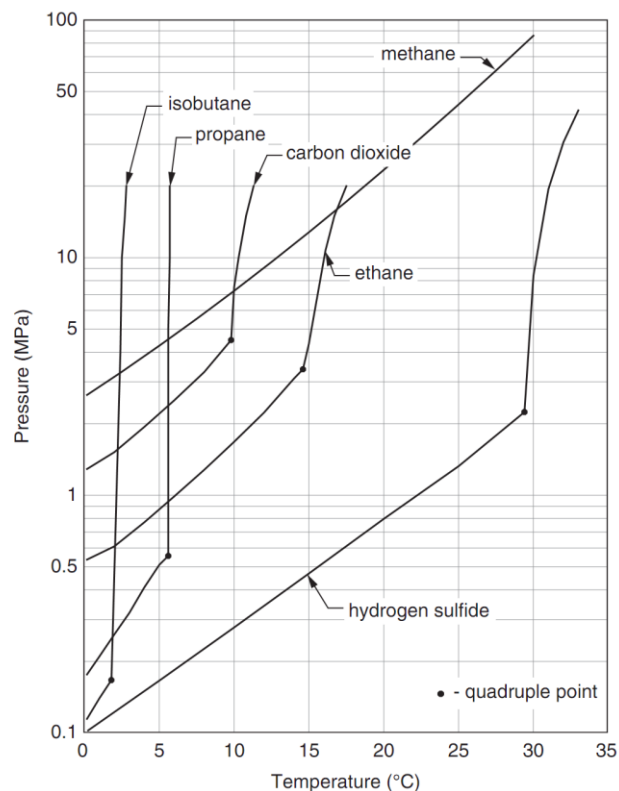
Fuente: (Birchwood, y otros, 2010, pág. 18)

Los hidratos de gas se clasifican en 3 tipos: Tipo I, Tipo II y Tipo H.

Los 3 tipos de hidratos de gas están constituidos por distintas estructuras, ejemplo todos los tipos de hidratos (Tipo I, Tipo II y Tipo H), están constituidos por la estructura  $5^{12}$  (dodecaedro pentagonal). Esta notación se representa por un numero base en este caso el 5 corresponde a la forma de la celda (celda compuesta por 5 lados o pentágono), y el exponente (12) representa el número de celdas que tiene el poliedro (en este caso es un polígono de 12 celdas o dodecaedro). Es por esta razón que se denomina Dodecaedro Pentagonal.

Así, de la misma forma se encuentran otras estructuras como  $5^{12}6^2$ ,  $5^{12}6^4$ ,  $5^{12}6^8$ ,  $4^35^66^3$ . Sus estructuras geométricas se ilustran en la figura 53.

**FIGURA 53: Líneas de formación de hidratos para varios componentes.**



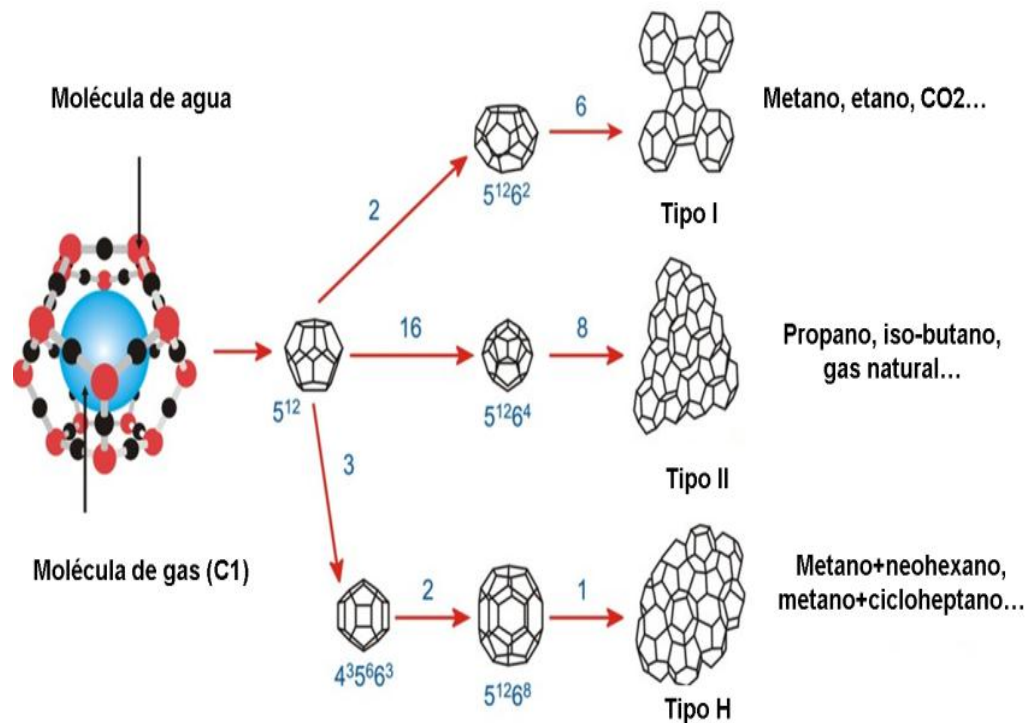
Fuente: (Caroll, 2009, pág. 31).

- **Tipo I:** Los más comunes son hidratos de metano, etano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. En los hidratos de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, las moléculas huésped puede ocupar tanto los espacios pequeños como los grandes. Por otro lado, la molécula de etano ocupa sólo de las jaulas de gran tamaño.

Las estructuras que conforman los hidratos tipo I son 2 moléculas 5<sup>12</sup>, y 6 moléculas 5<sup>12</sup>6<sup>2</sup>, ver figuras 54 y 55.

- **Tipo II:** tiene una estructura más compleja que la estructura de los hidratos Tipo I. Estos se forman de nitrógeno, gas natural, propano e isobutano. Las estructuras que hacen parte de los hidratos tipo II son 16 moléculas 5<sup>12</sup>, y 8 moléculas 5<sup>12</sup>6<sup>4</sup>, ver figura 54 y 55.

**FIGURA 54: Tipos y estructura de los hidratos de gas**



Fuente: Modificado de (Caroll, 2009), Y (Sloan Jr , 2003).

- **Tipo H:** se forman de metano más otro gas como metil-butano, metil-pentano, metil-ciclopentano, ciclo-pentano, ciclo-hexano, ciclo-heptano entre otros.

Es poco común encontrarlos en la naturaleza, puesto que su formación necesita de moléculas pequeñas como el metano y de moléculas más grandes como loes butano, pentano, entre otras anteriormente mencionadas.

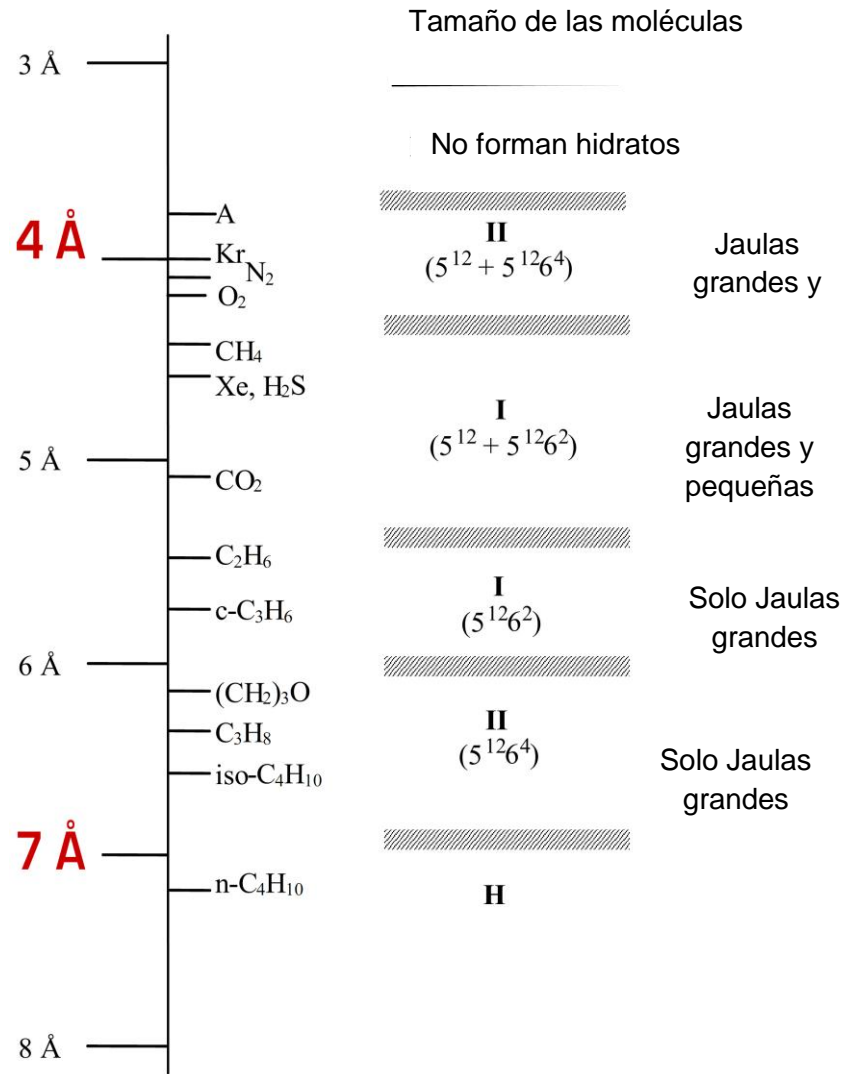
En los hidratos Tipo H se tienen 3 “sub-estructuras” que componen la estructura general tipo H, y estas están dispuestas de distintos tamaños, de tal forma que se puedan obtener subestructuras (jaulas o cajas) pequeñas para las moléculas pequeñas y subestructuras grandes para las moléculas grandes (Caroll, 2009).

Los hidratos tipo H son más complejos que las dos anteriores en su estructura, pues está compuesto por 3 tipos de moléculas con distintas estructuras, en general este tipo de hidratos está conformado por: 3 moléculas de estructura  $5^{12}$ , 2 moléculas de estructura  $4^35^66^3$  y 1 molécula de estructura  $5^{12}6^8$ . Ver figura 54 y 55.

Es importante conocer las propiedades de los hidratos de gas para evitar accidentes en las operaciones de perforación puesto que la fusión de los hidratos de gas mal tratados desencadena problemas de inestabilidad de sedimentos, colapso de tuberías, inestabilidad de los equipos en el fondo marino e incluso salidas incontroladas de gas<sup>49</sup>.

La peligrosidad que representa el hidrato de gas en los Blowouts es su gran capacidad de expansión, pues  $1 \text{ m}^3$  de hidrato de metano estabilizado en su paso a condiciones normales de presión y temperatura, puede expandirse aproximadamente a  $165 \text{ m}^3$  de gas metano y  $0,8 \text{ m}^3$  de agua.

**FIGURA 55: Diagrama de Fases de Estabilidad de los Hidratos de Metano.**



Fuente: Modificada de (Sloan Jr , 2003, pág. 355) Y (Sloan & Koh, 2008, pág. 86)

Cualquier sacudida sobre los fondos submarinos, como por ejemplo un terremoto, un descenso brusco del nivel del mar como consecuencia de un fuerte tormenta, puede provocar la liberación de grandes cantidades de gases contenido en el fondo marino en forma de hidratos. Esta masiva liberación de gas y la consecuente bajada de densidad del agua del mar y del aire, similar a la apertura de una botella de gaseosa, puede provocar una repentina pérdida en la capacidad

de flotabilidad de los buques, así como en el aire, por pérdida de sustentación en los aviones. Esto podría explicar el misterio del famoso "Triangulo de las Bermudas", localizado en el Mar de los Sargazos, donde la producción biogenica de gas por descomposición de algas en el fondo marino es muy alta, y por tanto la cantidad de gas en el subsuelo, puede dar lugar a la sobresaturación y condiciones idóneas para la generación de gases hidratados (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011).

La relación causa-efecto entre los grandes deslizamientos submarinos a nivel mundial y los gases hidratados, es otro de los retos científicos abiertos con el descubrimiento de los gases hidratados. Se ha comprobado que las zonas de inicio de la mayoría de los grandes deslizamientos submarinos coinciden donde la zona de estabilidad de los hidratos (ZEH) intersección el fondo marino. Estos provocan deslizamientos de dimensiones mayores que los generados en tierra.

La desestabilización de los fondos marinos causados por la fusión de los gases hidratados pueden ser también responsable de los grandes "Tsunamis" que se generan en los océanos y que llegan a tener efectos devastadoras en las costas.

Los lugares donde se ha identificado mayores volúmenes de hidratos de gas es en la costa este de los estados unidos, el noreste del océano pacifico y las costas de Japón, aunque es de resaltar que también se encuentran grandes cantidades en Alaska y Rusia en forma de permafrost. La figura 56 muestra que la distribución de hidratos de gas esta alrededor de los márgenes continentales (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011).

**FIGURA 56: Distribución de los Hidratos de gas a nivel mundial.**



Fuente: (Tomer, 2001)

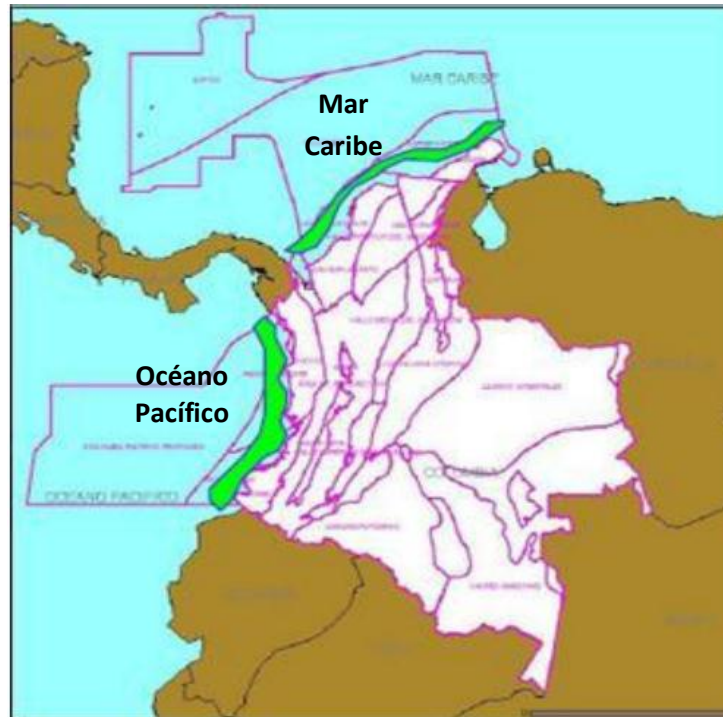
En Colombia los hidratos de gas se encuentran en la costa Caribe colombiana en su mayoría y al oeste del país en el Océano Pacífico.

Según el estudio realizado por Finley and Krason (1986) en el mar Caribe se tiene una extensión de 30000 km<sup>2</sup> en hidratos de gas que se encuentran a profundidades someras entre 60 y 200 metros (profundidad medida desde el fondo marino) datos determinados mediante BSR.

Por otro lado la Agencia Nacional de hidrocarburos y con base en ese y otros estudios elaboro el mapa con los lugares donde se han encontrado hidratos hasta el momento. Ver figura 57

En general los problemas principales que se pueden generar por la presencia de hidratos de gas en operaciones de perforación offshore son las siguientes (Guzmán, 2011):

**FIGURA 57: Distribución de los Hidratos de gas en Colombia**



Fuente: (Guzmán, 2011).

- Disminución de la fuerza de cizallamiento y como consecuencia la inestabilidad de sedimentos.
- Activa movimientos submarinos que pueden ser el principio de la formación de Tsunamis y pérdida de integridad y estabilidad de los equipos en fondo oceánico.
- Corrosión y disolución de materiales por el contenido de CO<sub>2</sub> o H<sub>2</sub>S que pueden estar en forma de hidratos.
- Problemas ambientales asociados a la liberación del hidrato de gas durante la disociación.
- Disociación por aumento en temperatura o disminución de presión en las zonas de estabilidad de hidratos.
- Pérdida de flotabilidad en los buques cuando se libera gran cantidad de metano por disociación de hidratos que provoca una disminución del agua.

- Blowouts por despresurización o calentamiento de mantos de hidratos sobre presionados.
- Incendios en caso de pérdida de control del pozo en salidas incontroladas de gas.

### **3.4.2 Shallow Water Flow SWF (Flujos de Agua Somera)**

Los SWF son estratos de arenas poco consolidadas saturadas de agua que se encuentran sobrepresionadas (Sultan N. , 2007).

Los SWF se dan generalmente entre profundidades de 950 a 2000 ft de profundidad a partir del lecho marino. Las profundidades de la columna marina pueden ser significativas, un ejemplo es el Golfo de México donde se han presentado SWF a columnas de agua entre 1000 y 2830 ft (ver figura 58).

Debido a las altas tasas de deposición en los deltas, y por el sello generado por las arcillas de sobrecarga, el agua que se encuentra en la formación y que busca canales por donde fluir queda atrapada, generando presiones de poro anormales.

Normalmente, las porosidades de las arenas de SWF son mayores al 45% (debido a la falta de consolidación). Por debajo de los 1000 m de profundidad, las rocas se consideran sedimentos litificados, debido a que los sedimentos son depositados lentamente convirtiéndose en rocas estables, casi siempre con buena compactación y cementación (dureza) que el sedimento de partida. El efecto de la presión de sobrecarga y de la circulación de fluidos, permite mantener el comportamiento normal del gradiente de presión a estas profundidades. Situación contraria se presenta en áreas por encima de esta profundidad debido a las altas tasas de sedimentación y son consideradas de alto potencial de riesgo para el fenómeno de SWF (Sultan N. , 2007).

**FIGURA 58: Esquema general de los Shallow Water Flow.**



Fuente: (Subhashis & DUtta, 2002)

Los estratos sobre-presionados a estas profundidades pueden provocar un flujo de agua por entre los canales y fallas presentes en la formación. Además, también se pueden crear fallas cuando la presión necesaria para fracturar la roca es muy cercana a la presión de poro de la arena SWF.

Cuando la broca de perforación penetra una zona sobre-presionada a una profundidad somera, antes de la cementación, gran cantidad de agua, que puede arrastrar sedimentos, fluye hacia el pozo, generando un gran riesgo cuando no se ha iniciado la instalación de las preventoras (BOP)

Por otra parte, la brecha estrecha entre la presión de formación y la presión de fractura hacen difícil mantener la estabilidad y por lo tanto los flujos tanto hacia el

pozo como hacia la formación, cuando no se controla el peso del lodo de perforación, se hacen comunes en la perforación de estas zonas.

Estos problemas generan retrasos en la perforación y en algunos casos perdidas de pozo, este fenómeno se encuentra en muchas regiones de aguas profundas en el mundo como por ejemplo en el Golfo de México, Oeste de África, Trinidad (Sultan N. , 2007).

#### **3.4.2.1 Generalidades de los SWF**

- Generalmente el flujo de agua aumenta con el tiempo.
- Las Sobrepresiones son causadas por la rápida sedimentación.
- Los sedimentos se acumulan en la cara del pozo.
- Los costos de perforación en lugares con problemas de SWF son muy representativos (Subhashis & DUTta, 2002).

Según un estudio presentado por SUBHASHIS MALLICK y NADER C. DUTTA el costo aproximado asociado a SWF en El Golfo de México es mayor a los 200 millones de dólares.

Las propiedades elásticas de la roca y otras propiedades mecánicas importantes de los sedimentos SWF son medidas in-Situ, y son muy limitadas debido a que las capas son asociadas con bajas velocidades sísmicas. Medidas de tales bajas velocidades son difíciles de analizar en un ambiente donde el Casing ha sido corrido y cementado, y la corrida de registros en hueco abierto se hace riesgosa bajo condiciones SWF.

Es importante tener en cuenta las propiedades elásticas de las arenas regulares y de los shales para determinar las propiedades de las arenas de SWF.

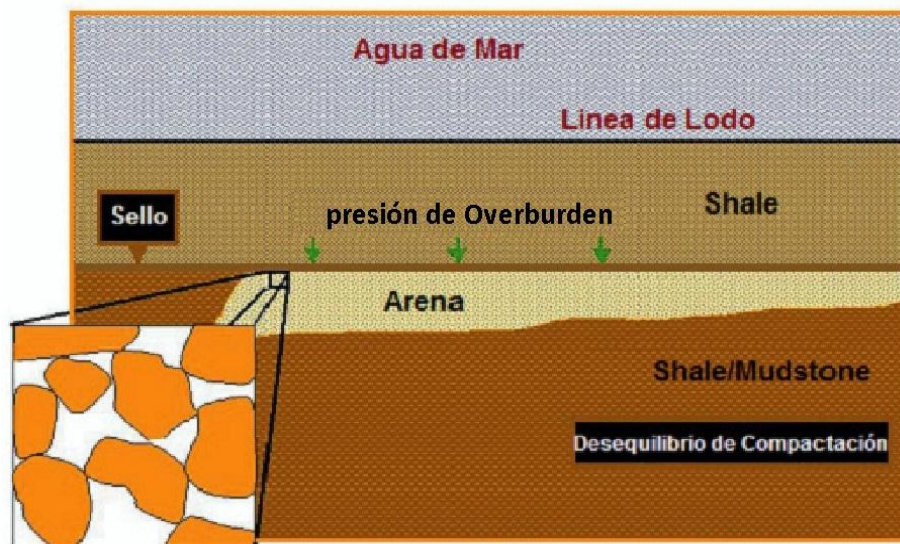
Estudios realizados con anterioridad examinaron las propiedades de la roca basados en mediciones de laboratorio, donde los sedimentos se encontraron en una zona de transición entre materiales suspendidos en el fluido y la porosidad crítica alrededor de la roca.

Los SWF pueden generar problemas tales como flujo incontrolado en el fondo marino, problemas de cementación, pérdida de integridad del pozo, colapso de tubería de revestimiento, salida de fluidos fuera del casing y finalmente puede ser posible la pérdida del pozo (Subhashis & DUtta, 2002).

#### 3.4.2.2 Mecanismos de formación de SWF en arenas

Son arenas rodeadas de arcillas de baja permeabilidad que evitan que los fluidos presentes en la arena migren de esta; la rápida tasa de sedimentación a esta profundidad genera altas presiones en la arena como lo indica la figura 59.

**FIGURA 59: Mecanismos de Formación de SWF.**



Fuente: (Subhashis & DUtta, 2002)

Los SWF son una amenaza para la perforación offshore, por lo tanto es fundamental identificarlos para reducir riesgo en las operaciones. Cuando la broca de perforación penetra una zona sobre-presionada a una profundidad somera, antes de la cementación, gran cantidad de agua, que puede arrastrar sedimentos, fluye hacia el pozo, generando un gran riesgo cuando no se ha iniciado la instalación de las preventoras (BOP) (Espinosa & Mateus, 2010).

#### **3.4.2.3 Principales problemas asociados a SWF**

Los problemas de SWF se dan principalmente en perforación de aguas profundas, donde la rata sedimentación es más alta y se tienen mayores presiones, esto genera problemas como Blowouts y fallas en la tubería de producción además de afectar en una alta medida la producción por la inestabilidad del pozo.

Los principales problemas que se presentan en la perforación offshore debido a los SWF son los siguientes (Ver figura 60):

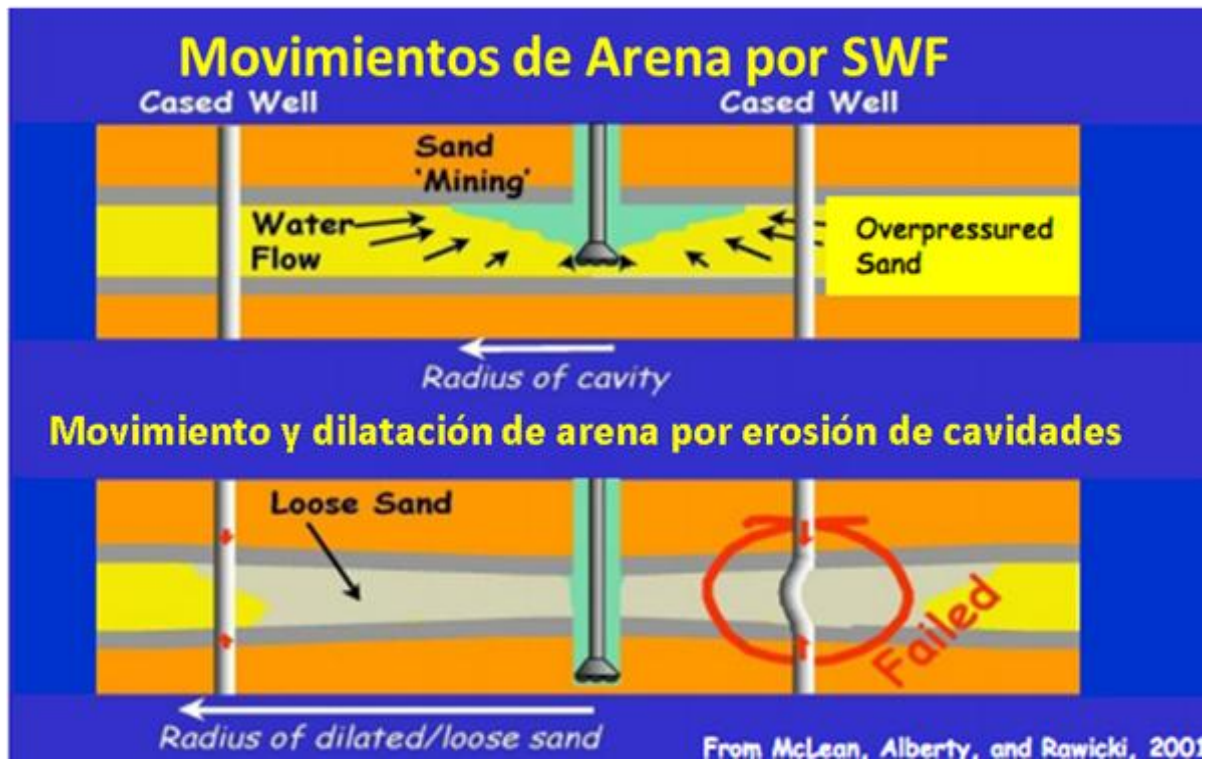
- Colapso de tubería.
- Flujo de arena-agua por la tubería.
- Blowouts.
- Derrumbes del pozo.
- Flujo cruzado.
- Canalización.
- Perdida del pozo.

#### **3.4.2.4 Dificultades presentes en el flujo de aguas someras**

Existe un sistema de clasificación cualitativa de observaciones emitidas por las ROV mientras se hacen las conexiones, las cuales representan zonas con flujos de aguas someras (SWF), estas imágenes facilitaran en el futuro a los operadores


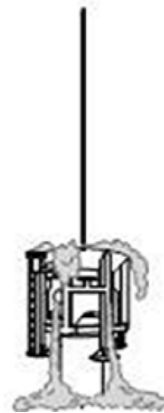



tomar las precauciones necesarias para nuevos trabajos en zonas potencialmente peligrosas; ya que los SWF podrían ser una amenaza directa para la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente (Sultan N. , 2007).ver tabla 4.

**FIGURA 60: Problemas de perforación offshore asociados a SWF por movimientos y dilatación de arenas.**



Fuente: ( Thomson, 2010).

**TABLA 4: Tipos de dificultades presentes en el flujo de aguas someras**

TIPO	NO FLUJO	FLUJO BAJO	FLUJO MODERADO	FLUJO FUERTE	FLUJO SEVERO
REPRESENTACIÓN GRÁFICA.					
DESCRIPCIÓN	El lodo y los cortes pueden caer de la parte inferior de la base guía pero no sobre el tope	El lodo y los cortes pueden ser derramados por encima del tope de la base guía y caer en el mar en baja cantidad.	Se forma una nube de flujo la cual sale por la parte superior (a menos de 10 ft) y fuera del tope de la base guía en una cantidad moderada	Se forma una onda la cual sube con un alto flujo y sale por la parte superior (a 10 ft) del tope de la base guía y por los puertos de los lados.	Expulsión vertical fuerte (hasta 100 ft) por encima de la base guía.

Fuente: modificada de (Espinosa & Mateus, 2010)

Es de suma importancia determinar la existencia de riesgos someros relacionados con los flujos de agua somera, pues con la identificación temprana se pueden evitar accidentes que comprometan la vida de las personas y del hábitat marino además de los recursos de la empresa; en las figuras 61 y 62 se muestra la magnitud de accidentes generados por SWF.

**FIGURA 61: Blowout generado por SWF Turmekistan.**



Fuente: (EnergyindustryPhotos.com, 2012)

**FIGURA 62: Blowouts generado por SWF Texas EU.**

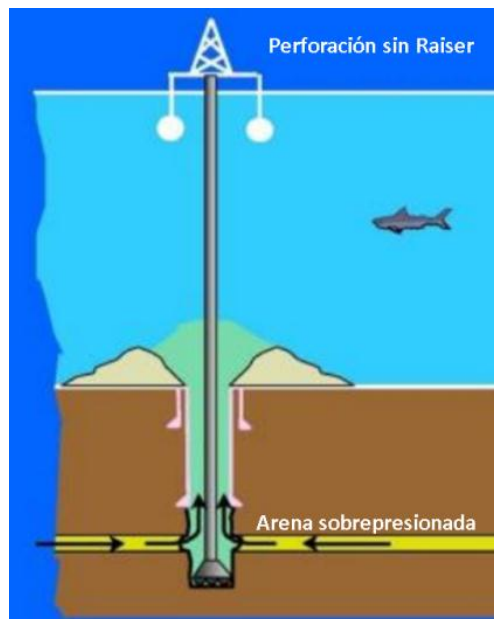


Fuente: (EnergyindustryPhotos.com, 2012)

### 3.4.3 Shallow Gas Flow SWF (Flujos de Gas Somero)

Cuando se habla de flujos de gas someros se suele asociar directamente con gas Blowouts, porque la mayoría de accidentes que se han presentado en la industria de los hidrocarburos en operaciones costa fuera han sido provocados por estratos de gas someros y sobrepresionados (Baird, 1976), (Holmes, y otros, 1997)(ver figura 63).

**FIGURA 63: Esquema general de los Shallow Gas Flow.**



Fuente: modificada de ( Thomson, 2010)

Por otro lado muchos campos han sido abandonados y mucho dinero se ha perdido por problemas de Shallow Gas Flow, Las arenas saturadas de gas se encuentran a profundidades someras de alrededor de 3000 ft por debajo del nivel del fondo marino (Baird, 1976), (Holmes, y otros, 1997).

Las compañías hoy día en su mayoría hacen estudios de riesgos someros asociados a Shallow Gas, Por otro lado en la mayoría de los países ya es una

exigencia legal, para conservar la vida y el ecosistema marino que allí se encuentra (Flores Jr, Garner-Boots, & Scarborough-Boots, 2007).

Los Shallow Gas Blowouts son, quizás, el más exigente de todas las operaciones de control de reventones. Las técnicas de control de pozo para gas somero son más complicadas que las de control de pozo para Blowouts de gas profundo. Pese a la nueva tecnología ha sido fundamental en el desarrollo del método de intervención sísmica vertical que, en determinadas circunstancias, ayuda a prevenir explosiones y salvar vidas (Adams, Kuhlman, & Adams Firefighter, 1991), (Bybee, 2008).

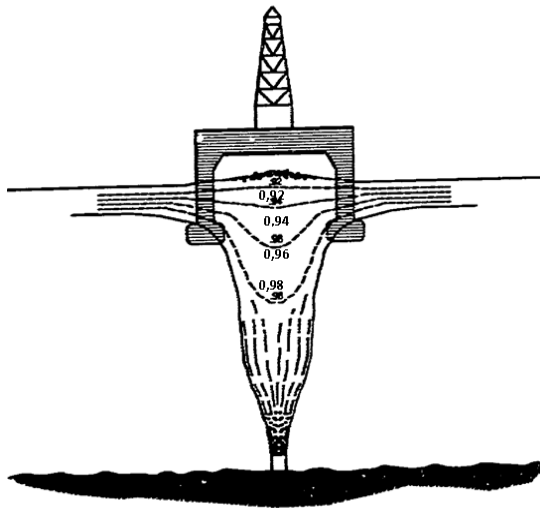
Los SGF están clasificados como los riesgos someros que generan más accidentes manifestándose en forma de Gas Blowouts, que representa fuego en la plataforma o pérdida definitiva de esta (Flores Jr, Garner-Boots, & Scarborough-Boots, 2007), (Adams, Kuhlman, & Adams Firefighter, 1991) y (Bybee, 2008).

El gas debe tratar de sacarlo a superficie marina para evitar el efecto de boyancia o pérdida de flotabilidad la plataforma por hundimiento (Adams, Kuhlman, & Adams Firefighter, 1991)

En las figuras 64, 65 y 66 se muestra que la salida de gas al fondo del mar en perforaciones sin raiser generan una gran inestabilidad y riesgo para la plataforma en superficie, pues además de afectar las instalaciones en fondo marino la gravedad del agua disminuye por la cantidad de gas que se encuentra con ella, lo que implica la pérdida de flotabilidad de la plataforma y aumenta la posibilidad de accidentes y daños humanos, materiales y medioambientales (Sassen, Roberts, Jung, & Lutken, 2006).

Las profundidades en las que se debe tener mayor cuidado son entre 300 y 400 pies, puesto que a esta profundidad se han presentado la mayoría de accidentes (Bybee, 2008).

**FIGURA 64: Variación de la gravedad específica en Blowouts de gas en una plataforma semisumergible.**

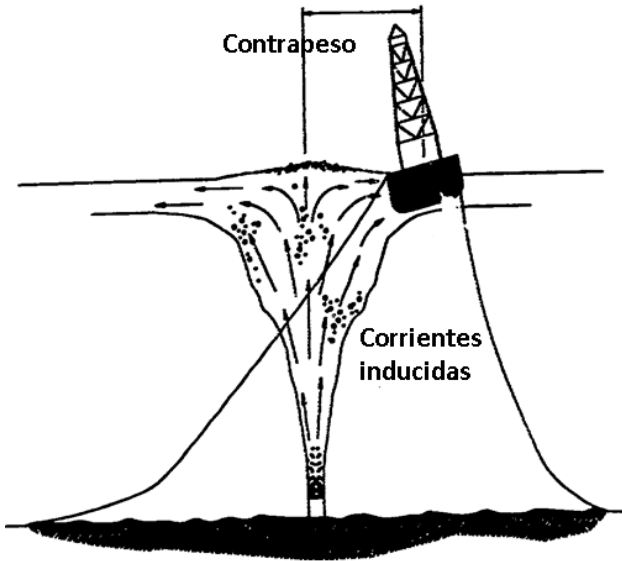


Fuente: (Adams & Kuhlman, 1990)

Al igual que los SWF, los SGF se encuentran en arenas sobrepresionadas y una vez se atraviesan los estratos que la contienen genera el flujo incontrolado (Holmes, y otros, 1997).

En la industria del petróleo en cuanto a operaciones de offshore se refiere, la gran mayoría de accidentes que se han registrado es por pérdida de control de pozo, que pozo es causada por reventones, y éstos a su vez son generados por Shallow Gas Flow o por Shallow Water Flow. Los primeros son de mayor peligrosidad y son los que han hecho incluso prohibir la explotación de hidrocarburos en algunas áreas en la década de los 80 (Holand, 1997).

**FIGURA 65: Desnivel en la plataforma inducido por blowouts a causa se SGF.**



Fuente: (Adams & Kuhlman, 1990)

**FIGURA 66: SGF genera perdida boyancia del agua y hundimiento de plataforma.**



Fuente: (EnergyindustryPhotos.com, 2012)

La magnitud de los accidentes ocasionados por SGF han generado grandes impactos negativos a los ecosistemas marinos, a los recursos humanos y materiales, es importante tener en cuenta que los blowouts relacionados al gas traen consecuencias como hundimiento de la plataforma o incendio de esta, que en el peor de los casos ocurren a la vez (Holand, 1997).

Algunos casos lamentables y con grandes pérdidas humanas y materiales en la industria petrolera fue El accidente Piper Alpha ocurrido en 1988 en el mar del norte donde murieron 167 personas (Holand, 1997), (Patc-cornell, 1993) (ver figura 67).

**FIGURA 67: Accidente de Piper Alfa causado por SGF, Mar del Norte.**



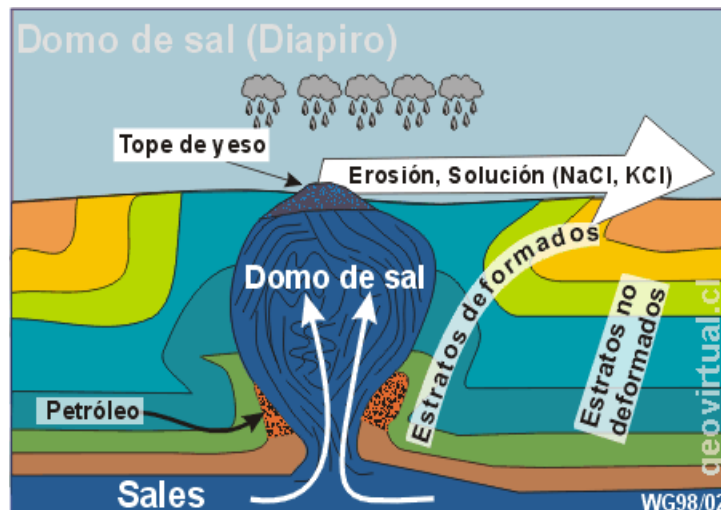
Fuente: ( Dive, 2010)

### 3.4.4 Domos salinos

Un domo de sal es una estructura geológica formada por un fenómeno conocido como diapirismo; proceso en el que se presenta ascensión tectónica de una roca poco densa y plástica a través de rocas subyacentes mucho más densas y recientes en el proceso de deposición (ver figura 68).

La formación de los domos salinos se da luego que existe cierta cantidad de sal que ha sido acumulada con el tiempo gracias a la evaporación del agua permitiendo así la precipitación de las sales y la acumulación de estas, Posteriormente a causa de los movimientos tectónicos propios de la tierra se forman los diapiros o domos salino (Orange, y otros, 2003), ( Aburto Pérez, y otros, 2009) y (Khalaf, Cairo, & Shennawy, 1979).

**FIGURA 68: Estructura geológica donde se encuentra los Domos Salinos.**



Fuente: (Griem & Griem-Klee, 1999-2003)

Por otro lado un domo salino es una roca sedimentaria poco densa que está compuesta por evaporitas, formadas por la cristalización de sales disueltas en el

agua de los lagos y mares costeros. La evaporita está compuesta por tres minerales principalmente: la halita, el yeso y la anhidrita. Estos minerales se presentan en forma estratificada y esta roca es conocida como sal (Khalaf, Cairo, & Shennawy, 1979).

En las operaciones de perforación costa fuera es común encontrarse con domos salinos, pues la formación de estos guarda cierta relación con la formación de los hidrocarburos, incluso la sal puede servir como sello de formaciones que almacenan hidrocarburos.

**FIGURA 69: Estructura geológica donde se encuentra los Domos Salinos.**



Fuente: ( Aburto Pérez, y otros, 2009)

La mayoría de los obstáculos en el tema de la perforación asociado a domos salinos se encuentra en costa afuera, por lo tanto en este informe se trata como un riesgo geológico, aunque no represente un riesgo potencial para la vida o para el medio ambiente si lo representa para la empresa debido a los múltiples

inconvenientes a los que se debe enfrentar cuando se perfora un domo salino (Orange, y otros, 2003), y ( Aburto Pérez, y otros, 2009) (ver figura 69).

En gran parte de los mares donde la salida del agua no es tan fácil, esta se evapora y se acumulan las sales, en otros lugares se debe a otros factores como es el caso de Brasil donde existe gran acumulación; Allí se está innovando y buscando las herramientas tecnológicas para extraer el tesoro bajo la sal(Ver figuras 70).

Las oportunidades de que surjan problemas al momento de perforar, atravesar y salir de los domos salinos son muchas, y provienen esencialmente de la tendencia al movimiento propia de la sal. La capacidad limitada de la industria para generar imágenes de los límites del domo salino puede conducir a cálculos erróneos de la profundidad de la base de la estructura salina y a encuentros inesperados con zonas de presión elevada o reducida dentro y debajo de la sal (Dribus, Jackson, Kapoor, & Smith, 2009).

**FIGURA 70: Distribución de prospectos petroleros en aguas profundas relacionadas con formaciones salinas.**

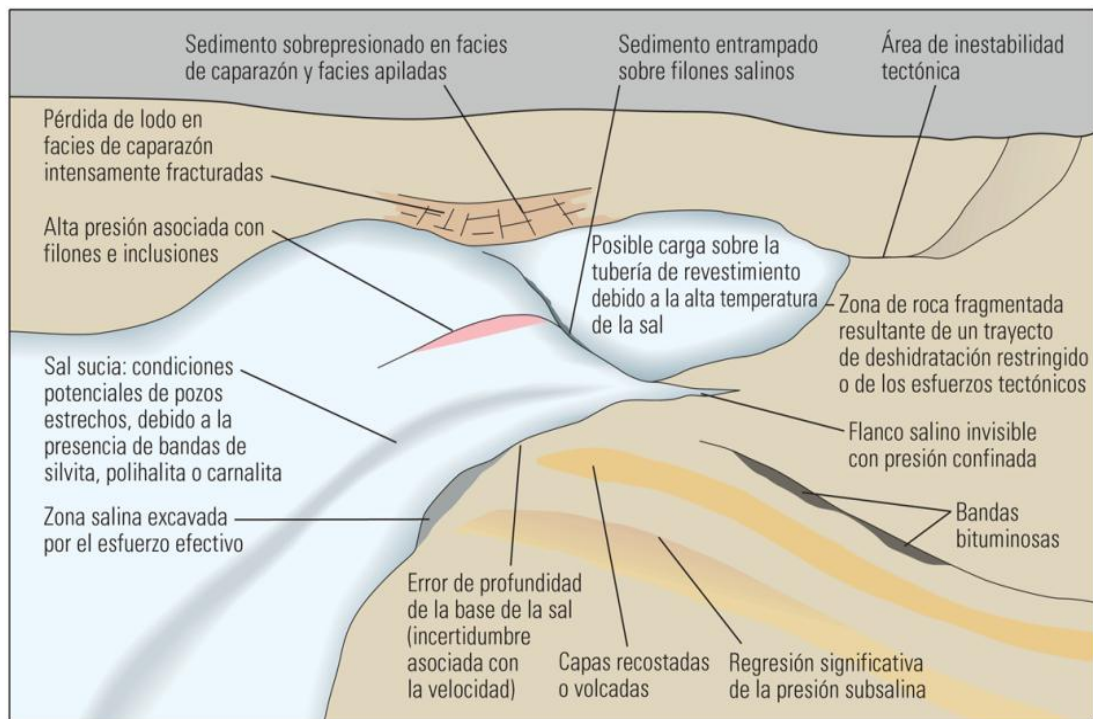


Fuente: ( Aburto Pérez, y otros, 2009)

### 3.4.4.1 Riesgos potenciales de perforación en la sal y sus adyacencias

En la figura 71 se muestran las principales partes dentro de una formación con presencia de domos salinos; Estas estructuras comprenden:

**FIGURA 71: Riesgos asociados a la perforación de domos salinos y sus formaciones adyacentes.**



Fuente: ( Aburto Pérez, y otros, 2009)

- Sedimento sobrepresionado en facies de caparazón y facies apiladas
- Sedimento entrampado sobre filones salinos
- Áreas de inestabilidad tectónica
- Pérdida de lodo en facies de caparazón intensamente fracturadas
- Alta presión asociada con filones e inclusiones

- Posible carga sobre la tubería de revestimiento debido a la alta temperatura de la sal
- Zona de roca fragmentada resultante de un trayecto de deshidratación restringido o de los esfuerzos tectónicos
- Sal sucia: condiciones potenciales de pozos estrechos, debido a la presencia de bandas de silvita, polihalita o carnalita.
- Flanco salino invisible con presión confinada
- Zona salina excavada por el esfuerzo efectivo
- Error de profundidad de la base de la sal (incertidumbre asociada con la velocidad)
- Capas recostadas o volcadas
- Bandas bituminosas
- Regresión significativa de la presión subsalina.

#### **3.4.4.2 Problemas potenciales de perforación en la sal y sus adyacencias.**

Entre los problemas asociados con la selección deficiente del fluido de perforación se encuentran la presencia de tramos de ensanchamiento del pozo y paredes debilitadas como resultado del fenómeno de lixiviación. El bajo peso del lodo puede permitir que el proceso de reptación de la sal interfiera con la sarta de perforación, mientras que un fluido de perforación con propiedades reológicas desfavorables probablemente no pueda transportar los recortes a la superficie, haciendo que la sarta de perforación se obture por encima de la barrena. En la figura 72 se muestran los principales, incluyendo los derrumbes (Orange, y otros, 2003), ( Aburto Pérez, y otros, 2009).

Por otro lado, el empleo de agua de mar genera ahorros significativos en costos de perforación, a la vez que se elimina la necesidad de contar con el preciado espacio del equipo de perforación para almacenar las salmueras espesadas durante la penetración del tope de la sal sin tubo ascendente (riser). Los

geocientíficos del Centro de Excelencia del Laboratorio de Geomecánica TerraTek de Schlumberger, en Salt Lake City, Utah, EUA, investigaron las ventajas potenciales y la factibilidad de utilizar agua de mar para ingresar en el tope de la sal. Con ese fin, utilizaron el de modelado de laboratorio del fenómeno de lixiviación de la sal bajo condiciones de convección forzada.

**FIGURA 72: problemas potenciales asociados a la perforación de domos salinos y sus formaciones adyacentes.**



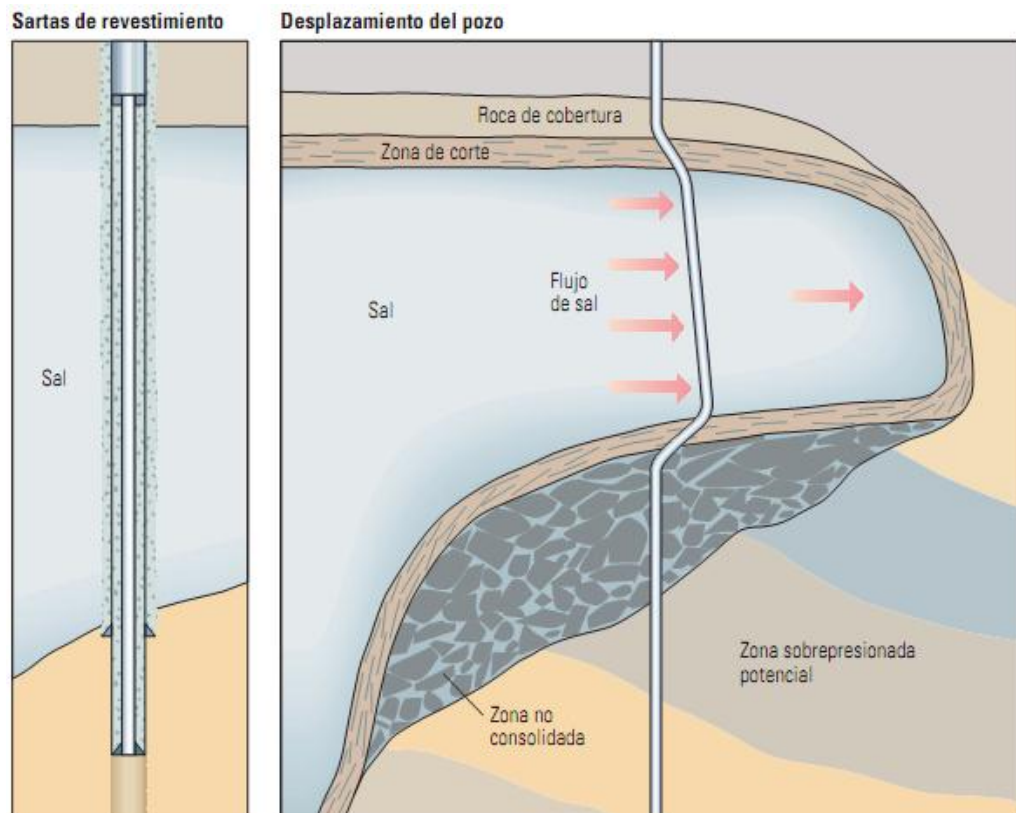
Fuente: ( Aburto Pérez, y otros, 2009)

#### **3.4.4.3 Sarta de Revestimiento y Desplazamiento del pozo.**

Para combatir los efectos de carga no uniforme causados por el proceso de reptación de la sal, se requiere que el cemento retorne al tope de la estructura

salina. En este caso (figura 73 izquierda), se colocó una tubería de revestimiento corta (liner) dentro de una tubería de revestimiento cementada en un esfuerzo para reducir la deformación radial de la tubería. El movimiento de la sal (figura 73 derecha) continuará generando carga sobre la tubería de revestimiento, pudiendo producir la falla de los tubulares con el tiempo; una eventualidad que puede retardarse a través de la implementación de prácticas adecuadas de colocación del cemento y de la utilización de tuberías sobredimensionadas y de alta resistencia (Orange, y otros, 2003), ( Aburto Pérez, y otros, 2009).

**FIGURA 73: Principales problemas asociados al daño de la tubería por desplazamiento del domo salino.**



Fuente: ( Aburto Pérez, y otros, 2009)

### 3.4.5 Anomalías de Sobrepresión

Se considera una presión anormal, a la presión de una formación, que sobrepasa o está por encima del valor de presión que debería tener con relación al gradiente de presión normal (0,465 psi/pie). Generalmente estas sobrepresiones ocurren en yacimientos o reservorios que se encuentran aislados. Aquellos que no tienen continuidad con otros reservorios.

Las altas tasas de deposición que se presentan frente a los deltas de los ríos que desembocan en el mar, y en el borde continental de los glaciares, influyen en la presión de poro de la formación. Cuando existe gran contenido de arcilla, las propiedades de porosidad-permeabilidad evitan el drenaje de los fluidos, y por lo tanto se forman zonas de alta presión (Espinosa & Mateus, 2010).

Algunos mecanismos proporcionan sellos o capas impermeables que aíslan una formación de otra, razón por la que se encuentra en poca diferencia de altura un cambio brusco de presión, lo que impide que esta presión sea equilibrada con una columna de líquido imposibilitando así el equilibrio hidrostático como lo indica la figura 74. En esta gráfica de presión versus profundidad la región azul oscuro representa la sobrepresión (presión anormal o exceso de presión) representada como la diferencia entre la curva de presión de poro y la presión hidrostática (Espinosa & Mateus, 2010).

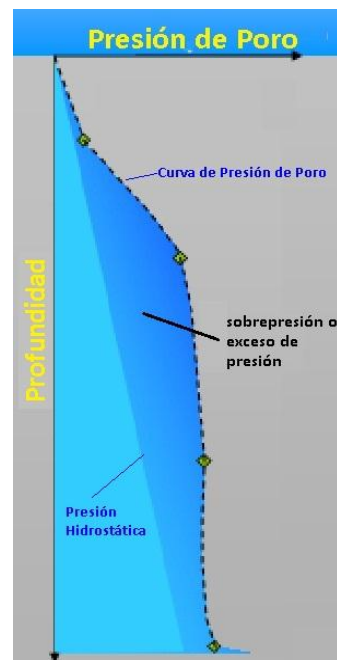
Algunas de las causas que originan o mantienen la sobrepresión son las siguientes:

- **Desequilibrio de Compactación:** se da principalmente por el llenado rápido de las cuencas sedimentarias dadas en el terciario. Altas tasas de sedimentación acompañada genero la formación de capas arcillosas de baja permeabilidad que sirven como trampas para evitar la salida de fluidos almacenados en los poros de formaciones adyacentes. Este proceso limita la

capacidad de los fluidos en los sedimentos de escapar como en una situación de compactación normal.

Cuando los líquidos quedan atrapados en los poros y más sedimentos son depositados se da la presión de sobrecarga y estos fenómenos juntos generan la sobrepresión, algunos ejemplos donde se presentan estos fenómenos son en el Golfo de México, el Mar del Norte y el Delta de Nigeria (Khalaf, Cairo, & Shennawy, 1979).

**FIGURA 74: Esquema grafico de sobrepresión con la profundidad.**

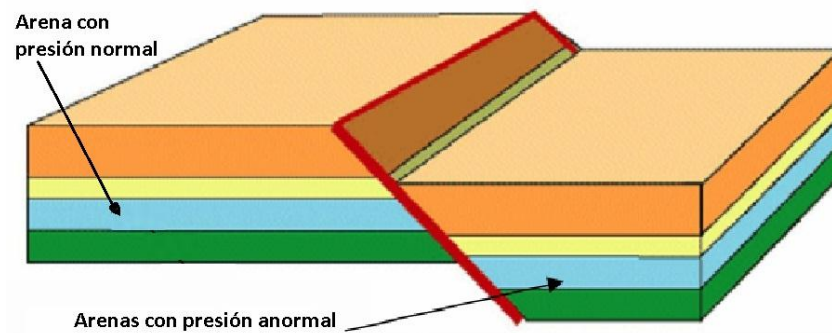


Fuente: Sheahan Thomas, 2009.

- **Actividad Tectónica:** Algunas actividades tectónicas como las fallas, las intrusiones de sal, intrusiones de arcillas, fallas y pliegues, entre otros, pueden contribuir a las presiones anormales.

En la figura 75 se muestra que un bloque de la izquierda fue elevado manteniendo su presión de poro del estrato (color azul), mientras que el bloque de la derecha cayo aumentando su presión y del estrato y generando así sobrepresión (BAKER HUGHEES, 2006).

**FIGURA 75: estrato sobrepresionado generado por actividad tectónica (falla).**

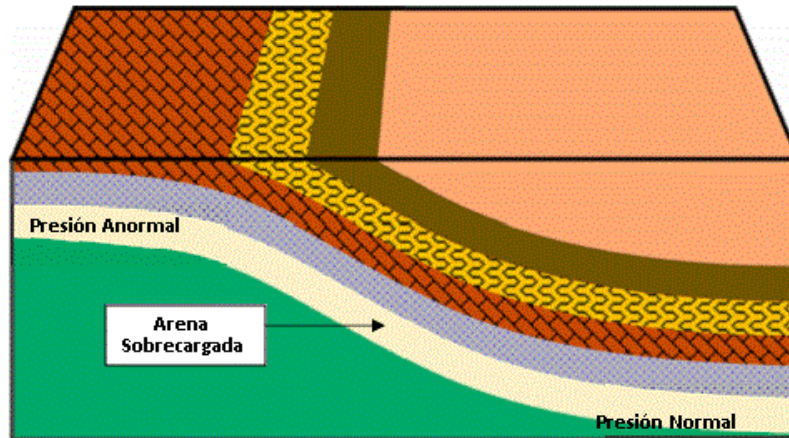


Fuente: (BAKER HUGHEES, 2006, pág. 581)

- **Características Estructurales:** Tales como lentes de inmersión y anticlinales que tienen una presión normal en la parte baja, pero desde esta zona se puede transmitir presión a la zona menos profunda dado como resultado allí una presión anormal como se indica en la figura 76. También se puede presentar en domos salinos donde se puede causar sobrepresiones severas debido a la eficacia del cierre hermético de la sal con los alrededores (Khalaf, Cairo, & Shennawy, 1979).
- **Generación y migración de Hidrocarburos:** son algunos de los factores que ayudan a generar exceso de presión en estratos; el gas es el hidrocarburo que más genera exceso de presión por su poder de expansión

reduce el control hidrostático, aunque el movimiento del petróleo y el agua por medio de estratos permeables a estratos impermeables generan sobrepresión.

**FIGURA 76: sobrepresión causada por características estructurales.**



Fuente: PRESSURE PREDICTION AND CONTROL, BAKER HUGHES Drilling Fluids

- **Diagénesis:** Es un transformación fisicoquímica de un material a otro, muchos minerales sufren esta metamorfosis a bajas temperaturas; Un ejemplo clásico es la transformación de yeso en anhidrita, en el que hay un cambio de volumen de alrededor del 50% con la expulsión de agua, si esta agua no puede expulsarse o desplazarse de la formación donde ocurre la transformación podría generar un aumento sustancial de la presión en un formación sellada.

El proceso de transformación sufrido por la esmectita, convirtiéndose en illita, y pasando a través de varios tipos de arcilla, puede ocurrir en un rango de temperatura que va de los 60 a los 200°C. En este proceso, la arcilla pierde la capacidad de sostener agua, y la liberación de esta es inevitable. Dependiendo del gradiente geotérmico regional (que puede estar entre 20 y 70 °C/km), la profundidad a la cual puede ocurrir este proceso va de 800 a

3000 metros bajo el suelo marino aproximadamente. Estratos sobre presionados en estas profundidades debido al agua libre, puede provocar el flujo de la misma por entre canales o fallas presentes en la formación. A este fenómeno es lo que se conoce como shallow wáter flow (Espinosa & Mateus, 2010).

- **Otros:** algunos factores como la inyección de agua, filtraciones de la tubería de revestimiento y reventones subterráneos pueden contribuir al aumento de la presión normal de una formación.

#### **3.4.6 Terremotos**

Aunque no es un fenómeno que sucede en profundidades someras, por el contrario, es debido al movimiento de las placas tectónicas que están mucho más profundas; si afecta e influye en los demás fenómenos descritos arriba, y por lo tanto se convierte también en un riesgo geológico para las operaciones de perforación costa fuera.

Los terremotos son provocados por el choque violento entre dos placas tectónicas en movimiento, las cuales generan grandes ondas que se mueven a lo largo y ancho del subsuelo. Esta propagación de ondas, provoca el movimiento de material paralelamente al movimiento de la onda. Ese material puede ser lodo. A su vez, influye en las fuerzas que soportan las rocas. Puede provocar tensión en algunas, y aumentar la compresión en otras.

Cuando el epicentro de un terremoto se encuentra cerca de la superficie del suelo marino, o el choque genera ondas tan grandes que alcanzan con fuerza este mismo; se pueden producir Tsunamis y otros tipos de fenómenos naturales asociados al movimiento y propagación de ondas. Cuando la onda empieza a propagarse sobre el agua, genera gigantescas olas que viajan con fuerza en diferentes direcciones.

Diferentes estudios han demostrado también que la presencia de terremotos influye en el comportamiento de la presión de poro existente en las formaciones.

### **3.5 RIESGOS ARTIFICIALES**

Los riesgos artificiales son toda aquella actividad realizada por el hombre que interfiera de forma negativa en el desarrollo normal de las operaciones de un proyecto. Para la perforación offshore podemos encontrar varios riesgos que aunque no sean de origen geológico deben ser considerados en la perforación costa afuera, pues puede implicar accidentes y pérdidas materiales, ambientales y humanas.

También se pueden considerar riesgos artificiales a las acciones humanas relacionadas con la exploración y desarrollo de las actividades petroleras, e incluso de otras actividades, que pueden impactar el estado de esfuerzos y la presión de poro de los estratos del suelo marino. Los riesgos artificiales están asociados principalmente con transporte, manejo, instalación y recuperación de elementos como tuberías, cabezales de pozo y otros equipos utilizados además de naufragios y ruinas de anteriores ( Thomson, 2010), (Espinosa & Mateus, 2010), (API RP 14J, 2005).

Dentro de los riesgos artificiales o humanos podemos encontrar:

- Elaboración del pozo inadecuada para la formación.
- Mal manejo de las temperaturas del lodo (desestabiliza hidratos de gas).
- Explosiones o reventones subterráneos.
- Terremotos inducidos.
- Instalación de estructuras, plataformas, anclajes, etc.
- Rutas de navegación marítima.
- Zonas de vertido, disposición o eliminación de residuos.

- Áreas de prácticas militares.
- Pozos perforados y abandonados en el área.

Algunas de las actividades propias de la industria petrolera como perforación y producción de fluidos representan riesgos para las operaciones y el medio ambiente, a continuación se mencionan algunas operaciones que además actúan como mecanismos de activación de movimiento de sedimentos, masas y suelos marinos (Espinosa & Mateus, 2010):

- La perforación de pozos que genera el flujo de fluidos o blowouts al suelo marino, creando cráteres.
- Flujo de fluidos en las formaciones, cambiando el régimen de la presión de poro en capas poco profundas, siendo crítico en zonas de taludes.
- La producción de aceite, está acompañada de un flujo de fluidos calientes, que provoca la fusión de los hidratos y una pérdida de la consolidación del suelo.
- La depleción de la presión del yacimiento genera la subsidencia del mismo, además de un cambio en los esfuerzos de overburden.
- Actividades de instalación de equipos. Debido al peso de los mismos se aumenta las fuerzas de gravedad.
- La instalación del anclaje de las unidades de perforación genera fuerzas laterales sobre el material sedimentario del suelo marino, debido al movimiento propio de las unidades.

Muchos de los riesgos artificiales son ocasionados por errores humanos debido a la falta de planeación y caracterización adecuada de las zonas para evitar que la operación tenga un alto margen de incertidumbre en el tema de riesgos.

## 4 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICO

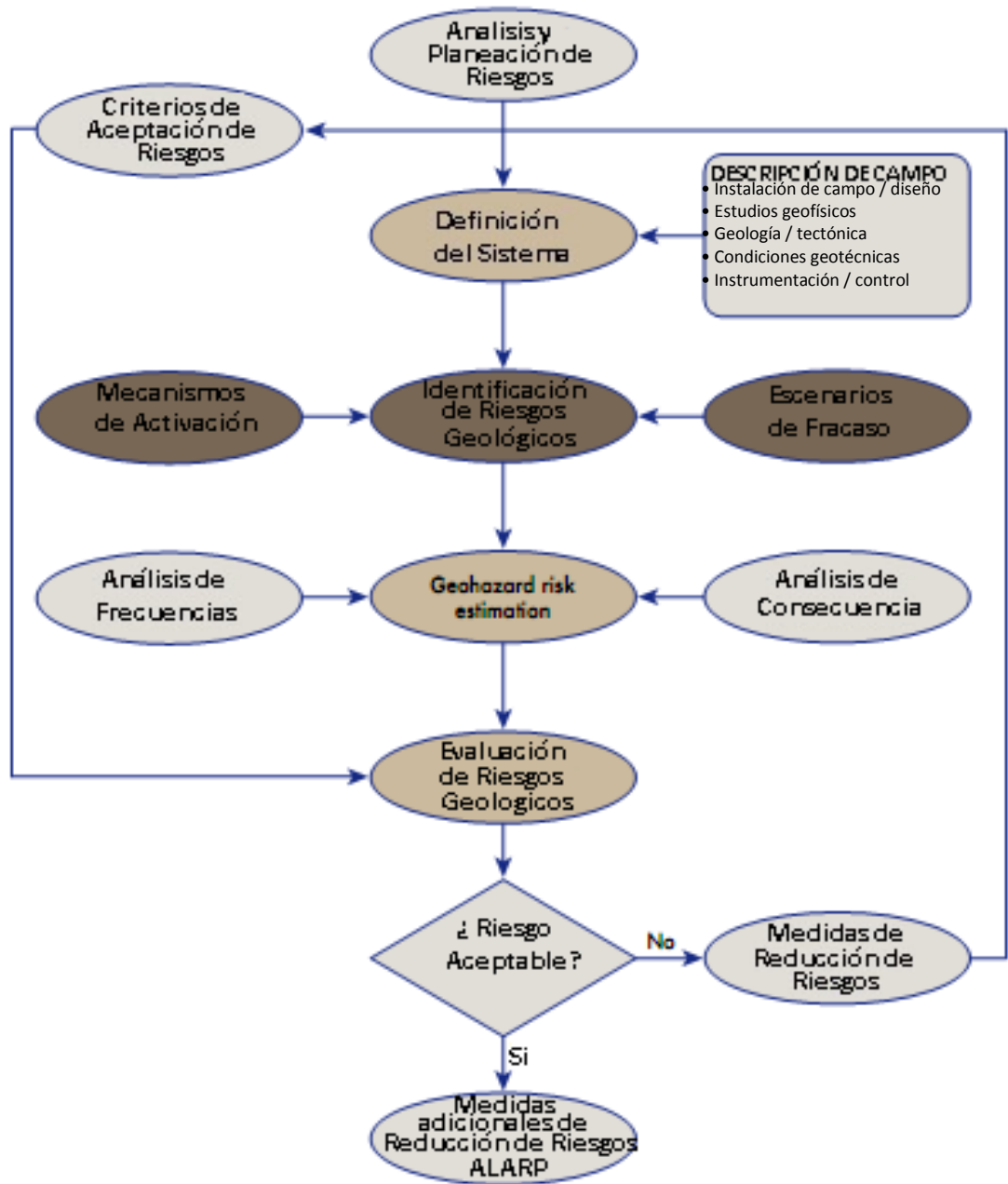
### 4.1 GENERALIDADES

La identificación de riesgos es una fase indispensable de los riesgos geológicos someros puesto que es aquí donde determina si existe o no riesgo un riesgo determinado. Una vez identificado un riesgo se procede a hacer la evaluación y posterior control, y mitigación para determinar su grado de peligrosidad.

En el proceso de identificación debe estar acorde al tiempo y la época del año, pues algunos efectos solo son dados bajo ciertas circunstancias, ejemplo la disociación de hidratos de gas debido al aumento de temperatura y disminución de presión por la disminución del nivel del mar en épocas de verano prolongado.

En la industria del petróleo y otros sectores industriales la etapa de identificación de riesgos es conocida como HAZID (Hazard Identification). Este describe los posibles escenarios de falla que pueden afectar la vida humana, el medio ambiente y los bienes causados por las correspondientes fuentes de riesgo y un posible daño o consecuencia indeseada. El HAZID debe ser realizado por un experimentado grupo interdisciplinario integrado por geólogos expertos, geofísicos, expertos en geomorfología, ingenieros geotécnicos y todos los especialistas de otras organizaciones de ingeniería dependiendo del tipo de riesgo o consecuencia implicados en el estudio a realizar (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009). Ver figura 77.

**FIGURA 77: Esquema general de identificación de riesgos**



Fuente: Modificada de OGP Report No. 425, 2009.

\*ALARP: as low as reasonably practicable (Lo más bajo que resulte razonablemente posible)

La norma API RP 14J define la identificación de riesgos como el primer paso del análisis predictivo de riesgos y lo considera como el más importante; este proceso consiste en identificar los distintos tipos de peligros que pueden existir basados en propiedades químicas y físicas de los fluidos que se manejan, la disposición de los equipos, procedimientos de operación y mantenimiento y las condiciones de procesamiento (NORSOK, 2001), (API RP 14J, 2005).

La identificación de riesgos geológicos requerirá una evaluación de las condiciones actuales o planeadas del lugar con respecto a la estabilidad del fondo marino a nivel local o regional, la estabilidad de pozos, las estructuras submarinas, las tuberías, y las bases y el anclaje de la plataforma. El HAZID es una búsqueda sistemática de los procesos naturales e inducidos por las actividades humanas, es decir, las fuentes de activación mencionadas en el capítulo anterior. Estas fuentes o mecanismos tienen potencial para transformar las condiciones estables a inestables, con consecuencias perjudiciales (NORSOK, 2001), (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

El equipo multidisciplinar de expertos debe tener la capacidad de comunicarse a través de las fronteras de sus disciplinas, pues, es indispensable que entre todos compartan sus conocimientos para identificar escenarios relevantes de fracaso y mecanismos de activación asociados. El equipo de HAZID debe estar asistido por el ingeniero de perforación o ingeniero de facilidades y guiado por un experto en análisis de riesgos con el fin de sistematizar y clasificar los escenarios y los mecanismos de activación que permite realizar el análisis cuantitativo de riesgos (QRA Quantitative Risk Analysis).

La norma NORSOK standard Z-013 establece que un estudio de identificación de riesgos debe incluir los siguientes parámetros:

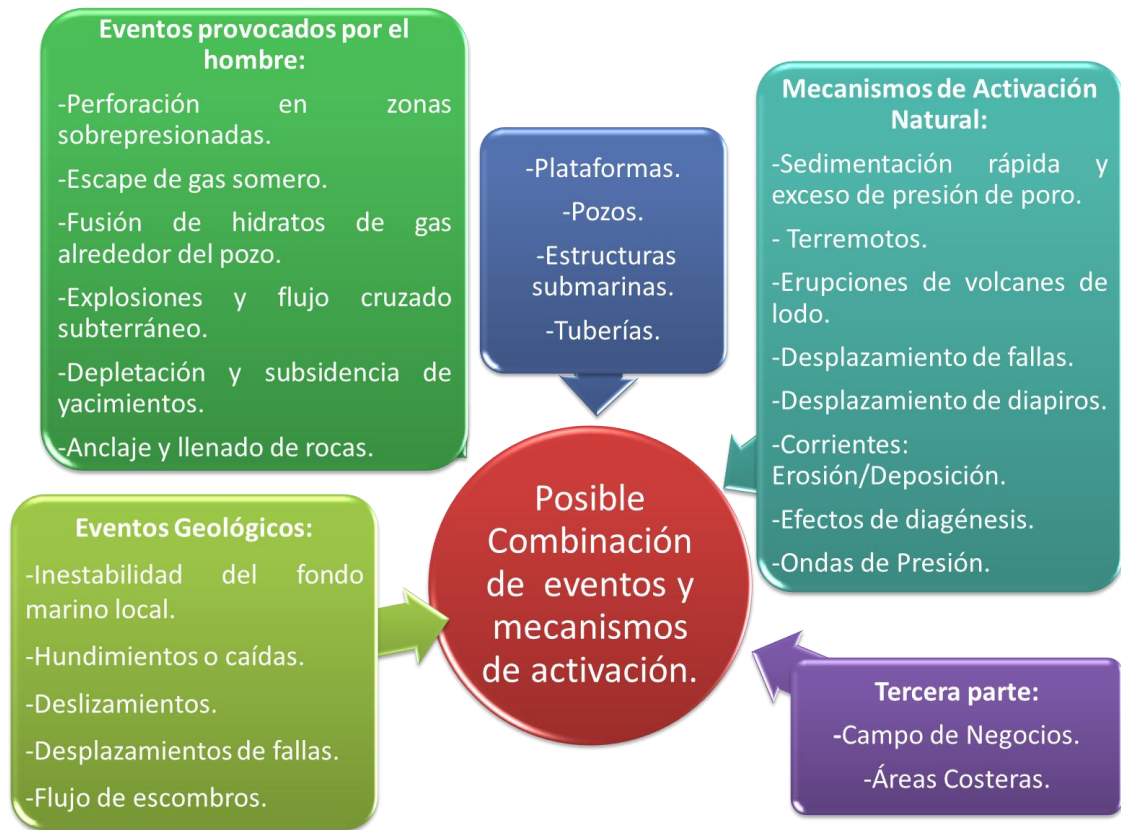
- Una amplia revisión de los posibles riesgos y fuentes de accidentes, con especial énfasis en asegurar que los riesgos relevantes no se han pasado por alto.
- Informes internos y externos de accidentes que resulten aplicables a la zona o tema de estudio.
- Una clasificación general de riesgos críticos frente a los no críticos para su posterior análisis.
- Descripción explícita de los criterios utilizados en la detección de los riesgos.
- Documentación explícita de las evaluaciones realizadas para la clasificación de los riesgos considerados como no críticos (NORSOK, 2001).

En la figura 78 se muestra se muestra la identificación de escenarios a través de la combinación sistemática de eventos de riesgo geológico y los mecanismos de activación que pueden afectar las instalaciones o bienes o tercera parte. La tercera parte es considerada en como el campo de los negocios y las áreas costeras (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

Para identificar los riesgos es necesario definir el sistema general de estudio, El sistema de riesgos geológicos debe comprender:

- Las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar, por ejemplo, sistemas geomecánicos actualmente existentes.
- Procesos geológicos locales y regionales en curso, y actividades que pueden modificar las condiciones de estado estable a estado inestable; por ejemplo la activación de eventos geológicos como deslizamiento de sedimentos o disociación de gas entre otros.
- Ubicación, extensión y Vulnerabilidad de valores (La vida humana, el medio ambiente e instalaciones) que están expuestos a riesgos y eventos de origen geológico ya sea directamente o por eventos escalonados.

**FIGURA 78: Definición de la combinación de los posibles eventos y mecanismos de activación que pueden afectar las instalaciones planeadas y la tercera parte.**



Fuente: Modificada de (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

La definición del sistema en las primeras fases de estudio puede estar basada en información limitada, Esta información debe obtenerse de entidades locales y regionales sobre geografía, geología, tectónica, literatura de riesgos históricos. La información principal a consultar de muestra en la tabla 5.

**TABLA 5: Recolección de Información existente para la definición de las propiedades del sistema.**

<b>INFORMACIÓN EXISTENTE QUE DEBE SER CONSULTADA</b>	
<b>MARCO GEOLOGICO</b>	Ubicación geográfica, mapas, batimetría global, mapas de espesor de estratos, límites y focos activos y pasivos de placas tectónicas, márgenes alimentados por ríos o glaciares, sistema de fosas submarinas, domos salinos, estratos salinos, volcanes de lodo, catálogo de volcanes y base de datos de deslizamientos.
<b>RIESGOS HISTORICOS</b>	Catálogo de terremotos, catálogo de Tsunamis, cambio en el nivel de los ríos, cambios en los deltas, influencia humana.
<b>INVESTIGACIONES PREVIAS</b>	Proyectos en áreas cercanas, proyectos de investigación de entidades u organizaciones reconocidas.
<b>GEOTECNIA</b>	Expertos en geotecnia, bases de datos geotécnicas del área.

Fuente: Modificada de (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

La información recolectada debe ser combinada con la los datos obtenidos de la investigación en las etapas de exploración y desarrollo del proyecto de campo, Esto incluye datos geofísicos, registros de pozos de exploración, evaluación de riesgos sísmicos, pozos geológicos y geotécnicos para la verificación del terreno, y la evaluación de parámetros del fondo marino, así como los planes de producción de pozos y diseño del campo (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

En la tabla 6 se muestran algunas actividades que se deben desarrollar durante la fase exploratoria del proyecto para la obtención de datos y caracterización de la zona para una posterior interpretación y evaluación del sistema del cual se hablará en el siguiente capítulo.

**TABLA 6: Recolección de Información del proyecto exploratorio para la definición de las propiedades del sistema.**

<b>INFORMACIÓN OBTENIDA DEL PROYECTO EXPLORATORIO.</b>	
<b>DATOS GEOFISICOS.</b>	Batimetría, sísmica unilateral y multilateral, sísmica 3D, sísmica 2D, Ondas Electromagnéticas, ondas de corte.
<b>INVESTIGACIÓN GEOTECNICA</b>	Muestras de perforación, pruebas in situ, registros a hueco abierto pozo, resultados de piezómetros in situ.
<b>PRODUCCIÓN DE POZOS Y DISEÑO DE CAMPO</b>	Diseño de pozo, estructuras y geofomas submarinas, bases y anclajes de plataformas, manipulación de tuberías.
<b>PERFORACIÓN Y MUESTREO EXPLORATORIO.</b>	Registros de perforación y registros de pozo.
<b>PRUEBAS GEOTECNICAS DE LABORATORIO</b>	Clasificación de las pruebas, compactación y permeabilidad, compactación y permeabilidad, pruebas de resistencia del suelo, triaxiales, radiales, pruebas destructivas y no destructivos.
<b>EVALUACIÓN DE RIEGOS GEOLOGICOS</b>	Picos de aceleración de movimientos terrestres comparados con la frecuencia de ocurrencia, y hechos históricos relacionados
<b>PRUEBAS GEOLOGICAS</b>	Estudios de mineralogía y edad de los estratos.

Fuente: Modificada de OGP Report No. 425, 2009

El equipo de identificación de riesgos debe sestar enfocarse a responder las siguientes preguntas:

- ¿Podemos explicar lo observado en el área con la información disponible?, por ejemplo inferir el pasado de algunos fenómenos o procesos actuales. Los fenómenos observados e inferidos pueden ser anomalías de presión, deslizamientos de sedimentos, pendientes pronunciadas, y otros eventos relacionados; otros pueden ser:
  - Procesos geológicos y condiciones climáticas.
  - La configuración de esfuerzos y tensiones del terreno en el área, condiciones de presión de poro.

- Mecanismos de activación natural.
- ¿Cuáles son los riesgos naturales potenciales actuales y en el futuro próximo de la vida del campo?
  - El curso en el cambio de las condiciones de procesos geológicos y climáticos.
  - La incertidumbre en cuanto a la presión de poro de los estratos de la formación.
  - Mecanismos de activación naturales.
- ¿Pueden funcionar las actividades programadas en relación con el desarrollo de exploración y producción del campo, en caso de cambiar las condiciones que representan peligros?
- ¿En caso de tener que obtener una licencia adicional por riesgos en que se ve afectado los negocios y la dirección del proyecto?

La evaluación de riesgo geológico se basa generalmente en la información disponible acerca de la geología regional y local y de las condiciones específicas con respecto a la batimetría, la estratigrafía, las condiciones del suelo y la exploración de campo y diseñar los planes. En las zonas con riesgos geológicos potenciales debe haber un alto grado de interacción entre la planificación del área de desarrollo y las evaluaciones de riesgos de origen geológico. Durante el desarrollo del proyecto la cantidad de información aumenta, los planes por lo general serán modificados y por lo tanto un enfoque por etapas es necesario. El número de etapas necesarias dependerá de los resultados de la etapa anterior y la complejidad del proyecto (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009). Un ejemplo de este enfoque es la el representado en la tabla 7.

**TABLA 7A: Enfoque de identificación de Geohazards por etapas.**

ETAPA	DEFINICIÓN DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	VALORACIÓN DE SITUACIONES DE RIESGOS GEOLOGICO
INICIAL	<p><b>a) Modelo geológico de la región</b> (Edad y fuente de los sedimentos)</p> <p><b>b) Corridos sísmicas</b> (línea recta, líneas cruzadas, superficial, profunda)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratigrafía y características del subsuelo.</li> <li>- signos de actividades de deslizamientos, recientes o antiguos ya sean superficiales o someros.</li> <li>- Fallas activas, diapiros, anticlinales.</li> <li>- Filtrado de fluidos, características de los fluidos, fluidos suspendidos.</li> <li>- Determinar la existencia de hidratos de gas (uso BSR).</li> </ul> <p><b>c) evaluación batimétrica</b> (Morfología e inclinación del fondo marino).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evidencia de principales deslizamientos.</li> <li>- Señales de inestabilidad de fondo marino local, fosas, depresiones, dorsales oceánicas, pendientes ascendentes y descendentes entre otros.</li> <li>- Salida de fluidos al fondo marino, volcanes de lodo, ventanas de gas, diapiros salinos.</li> </ul> <p><b>c) Experiencia de perforación en el área.</b></p> <p><b>d) Actividad sísmica en el área.</b></p> <p><b>e) Establecer un modelo inicial del terreno.</b></p> <p><b>f) 1era etapa de planes de desarrollo del campo.</b></p> <p><b>g) 1era etapa de identificación de escenarios de falla.</b></p>	<p><b>a) Señales claras de riesgos</b> geológicos potenciales a nivel local o regional</p> <p><b>b) mecanismos de activación</b> potenciales para el suelo marino.</p> <p><b>c) Otros riesgos:</b> SGF (flujo de gas somero), SWF (flujo de agua somera).</p> <p><b>d) Estabilidad de taludes:</b> evaluación aproximada de las zonas de alta pendiente.</p> <p><b>e) comparar planes de desarrollo del campo:</b> pozos, instalaciones de campo y corredor de tuberías.</p> <p><b>f) Primera etapa de selección,</b> orientación y prevención de riesgos geológicos.</p> <p><b>g) Información más detallada:</b> De acuerdo a lo anterior planificación, optimización y adquisición de datos para la siguiente etapa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Batimetría más detallada si se requiere.</li> <li>- Batimetría extendida, pendientes ascendentes y descendentes y construcción de mapas batimétricos.</li> <li>- Perfiles sísmicos adicionales si se requieren.</li> <li>- Investigación geofísica más detallada de ondas de corte y electromagnéticas.</li> <li>- Geotecnia adicional y mediciones de presión de poro.</li> </ul>

Fuente: Modificada de OGP Report No. 425, 2009

**TABLA 7B: Enfoque de identificación de Geohazards por etapas.**

ETAPA	DEFINICIÓN DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	VALORACIÓN DE SITUACIONES DE RIESGOS GEOLOGICO
INTERMEDIO	<p><b>a) Sísmica, Registros y batimetría:</b> Evaluación y procesamiento de sísmica 3D, sísmica 2D de Ultra-alta resolución, registros de pozos, sísmica detallada de poca profundidad, batimetría detallada (batimetría multihaz y sonar de barrido lateral)</p> <p><b>b) Reinterpretación</b> de morfología y señales potenciales de mecanismos de inestabilidad y deslizamientos 1en fondo marino.</p> <p><b>c) Presión:</b> Evaluar las condiciones de presión de poro y señales de sobrepresión.</p> <p><b>d) Detalles del subsuelo:</b> Posibles planes de perforaciones de muestreo para determinar compresibilidad, permeabilidad, configuración de esfuerzos y resistencia o sensibilidad de los suelos.</p> <p><b>e) Modelo:</b> Los parámetros de diseño duden ser seleccionados para la y calibración del geomodelo del suelo elaborado en la primera etapa.</p> <p><b>f) Dinámica de deposición:</b> Evaluar las tasas de deposición de sedimentos, la historia de sedimentación y la posibilidad de existencia de exceso de presión de poro y demás datos requeridos.</p> <p><b>g) Magnitud:</b> En caso de existencia hacer una comparación entre las frecuencias y magnitudes de terremotos, erupciones, volcanes de lodo, etc.</p> <p><b>h) Procesos Naturales en curso:</b> Identificar la presencia de erosiones o desplazamientos de estructuras por domos salinos.</p> <p><b>i) Actualización:</b> Actualizar los planes de desarrollo del campo y demás de acuerdo al escenario de fallos relacionados a riesgos geológicos.</p>	<p><b>a) Procesos naturales:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios actuales del gradiente de presión del lecho marino debido a la erosión, deposición, compactación y fallas activas.</li> <li>- Evaluación de riesgos actualizada de terremotos.</li> <li>- Evaluación de estabilidad de pendientes a escalas local y regional.</li> <li>- Condiciones de exceso de presión de poro y flujo de fluidos.</li> </ul> <p><b>b) Influencia de la actividad humana.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaboración de pozos, flujos de calor y fusión de hidratos de gas.</li> <li>- Reventones o explosiones subterráneas.</li> <li>- Fenómenos de subsidencia y terremotos inducidos.</li> <li>- Instalación y anclaje de estructuras, tuberías de soporte entre otros.</li> </ul> <p><b>c) Evaluación de riesgos geológicos.</b></p> <p><b>d) Cuantificar riesgo:</b> Determinar numéricamente los escenarios y probabilidades de accidentes.</p> <p><b>e) Prevención y mitigación:</b> Evaluar la posibilidad de modificar el diseño del proyecto incluyendo correcciones para prevenir o mitigar riesgos.</p> <p><b>f) Verificar si la información disponible es suficiente.</b></p> <p><b>g) Programa final:</b> Si la información es suficiente se debe elaborar el proyecto final de investigación del sitio en cuanto a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perforación para muestras de campo, pruebas de laboratorio e interpretación de resultados.</li> <li>- Mediciones de presión de poro.</li> <li>- Estudios locales de batimetría y corredores de tuberías.</li> </ul>

Fuente: Modificada de (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

**TABLA 7C: Enfoque de identificación de Geohazards por etapas.**

ETAPA	DEFINICIÓN DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS
FINAL	<p>a) <b>Afinar y calibrar el Geomodelo:</b> Para la construcción del geomodelo se deben tener en cuenta todos los estudios y datos de batimetría, estratigrafía, y demás datos relevantes del suelo, además de determinar la incertidumbre de dicho modelo de acuerdo a la representatividad de los datos de entrada.</p> <p>b) <b>Escenarios de fallo:</b> seleccionar los escenarios de fallo o accidentes asociados mecanismos de activación de riesgos geológicos incluyendo su análisis y evaluación.</p> <p>c) <b>Relevancia del riesgo:</b> Identificar, describir y cuantificar los mecanismos de activación relevantes de acuerdo a la frecuencia y la magnitud.</p> <p>c) <b>Etapas finales del análisis de riesgos geológicos.</b></p> <p>d) <b>Modelo Geomecánico:</b> Deben aplicarse un modelo geomecánico para determinar los escenarios de fallo, es necesario tener en cuenta la incertidumbre asociada al modelo dependiendo de la calidad de los datos de entrada y la precisión del modelo numérico aplicado. El modelo puede incluir análisis de estabilidad, análisis por medio de Elementos Finitos, Flujo de fluidos, transferencia de calor entre otros.</p> <p>e) <b>Evaluar las posibilidades de fallo o accidente.</b></p> <p>f) <b>Evaluar las consecuencias físicas:</b> En caso de fallo o accidente es necesario evaluar las consecuencias asociadas y estimar el impacto de posibles daños generados. Los accidentes pueden ocurrir por pérdida del soporte de la plataforma, deslizamientos de sedimentos, generación de tsunamis, etc.</p> <p>g) <b>Cuantificar Geohazards:</b> Determinar numéricamente la contribución o relevancia de riesgos geológicos en caso de posibles accidentes.</p> <p>h) <b>Mitigación:</b> Es de vital importancia evaluar a través de diseño del modelo la mitigación de posibles accidentes.</p> <p>i) <b>Comprobar:</b> El estudio debe ser verificado para que cumpla las exigencias de compatibilidad de los clientes y autoridades gubernamentales en términos ambientales.</p> <p>j) <b>Elaborar mapas:</b> En el estudio final se debe entregar un mapa con la información y ubicación de riesgos geológicos para el diseño detallado y la ingeniería del proyecto de perforación y desarrollo del campo.</p>

Fuente: Modificada de (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

A continuación se explicará, de forma breve, una descripción de la forma adecuada para identificar cada riesgo de forma individual, aunque, es bien sabido que las principales herramientas de identificación de riesgos son las mostradas en la tabla 8 (Rutledge & Leonard, 2001), (Artiles Pérez, Pérez Salazar, Gabilondo Márquez, Barrera Godines, & Hernández Valdés, 2005).

**TABLA 8: Principales Herramientas o Métodos de identificación de Riesgos Geológicos.**

Análisis de imágenes satelitales	Sistema de posicionamiento satelital y submarino	Batimetría
Gravimetría de alta resolución.	Mediciones de flujo de calor y perfiles de columna de agua.	Muestras agua y de lecho marino
Sistemas Integrados	Muestreo y Ensayo y registros eléctricos de pozo y de perforación	Ensayos Geotécnicos In-Situ
Sonografía y perfiles acústicos ADCP	Sísmica 2D, 3D, Multihaz, Sonar de Barrido lateral entre otras	Magnetometría y perfiles de fondo.

Fuente: modificado de (Artiles Pérez, Pérez Salazar, Gabilondo Márquez, Barrera Godines, & Hernández Valdés, 2005) y (Rutledge & Leonard, 2001)

## **4.2 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS A NIVEL DEL MAR.**

### **4.2.1 Generalidades**

Los riesgos geológicos asociados a la perforación offshore son básicamente corrientes marinas, tsunamis y terremotos que generan el movimientos de grandes masas de agua, por lo tanto la identificación de riesgos geológicos someros se bajas en la dirección de las corrientes, las fuentes de activación de terremotos y las profundidades del fondo marino.

#### 4.2.2 Tormentas, mareas altas y corrientes marinas

Las tormentas son determinadas de acuerdo a estudios meteorológicos de acuerdo a la época del año y a la influencia de las fuerzas gravitatorias de la luna con la tierra al igual que las mareas altas (Haeger & Bol, 2007).

La dirección de las corrientes marinas se puede medir de distintas formas, a continuación se mencionan las más usadas.

- **Correntómetros fijos o anclados:** Son dispositivos usados para medir la dirección y velocidad de las corrientes marinas. Los correntómetros anclados generan un registro detallado de las corrientes en un lugar en particular y pueden estar instalados en boyas, muelles, plataformas petroleras o el fondo marino.

En la figura 79 se muestran a la izquierda un correntómetro instalado una boya de navegación en superficie, en el centro el mapa con los puntos geográficos realizan mediciones de corrientes marinas en esta caso particular en el Golfo de México, y a la derecha se muestra un correntómetro anclado al fondo marino. Algunos correntómetros por efecto Doppler pueden hacer mediciones desde fondo hasta superficie (Haeger & Bol, 2007).

Algunos correntómetros no generan datos en tiempo real, otros mantienen un registro que se debe recuperar y descargar posteriormente. Esto es así, especialmente, en el caso de los correntómetros empleados en estudios de ingeniería e investigaciones científicas.

- **Boyas de deriva:** Otra forma de medir las corrientes consiste en lanzar una boya y dejar que envíe su posición a un aparato receptor. En la actualidad, varios miles de boyas como la que se muestra en la parte izquierda de la

figura 80 están a la deriva en los océanos del mundo y transmiten esos datos.

**FIGURA 79: Correntómetros fijos y mapa geográfico para caracterizar zonas a nivel local o regional.**

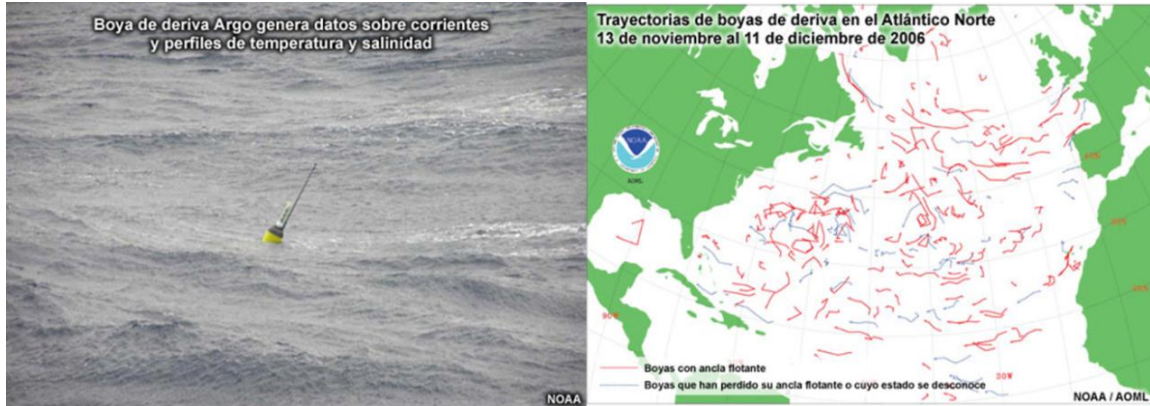


Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

La mayoría de las boyas de deriva flotan en la superficie, pero algunas están diseñadas para hundirse a profundidades de algunos centenares de metros por varios días y luego volver a la superficie para transmitir su posición por radio. Estas boyas proporcionan datos sobre las corrientes oceánicas profundas. A medida que las boyas suben y bajan, también miden la temperatura y salinidad.

En la parte derecha de la figura 80 se muestra la trayectoria de boyas de deriva durante un mes en el atlántico Norte en 2006; las líneas rojas representan la trayectoria de una boya con ancla flotante y las líneas azules las boyas que han perdido su ancla flotante o se desconoce su estado actual.

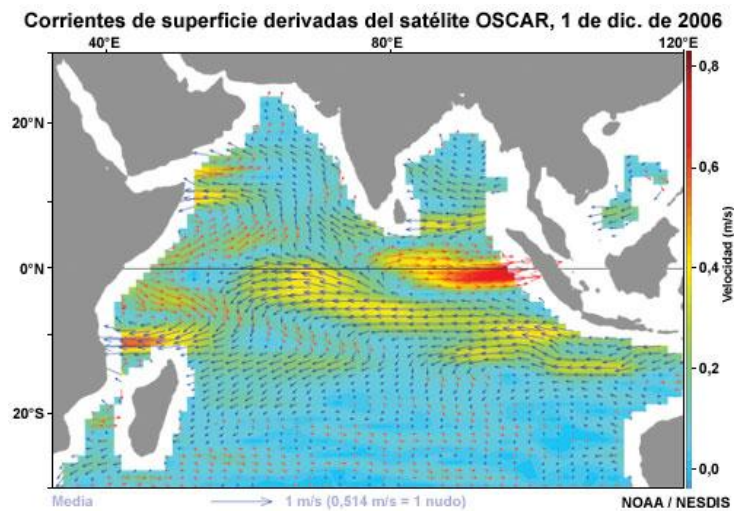
**FIGURA 80: Boyas de deriva y mapa de direcciones de boyas en el atlántico norte durante un mes en 2006.**



Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

- **Satélites:** Los satélites pueden medir con un grado muy alto de precisión la altura de la superficie del mar y los vientos de superficie. A partir de estas mediciones podemos estimar los componentes geostrofico e impulsado por el viento de las corrientes oceánicas (Ver figura 81).

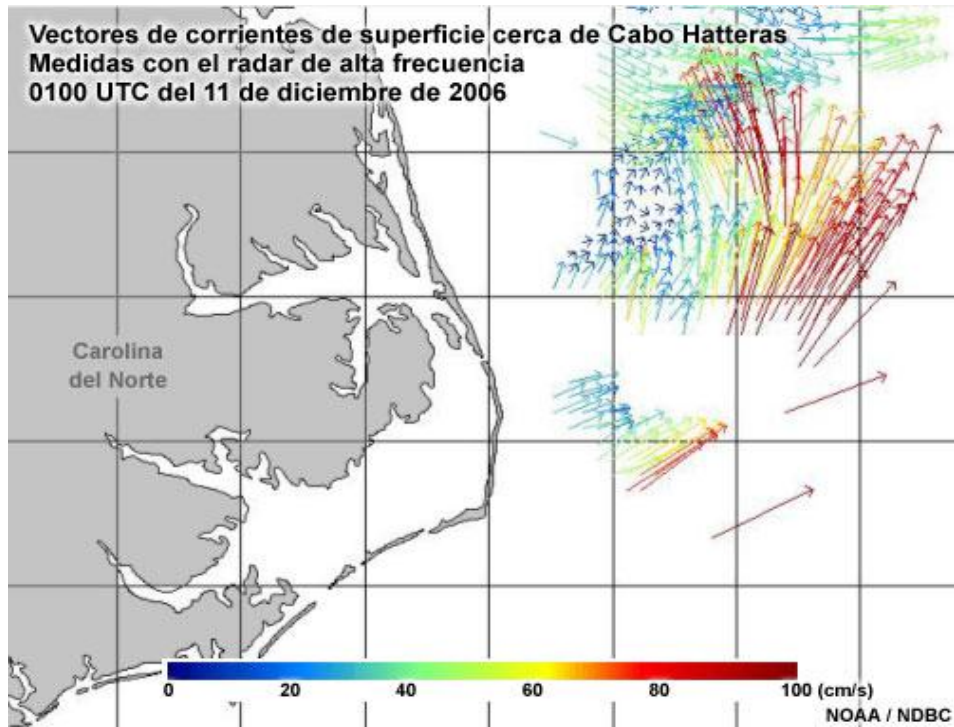
**FIGURA 81: Mediciones satelitales de las corrientes del Océano Indico en 2006.**



Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

- **Radar:** Se puede proporcionar estimaciones de las corrientes superficiales hasta 300 km del litoral con radares de alta frecuencia. En el mapa de la figura 82 se muestra las corrientes superficiales medidas por un radar cerca de Cabo Hatteras Estados Unidos.

**FIGURA 82: Vectores de corrientes superficiales medidas con un radar de alta frecuencia en diciembre de 2006.**

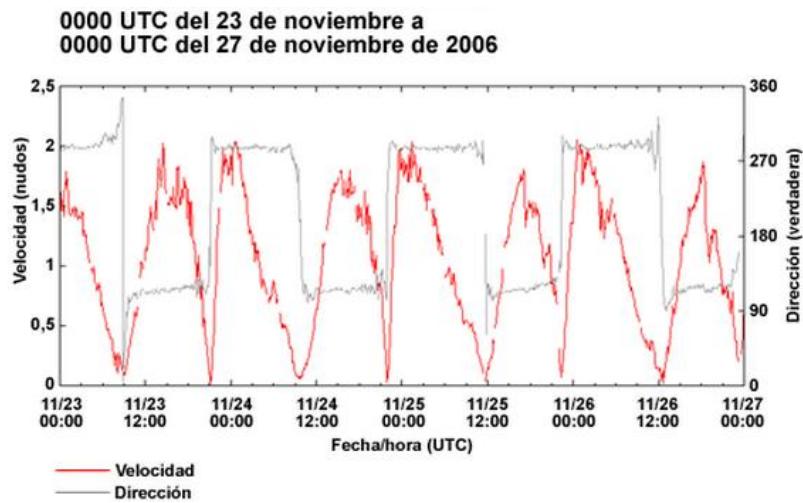


Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

Para predecir y describir las corrientes oceánicas los datos deben ser interpretados por medio de la construcción de mapas de corrientes, graficas de series temporales como la que se muestra en la figura 83 donde se guarda la velocidad y dirección de las corrientes con respecto al tiempo, series de vectores o trazos como la que se indica en la figura 84 donde se muestra tres gráficos temporales a la vez (nivel del

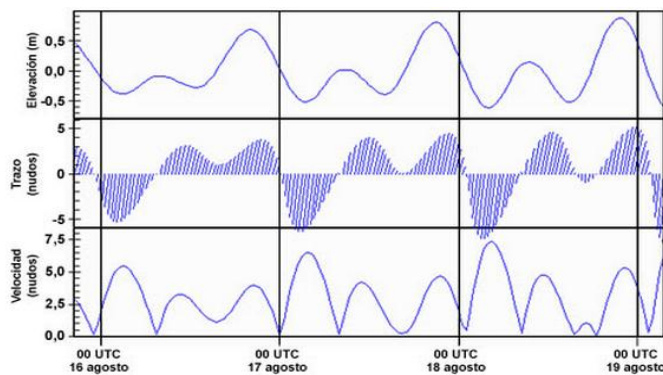
agua, velocidad de la corriente y vectores de dirección) y tablas de corrientes de mareas donde se registre el tiempo y la ubicación de los medidores junto con la velocidad y dirección de las corrientes (Haeger & Bol, 2007).

**FIGURA 83: Series temporales tomadas en la entrada de la bahía de Galveston, Golfo de México.**



Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

**FIGURA 84: Serie temporal de mareas con diagramas a trazos.**



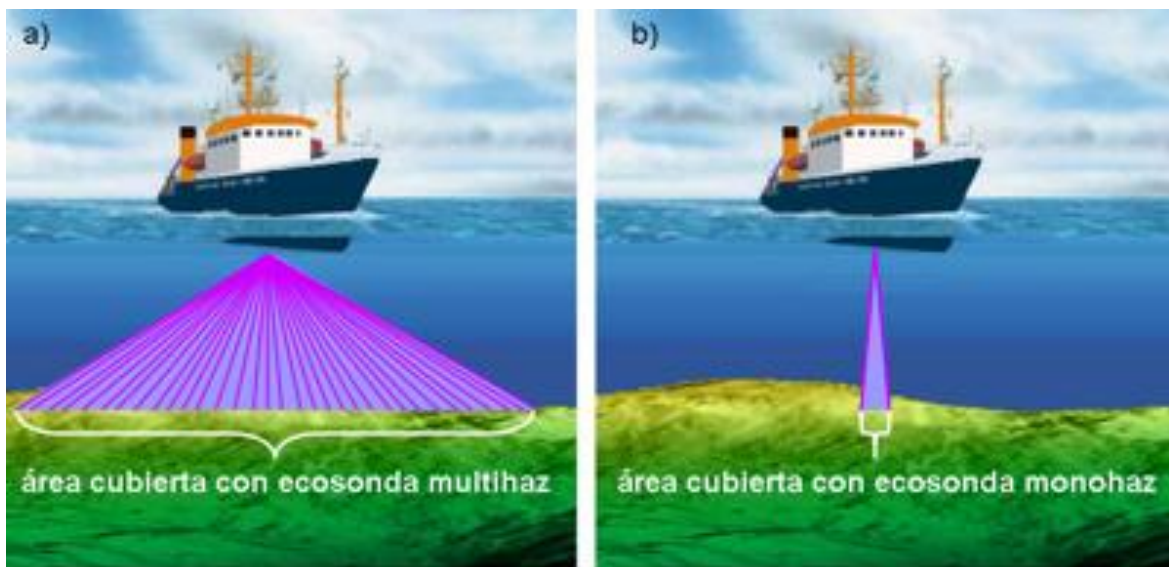
Fuente: (Haeger & Bol, 2007).

- **Batimetría:** Es el estudio del fondo marino, inicialmente esta se concebía como la medición de la profundidad oceánica. Hoy la batimetría es una

herramienta fundamental usada para determinar representa la morfología o relieve del fondo marino, es el equivalente submarino de la altimetría. Consiste en determinar la profundidad midiendo el tiempo que le toma a una onda acústica, enviada desde el barco, viajar a través del agua hacia el fondo marino y luego volver al barco.

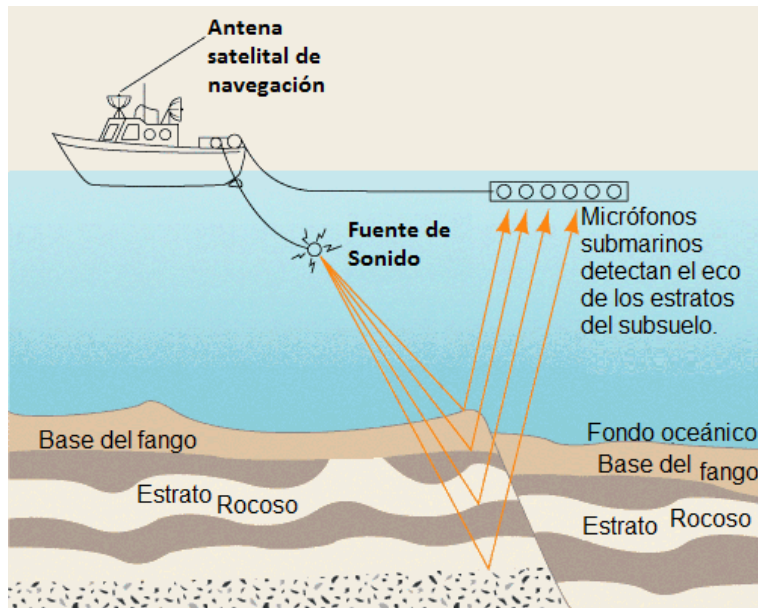
En la batimetría se emplean herramientas como sensores de presión, XBT (Expandible BathyThermograph), sísmica multihaz, Sonar de barrido lateral (MBS), sísmica 3D, vehículos autónomos y a control remoto. Ver figuras 85, 86 y 87.

**FIGURA 85: Representación sísmica ecosonda monohaz y multihaz.**



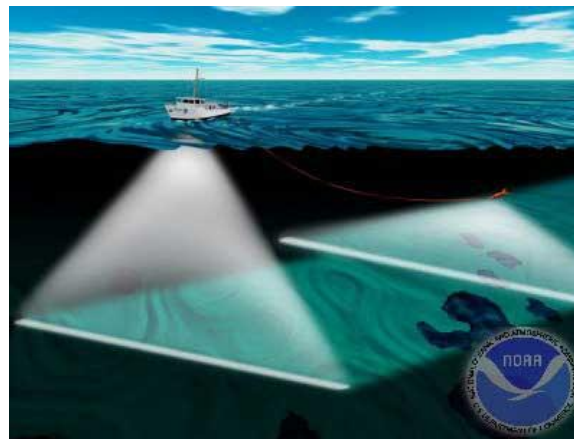
Fuente: (SIOSEARCH, 2010)

**FIGURA 86: Esquema representativo de reflexión sísmica.**



Fuente: (Siever, 2007)

**FIGURA 87: Multihaz y Sonar de Barrido Lateral (MBS) usados en cartografía batimétrica.**



Fuente: (Bermuda, 2009)

- **Sensores de presión:** Permiten medir la deformación vertical en el fondo del mar, además mide elevaciones o subsidencias en fondo, en la figura 88 se muestra un dispositivo moderno con sensor de presión para medida de

mareas y puede permanecer en fondo del mar hasta por dos meses, además de registrar presión también registra temperatura y tiene un software asociado (Aemon07, 2007).

**FIGURA 88: Mareógrafo RBR.**



Fuente: (Aemon07, 2007)

- **XBT** (Expendable BathyThermograph): El registro batimétrico debe ser corregido regularmente utilizando sensores de temperatura. Estos permiten obtener un perfil de temperatura del océano. En la figura 89 se muestra un XBT que se usa además de mediciones de temperatura con profundidad de medir la velocidad del sonido (USGS, 2011).

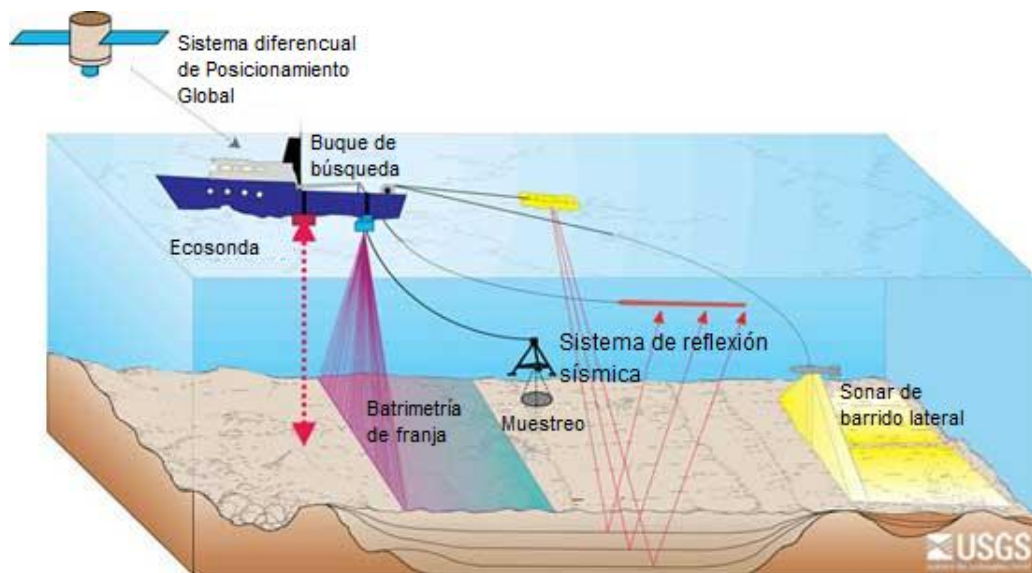
**FIGURA 89: XBT, sensor de temperatura y velocidad del sonido con la profundidad para estudios de batimetría.**



Fuente: (USGS, 2011)

Hoy día existe la posibilidad de integrar las anteriores herramientas en una sola, de tal forma que los datos obtenidos tengan mayor representatividad y precisión, la figura 90 muestra como se integran las herramientas de Sonar barrido lateral, reflexión sísmica, muestreos de fondo, batimetría de franja, Ecosondas y GPS (USGS, 2011).

**FIGURA 90: Integración de herramientas para caracterizar la geomorfología y profundidad del lecho marino.**



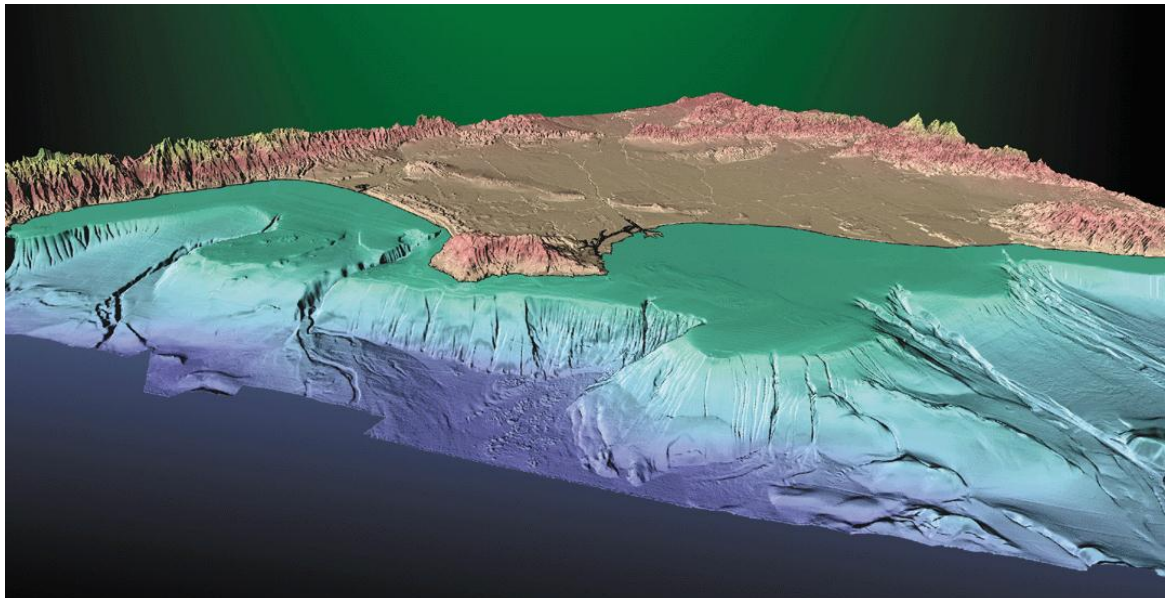
Fuente: (USGS-Woods Hole Science Center, 2012).

El objetivo final de la batimetría es obtener mapas de nivel, y caracterización detallada del fondo marino, en las figuras 91 donde se puede observar claramente la geomorfología de la plataforma continental de los Ángeles.

Sin embargo, para el Caribe colombiano ya existen estudios de batimetría de baja resolución publicados, alguna de esta información se puede encontrar en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH, 2012); donde se resaltan documentos como las cartas batimétricas COL 1601, COL

1621, COL 1622, COL 1623, COL 1624, COL 1625, COL 1626, COL 1649 entre otras, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) donde se resalta el tema “CARTOGRAFIA DE LOS PAISAJES Y ECOSISTEMAS DEL FONDO MARINO DEL CARIBE Y PACIFICO COLOMBIANO” la revista número 38, es Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) y la Dirección General Marítima (DIMAR), documento relacionado también es “Geografía Submarina del Caribe Colombiano (ver figuras 92 y 93 )”.

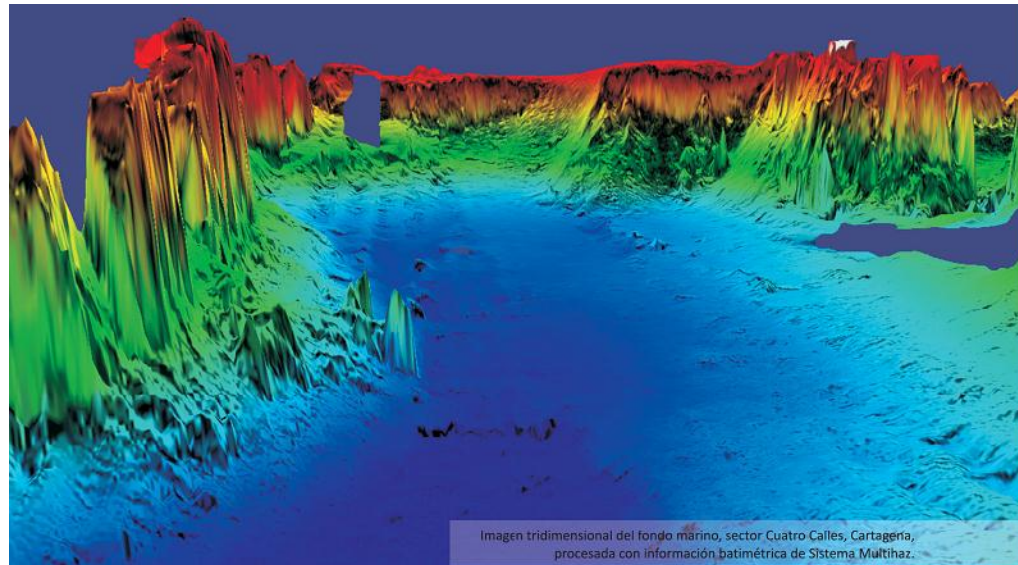
**FIGURA 91: Batimetría de la plataforma continental en los Ángeles EU.**



Fuente: (USGS Pacific Sea-Floor Mapping Project, 2000).

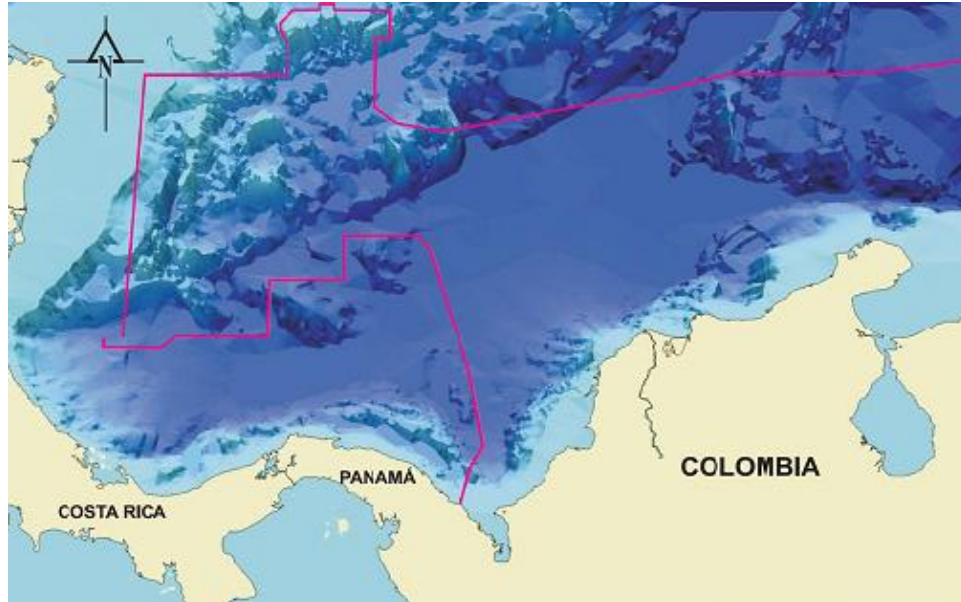
Por otro lado también existen organizaciones internacionales con información importante respecto a la batimetría, como lo son la Organización Hidrográfica Internacional (IHO), la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC), Carta Batimétrica general de los Océanos (GEBCO), Agencia Nacional de Geointeligencia de los Estados Unidos.

**FIGURA 92: Batimetría de sistema multihaz fondo marino, Cartagena.**



Fuente: (DIMAR & CIOH, 2009, pág. 11).

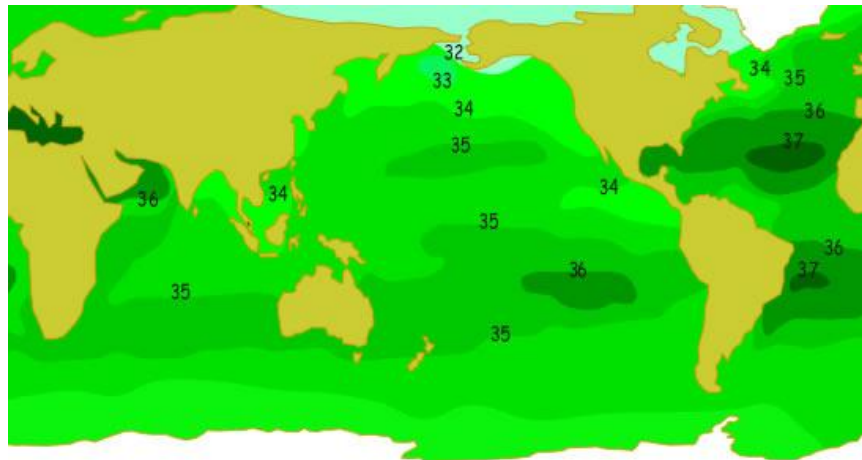
**FIGURA 93: Batimetría en la costa Caribe Colombiana.**



Fuente: (DIMAR & CIOH, 2009, pág. 64)

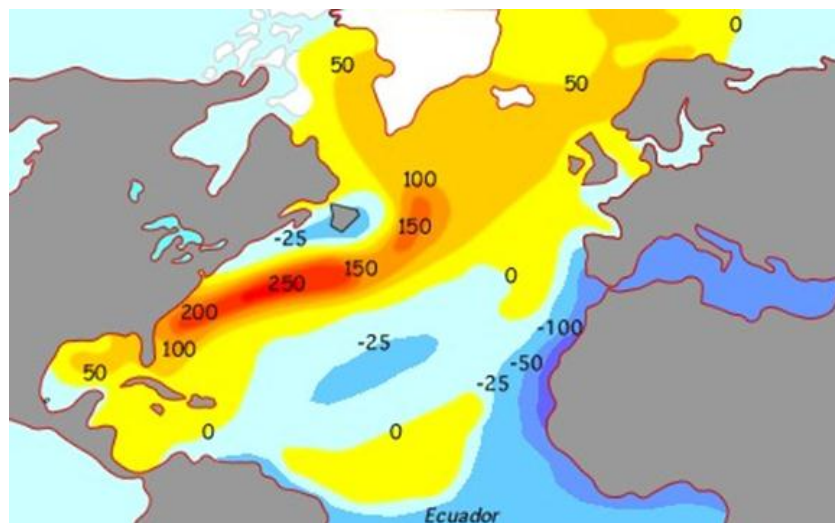
La salinidad y la temperatura también hacen parte de los estudios de batimetría, en las figuras 94 y 95 se muestran estas características.

**FIGURA 94: Salinidad en la superficie del agua oceánica (gramos de sal por kilogramos de agua).**



Fuente: Modificado de (Uriarte, 2007).

**FIGURA 95: Transferencia media anual de calor en el Atlántico Norte del mar a la atmósfera (vatios/metros cuadrado)**



Fuente: Modificado de (Uriarte, 2007).

### 4.2.3 Tsunamis y Terremotos

Los tsunamis están muy ligados a los terremotos debido a que se pueden generar por movimientos telúricos asociados a la dinámica de las placas tectónicas y fenómenos de geológicos de compactación y subsidencia.

**FIGURA 96: Registros sísmicos de COBS.**



Fuente: Modificado de (Frontera, Olivera, Jara, & Goula, 2011).

Los terremotos se detectan mediante redes sísmológicas instaladas en el fondo marino (Ocean Bottom Seismometer OBS); estas redes se encargan de enviar señales por medio de ondas y recibir respuestas que son interpretadas por software especial de computadoras por medio de un satélite ubicado en el barco en superficie (Frontera, Olivera, Jara, & Goula, 2011), (Ito & Obana, 2011), (NTHMP, 2011). Ver Figura 96 y 97.

En la parte izquierda de la figura 97 se observa un sismómetro instalado en fondo marino que se encarga de registrar las la velocidad de las ondas para determinar actividad sísmica.

En la parte central de la figura 97 se muestra el cableado desde el barco donde se distribuyen para formar las redes sísmológicas que son captadas de regreso por una antena satelital instalada en el barco la cual se muestra en la parte derecha de la figura 97.

**FIGURA 97: Principales herramientas usadas en las redes sismológicas.**



Fuente: USGS U. S Geological Survey y (Frontera, Olivera, Jara, & Goula, 2011).

Para la comprensión total de la sismica de determinada zona se requiere de cuatro componentes fundamentales en el sistema de medición para el desarrollo e interpretación sísmica del lugar; estos son (Chen, Ullmann, & Mason, 1989).

- Sensores de fuertes movimientos.
- Sistema de adquisición de datos.
- Sistemas de grabación y reconocimiento de información.
- Dispositivos y equipos de comunicación a distancia.

Con los avances tecnológicos en cuanto a dispositivos de control remoto, vehículos submarinos y la mejora continua de la reflexión sísmica es posible tomar mediciones cada vez más precisas para la interpretación y mitigación de terremotos y movimientos telúricos, que puedan afectar la estabilidad de la plataforma en superficie y por ende la operación de perforación costa fuera.

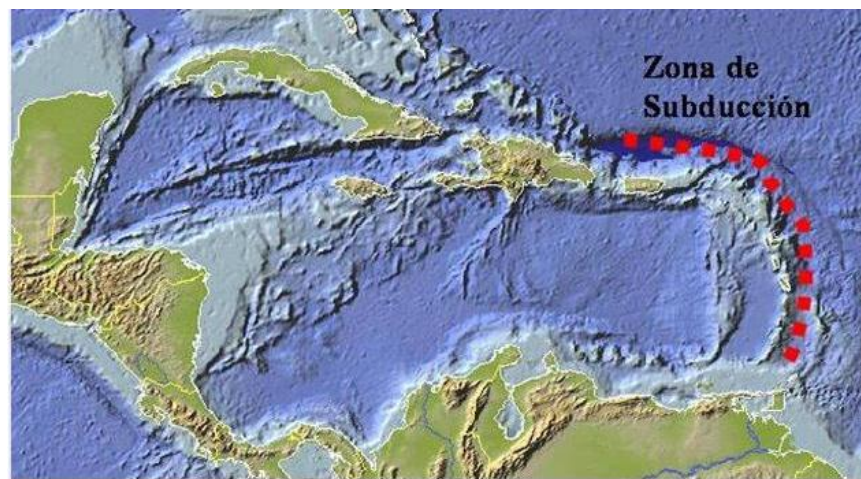
Las redes sísmicas pueden ser afectadas por los niveles de ruido y movimiento de sedimentos en el fondo marino, Sin embargo, la función principal es el envío y recepción de señales para identificar hipocentros.

Sin embargo Existen zonas de difícil caracterización como los son las zonas de muy baja frecuencia (VLF Very Low Frequency) que deben ser analizados por

métodos avanzados como Tomografías de velocidades sísmicas (Frontera, Olivera, Jara, & Goula, 2011).

La actividad sísmica en el Caribe colombiano es menor que en el Pacífico, debido principalmente a un movimiento entre placas más lento sin existir subducción, lo cual conlleva a que no se genere la energía suficiente que permita originar un sismo de gran escala que ocasione una ola tsunami. Esto conlleva a que la dinámica tectónica en la región colombiana del Caribe haga muy poco probable la ocurrencia de un tsunami en esta costa. Lo anterior no quiere decir que en la Cuenca del Mar Caribe no se produzcan tsunamis, pues las Antillas Menores tienen una amenaza bastante considerable al fenómeno, sin embargo ante un posible tsunami generado en el arco de las Antillas, la ubicación geográfica de Colombia haría que la propagación de la ola no afectase gravemente el litoral Caribe nacional (COMITÉ TÉCNICO TSUNAMI, 2012). Ver figura 98.

**FIGURA 98: Tectónica y sismicidad en el Caribe Colombiano.**



Fuente: Laboratorio Tsunami-Centro de Matemáticas Geofísicas y Computacionales de Novosibirsk-Rusia

### 4.3 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN FONDO MARINO

#### 4.3.1 Generalidades

Los riesgos geológicos en el fondo marino se pueden detectar básicamente por medio de estudios de batimetría, sísmica, y por medio de imágenes de vehículos submarinos (Artilés Pérez, Pérez Salazar, Gabilondo Márquez, Barrera Godines, & Hernández Valdés, 2005).

Los vehículos sumbmarinos mas usados son dos, los autónomos AUV (Autonomous underwater vehicles) y los remotos ROV (Remotely operated underwater vehicle) (Dupré, y otros, 2009).

- **ROV:** Son vehículos operados a control remoto que descienden de la superficie del mar para tomar fotografías o enviar señales por medio de ondas para y registrar la reflexión de estas para hacer análisis más detallados de una zona especifica, en la figura 99 se muestran algunos modelos que son usados en la actualidad. Algunos dispositivos de control remoto están unidos al barco de exploración y estudio por medio de cables por donde se envían señales y se hace fácil su recuperación en caso de fallas electrónicas (Crimmins & Manley, 2008), (Nautic Expo, 2012).

**FIGURA 99: Robots vehículos operados a control remoto.**



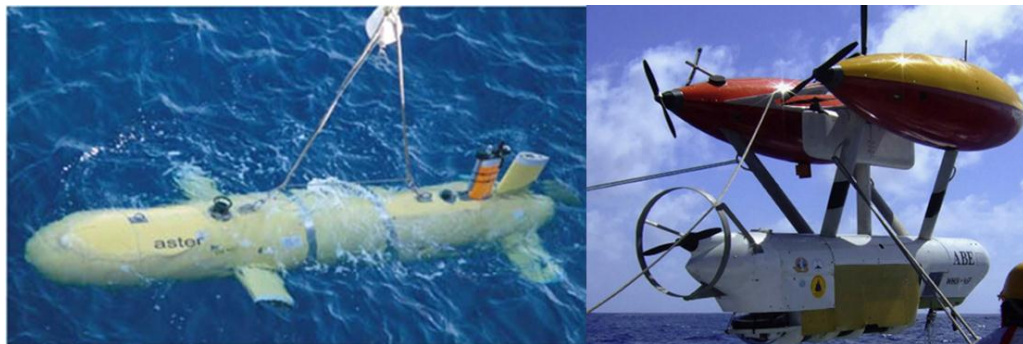
Fuente: (Nautic Expo, 2012)

- **AUV:** Son vehículos submarinos autónomos, usados para caracterizar una zona determinada en el fondo marino, estos vehículos pueden hacer estudios de reflexión sísmica o de barrido lateral, pero principalmente se usan al igual que los ROV para obtener imágenes de alta resolución del fondo marino.

Estos vehículos pueden ser teleoperados u programados para que ellos mismos se desplacen de forma independiente como vehículos inteligentes, generalmente constan de sistemas GPS, Unidades de navegación inercial, medidores de efecto doppler y amortiguadores de sonidos externos entre otros (Dupré, y otros, 2009), (Crimmins & Manley, 2008).

En la figura 100 se muestra un vehículo autónomo usado en una investigación del fondo marino en el Mar Mediterráneo al noroeste de Egipto, junto con otro diseño de vehículos autónomos (ECA, 2011).

**FIGURA 100: Robots vehículos operados a control remoto.**



Fuente: (Dupré, y otros, 2009, pág. 278) y (WHOI, 2006)

#### **4.3.2 Fallas Escarpadas**

La identificación de fallas escarpadas se detecta básicamente con el uso la batimetría que ha sido explicada en las secciones anteriores, además con el uso

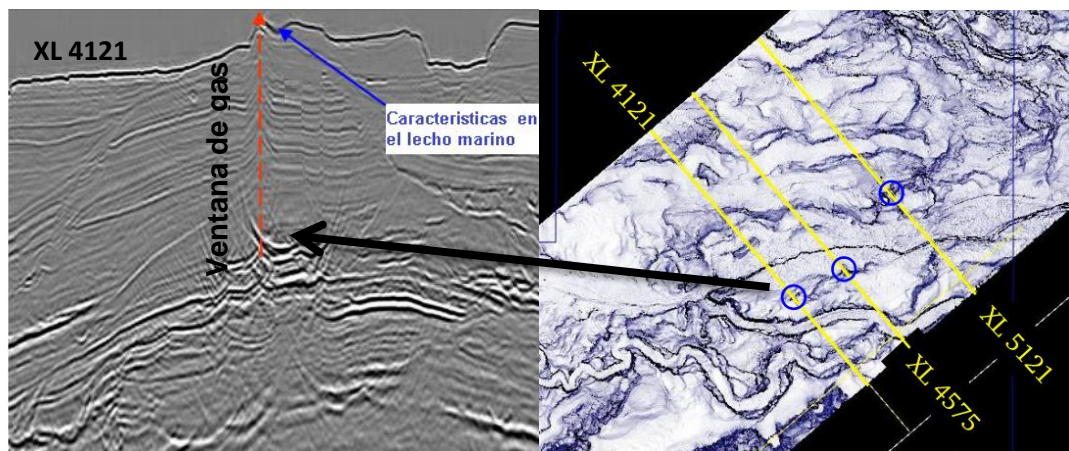
de perfiles de sísmica se detectan los mapas de nivel o de curvas de isoprofundidad; si embargo si se desea hacer una caracterización mas detallada se puede emplear vehículos submarinos ROV y AUV.

Es de mencionar que los escarpes de falla se generan por actividades asociadas al movimiento tectónicos y a procesos de diapirismo o plegamiento, por lo tanto es importante hacer una caracterización del área.

### 4.3.3 Ventanas de gas

Las ventanas de gas también están asociadas a los suelos gaseosos y a la disociación de hidratos de gas, estas ventanas de gas. La reflexión sísmica no representa la herramienta mas apropiada, puesto que los suelos gaseosos tienden a absorber la energía de las ondas y evita que estas se reflejen, pero la identificación por medio de ondas de corte no se ve muy afectada por el gas que se esta liberando de la superficie del lecho marino, por lo tanto esta técnica es la más usada y continuamente se esta perfeccionando (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

**FIGURA 101: Ventanas de gas y sedimentos enterrados en el Caribe colombiana.**

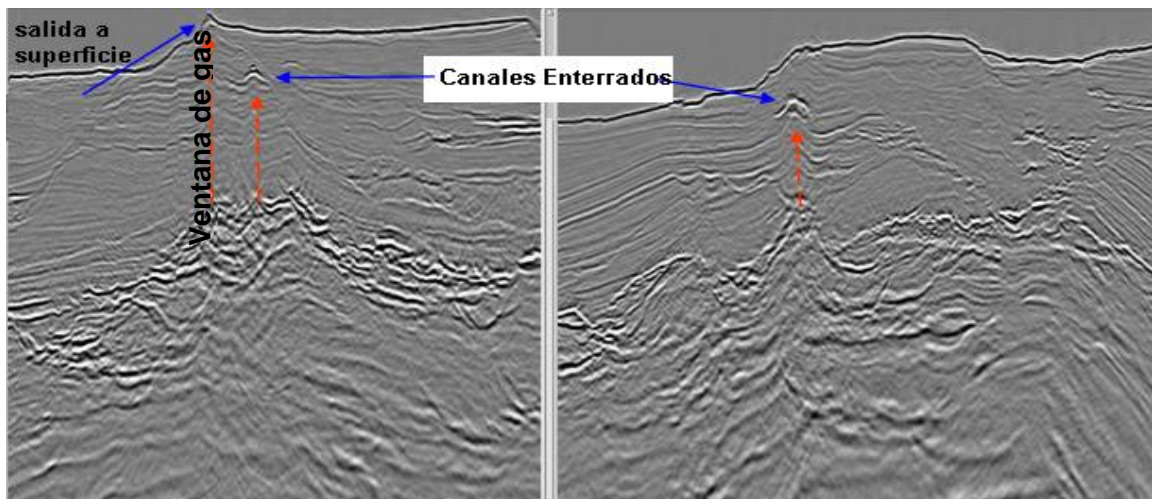


Fuente: ( Thomson, 2010, pág. 18 y 19)

En el Caribe colombiano un estudio realizado por BP en 2010 muestra en secciones sísmicas donde se destaca la presencia de un ventana de gas asociada a una salida de gas desde estratos mas profundos, en la parte izquierda de la figura 101 se muestra la disposición de los estratos del subsuelo y le camino de salida del fluido, en la derecha unas marcas características en el perfil sísmico, los otros dos puntos señalados corresponden a ventanas de gas y canales enterrados que están sometidos a presión, pero que los fluidos no han salido a superficie como se indica en la figura 102.

Otra herramienta muy usada es la sísmica 3D, que se usa principalmente para estratos del subsuelo, pero las ventanas de gas se originan en el subsuelo solo que a nivel muy somero; Los ROV y AUV también comprenden una herramienta que se puede utilizar para identificar suelos gaseosos y ventanas de gas.

**FIGURA 102: ventanas de gas y canales enterrados en el Caribe colombiana.**



Fuente: ( Thomson, 2010, pág. 19)

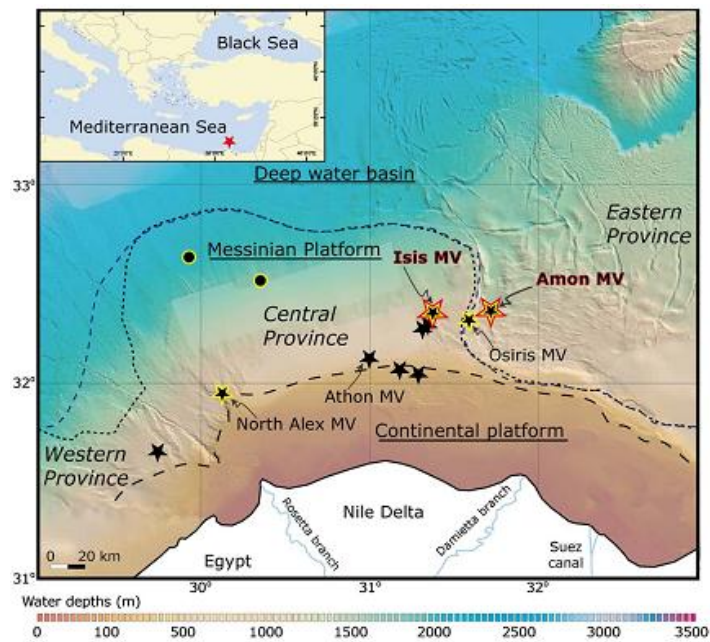
#### 4.3.4 Volcanes de lodo

Los volcanes de lodo se caracterizan y encuentran por medio de sísmica, batimetría, herramientas multihaz, sonar de barrido lateral y más detalladamente con vehículos submarinos.

En una investigación realizada en el mar Mediterráneo al noroeste de Egipto para caracterizar dos volcanes de lodo se usaron vehículos submarinos, después de haber hecho una batimetría básica con mapas batimétricos e identificación del fondo marino en forma básica, en la figura 103 se muestra el área de estudio.

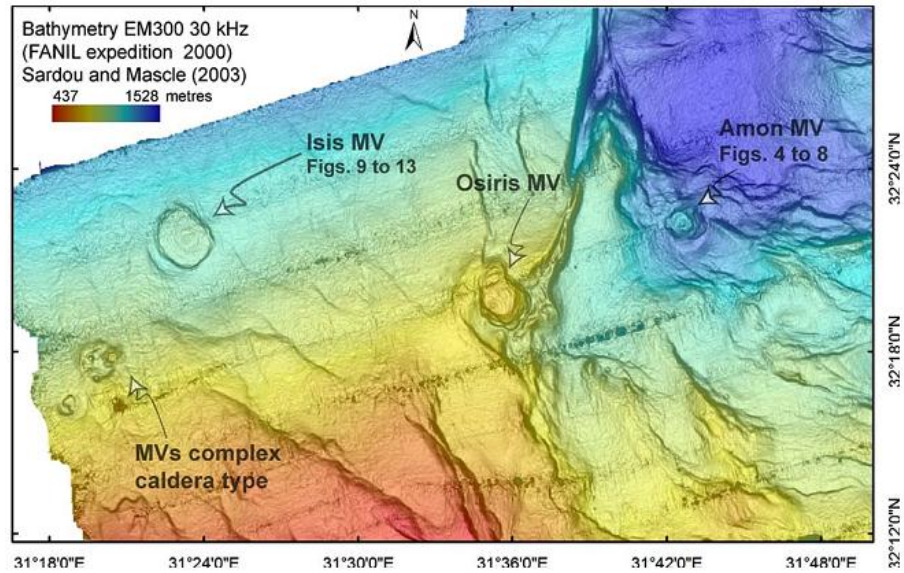
Las estrellas negras bordeadas de amarillo y finalmente con rojo son las áreas de estudio, donde se necesita una información más detallada la cual se realiza con vehículos submarinos AUV y ROV mediante una expedición desarrollada en 2006 que se denominó BIONII.

**FIGURA 103: Volcanes de Lodo Isis y Amon en el Mar Mediterráneo.**



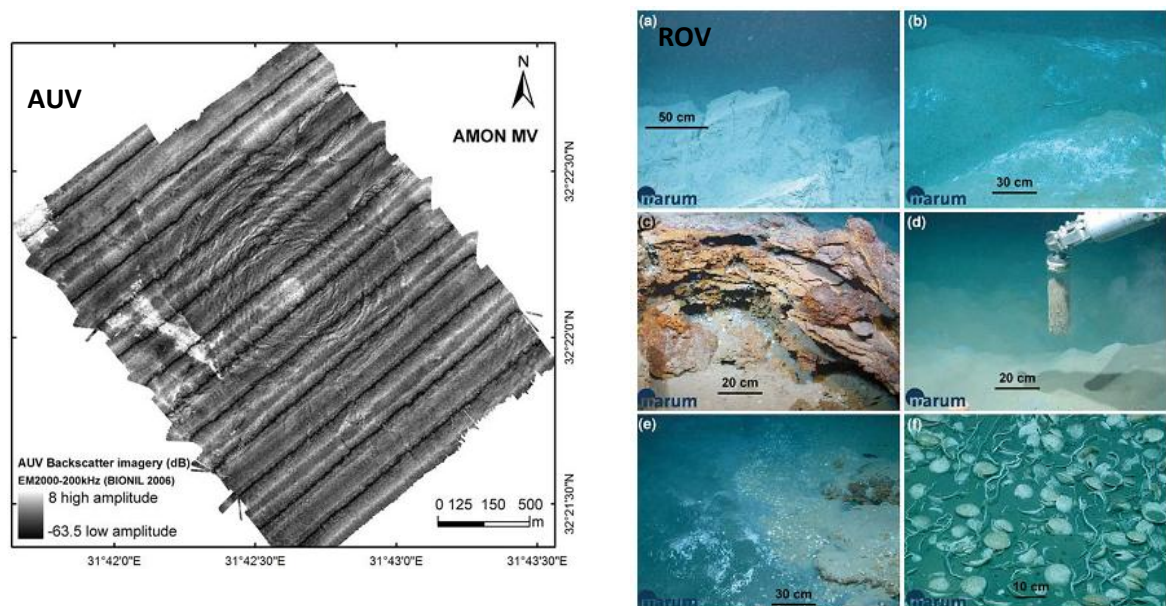
Fuente: (Dupré, y otros, 2009, pág. 277).

**FIGURA 104: Batimetría de detallada de Volcanes de Lodo Isis y Amon en el Mar Mediterráneo.**



Fuente: (Dupré, y otros, 2009, pág. 278).

**FIGURA 105: Imágenes del volcán de lodo Amón por AUV y ROV.**

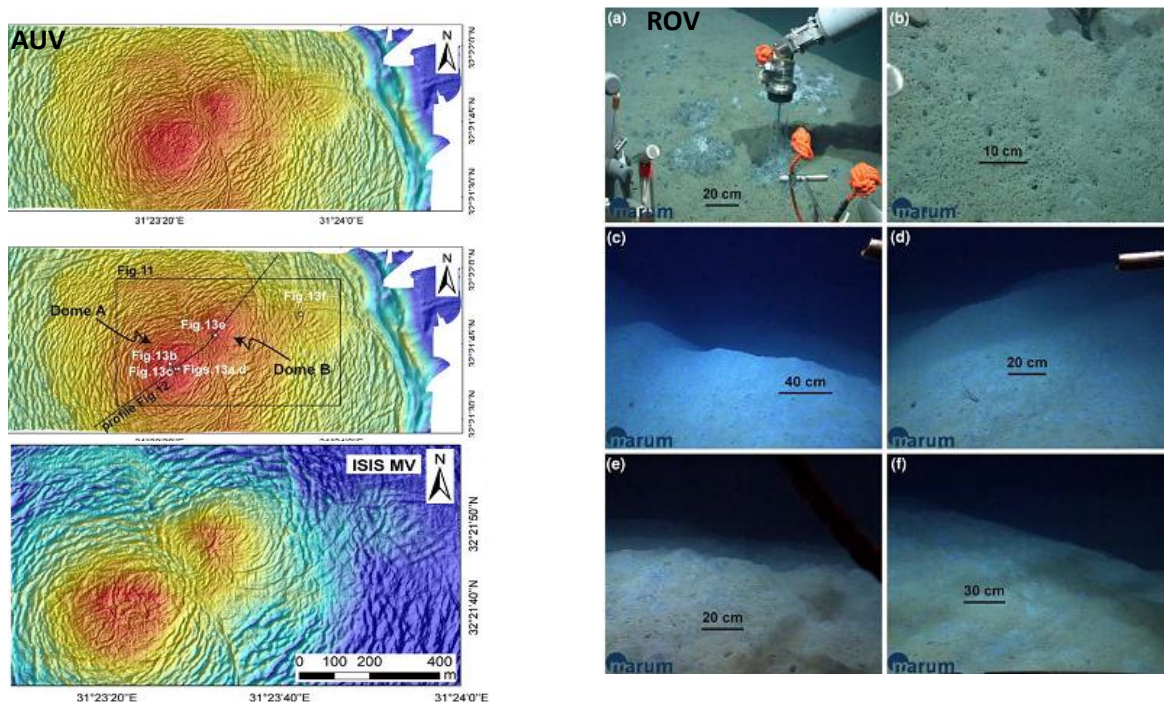


Fuente: (Dupré, y otros, 2009, pág. 280 y 283)

En las figuras 104 y 105 se muestra la caracterización del area de forma detallada, información extrraida de estudios previos de batimetria donde se determino la geomorfologia del lugar y además se se establece las areas de estudio por medio de registros de profundidad y coordenadas geograficas (Dupré, y otros, 2009).

Una vez se tiene esta información se procede a tomar información de cerca de cada uno de los volcanes, primero con el vehiculo automatico AUV y posteriormente con el vehiculo a contro remoto ROV, el primero da una información de la geomorfologia de la zona y el segundo se envia para tomar fotografias de alta resolución, en la figura 105 se muestra en la parte derecha la información obtenida del AUV y a la derecha las fotografias del ROV para el volcan de lodo Amon y la figura 106 de la misma forma, solo que para el volcan Isis (Dupré, y otros, 2009).

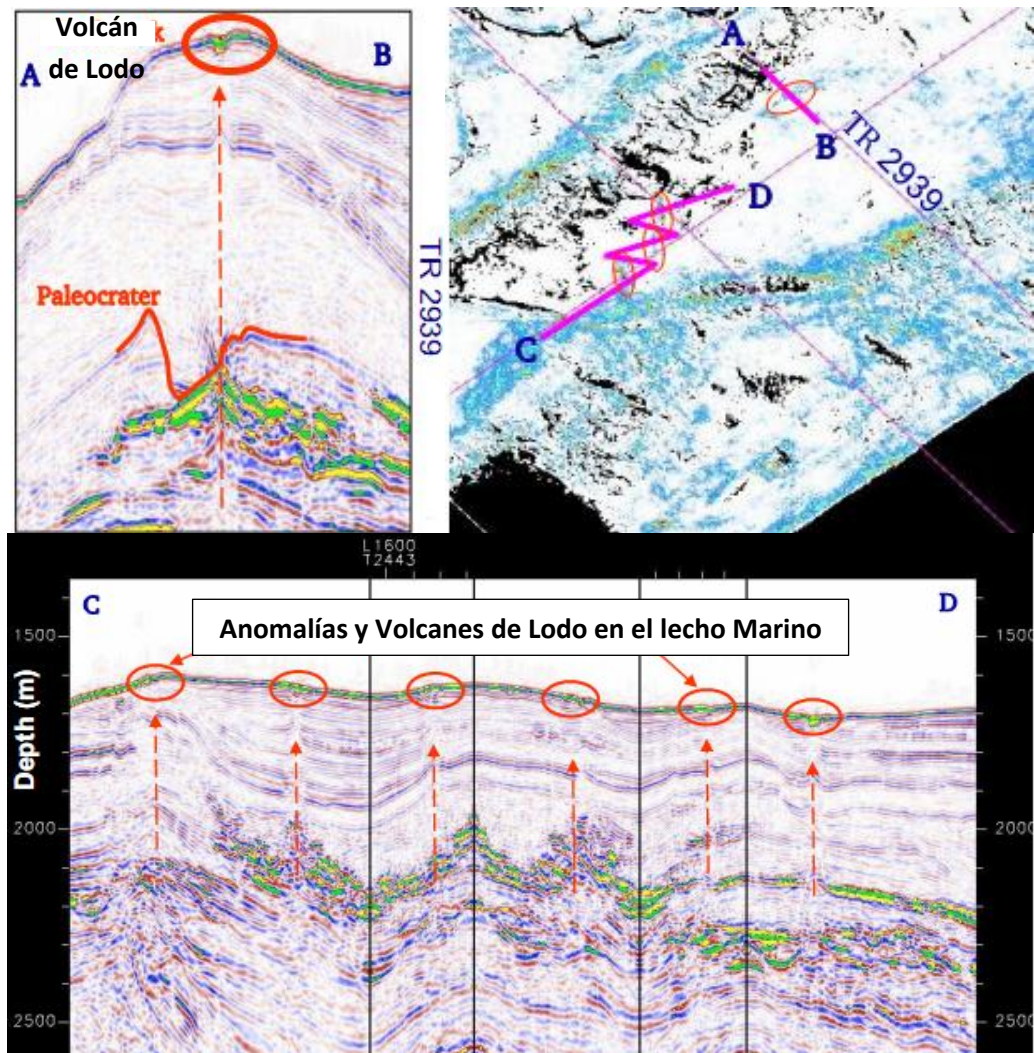
**FIGURA 106: Imágenes del volcán de lodo Isis por AUV y ROV.**



Fuente: (Dupré, y otros, 2009, págs. 284-286).

En el Caribe colombiano tambien se detectaron algunos volcanes de lodo mediante analisis sismicos y sonar de barrido lateral (MBS) realizado en 2010 por BP, En la figura 107 se muestran areas de expulsión de fluidos, anomalias de gas somero y el origen de algunas secciones someras ( Thomson, 2010).

**FIGURA 107: Volcanes de lodo en el Caribe Colombiano mediante sísmica.**



Fuente: ( Thomson, 2010, pág. 20)

En el Mar Caspio es un lugar donde se han detectado más volcanes de lodo, un estudio de riesgos geológicos realizado cerca de las costas de Turkmenistán logro caracterizar por medio varios volcanes de lodo y su formación desde los estratos mas profundos mediante el análisis de sísmica 3D y 2D de alta resolución.

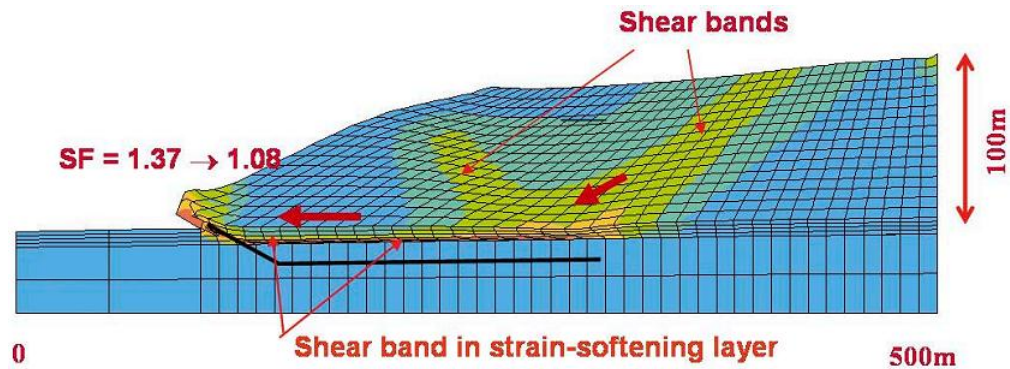
#### **4.3.5 Inestabilidad de Taludes**

La inestabilidad de taludes se identifica mediante sísmica de alta resolución, 2D, 3D, multihaz, Sonar de barrido lateral, Por otro lado se puede identificar mediante analisis de anisotropia de esfuerzos en laboratorio de muestras tomadas del lecho marino teniendo en cuenta las fuerzas que las fuerzas de compresión generalmente son mayores que las de extension. Además la anisotropia generalmente es mayor en las arcillas o sedimentos finos de baja plasticidad.

Es importante tener en cuenta que la inestabilidad de taludes generalmente es evaluada despues de identificar la geomorfologia del lecho marino mediante analisis de muestras de lecho marino y a profundidades someras, en cuanto a presión de poro y configuración de esfuerzos, sin embargo la inestabilidad de pendientes tambien es dada por terremotos siendo mas dificil su caracterización (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

La estabilidad de pendientes tambien puede ser determinada mediante elaboración de modelos usando metodos numericos y herramientas de simulación como se observa en la figura 108 donde se simula la estabilidad de pendientes y los deslizamientos que se pueden dar en el lecho marino de acuerdo a las consideracions del modelo.

**FIGURA 108: Modelo numerico de simulación de estabilidad de pendiente y deslizamientos en el fondo marino.**



Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009, pág. 22)

La inestabilidad de taludes esta asociada a la inclinación de las pendientes ademas de otros fenomenos de transporte como avalanchas de flujo, flujo de turbiditas, caída de bloques, deslizamiento rotacional de bloques y los escarpes de falla estos fenomenos pueden ser identificados mediante perfiles sismicos de alta resolución del subsuelo como se indica en la figura 109.

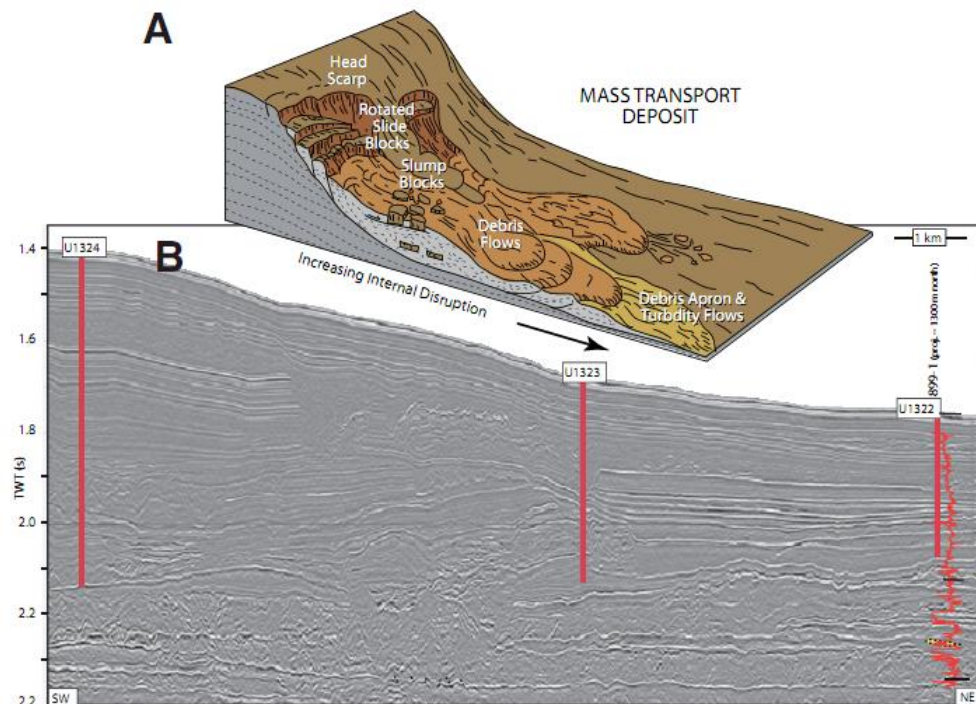
La figura 109 es una representación de la interpretación sismica de acuerdo a la disposición de los estratos litologicos subterranos que sugieren deslizamientos y transportes de masa que una vez se dieron los mecanismos de activación se desplazaron por la pensiente existente (Morgan, y otros, 2009).

#### **4.3.6 Avalanchas**

Las avalanchas y deslizamientos de fondo marino se detectan por medio de batimetria y sismica al igual que la inestabilidad de pendientes y estan muy asociados, La diferencia es que para determinar las avalanchas se necesita de

mayor detalle, por lo tanto la resolución vertical, resoluciones verticales y precisión del posicionamiento deben ser mayores.

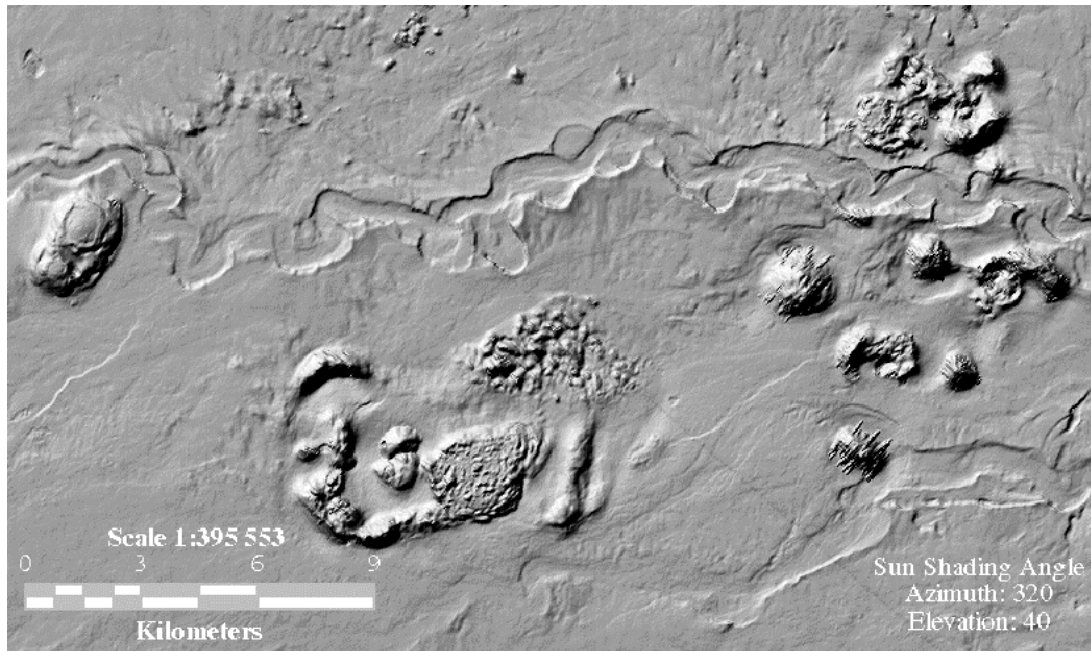
**FIGURA 109: Mapa esquemático de de depósitos y transporte de masas e identificación por medio de sísmica en el Golfo de México.**



Fuente: (Morgan, y otros, 2009, pág. 16)

En la figura 110 se muestra la geomorfología marina obtenida de estudios batimétricos usando reflexión sísmica 3D y Sonar de barrido lateral. El estudio fue realizado en las costas de Trinidad, en la imagen se observa un canal que se desplaza hacia la parte alta de la figura, esto se da gracias a procesos de diapirismo que se observan en la parte baja de la figura 110 que generan el deslizamiento de los sedimentos.

**FIGURA 110: Deslizamiento de sedimentos que generan avalanchas, en las costas  
Trinidad.**



Fuente: (Rutledge & Leonard, 2001, pág. 7).

Tanto para avalanchas como para los demás fenómenos de deslizamientos y movimiento de sedimentos que se presentan ahora y que se pueden presentar se usan básicamente distintos métodos de identificación modernos. Estos grupos de herramientas tecnológicas se pueden dividir en tres grupos que son: en primer lugar, los métodos de muestreo no destructivos y técnicas de imagen, en segundo lugar, toma de muestras in situ y pruebas de penetración y por último el uso de vehículos operados a control remoto y plataformas especiales en fondo marino entre otras herramientas utilizadas.

Los métodos no destructivos y técnicas de imagen comprenden: navegación de barcos (sistemas de posicionamiento global GPS, Radio de Posicionamiento y transpondedores acústicos de fondo marino), mapas batimétricos (Ecosondas monohaz y Ecosondas multihaz), mapas de retrodispersión (Sonar de barrido

lateral y algo de Ecosondas multihaz), imágenes del subsuelo (perfiles de sísmica del subsuelo y perfiles de continuidad de sísmica 3D).

Dentro del muestreo in situ y pruebas de penetración se encuentra: el muestreo de cubeta y los corazones de sedimentos (muestreador de gravedad, muestreador de cajas, muestreador de pistón, muestreador a percusión, muestreador vibratorio y multimuestreador); En estas pruebas también se suelen hacer no solo mediciones directas de las propiedades de las rocas sino que también se hacen monitoreos a largo plazo y el uso de medir las propiedades de las rocas de forma más efectiva y así poder determinar los esfuerzos de corte, la resistencia del suelo, la incidencia de los terremotos o movimientos telúricos en el área y las presiones de poro de la formación a profundidades someras.

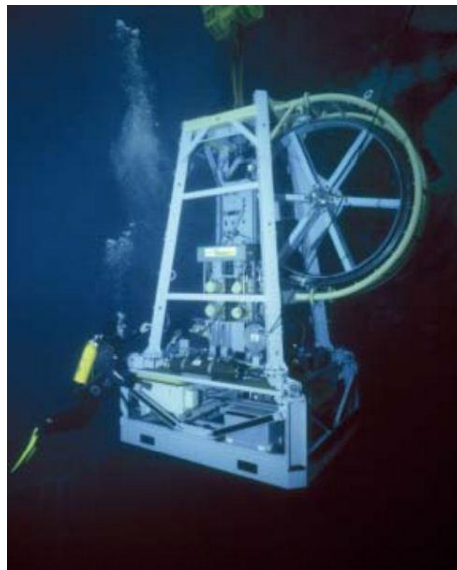
Los vehículos operados a control remoto ROV se han convertido en valiosas herramientas para decifrar y detallar el fondo del mar, además de tomar las fotografías algunos vehículos operados a control remoto se usan para arrancar los muestreadores de fondo, así como para recoger las muestras del fondo marino y llevarlas a superficie.

Otra herramienta que se ha venido utilizando en las investigaciones del fondo marino en cuanto a inestabilidades de pendientes, deslizamiento de sedimentos y avalanchas son los vehículos autónomos AUV, estos vehículos pueden recolectar información del fondo del mar, tomar muestras del suelo y conducir estudios. Los AUV no usan cable como lo hacen los ROV, por ser una herramienta autónoma que ha sido utilizada para tareas previamente asignadas. Sin embargo, los ROV obtienen muestras de mayor calidad y las fotografías son de mayor resolución.

Las plataformas en fondo marino, son herramientas comúnmente usadas usadas en búsquedas submarinas y para ayudar con el muestreo que se realizan en fondo marino. Esta plataforma está equipada con instrumentos necesarios para realizar pruebas de penetración para determinar las características del suelo, dentro de los parámetros calculados está presión de poro, resistencia de corte y densidad

relativa. Para la posición de la unidad en el fondo marino, un sistema de poleas adherido a un marco ayuda a bajar y situar la plataforma. Una vez en funcionamiento, el sistema puede realizar las pruebas necesarias en la investigación de suelos ver figura 111.

**FIGURA 111: Deslizamiento de sedimentos que generan avalanchas, en las costas Trinidad.**



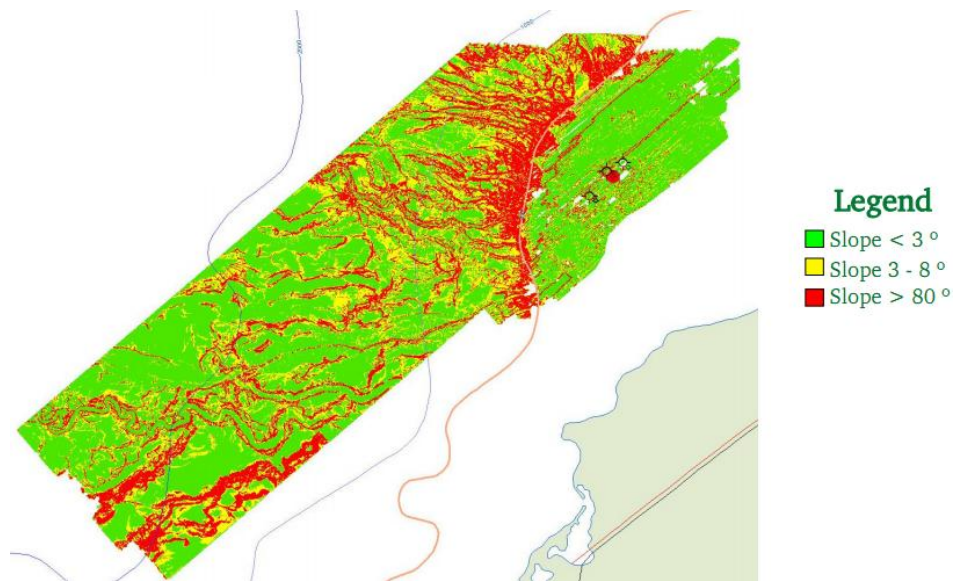
Fuente: (Sheahan & DeGroot, 2009, pág. 82).

En la figura 112 se muestra la distribución de pendientes en el bloque RC4 ubicado en la costa Caribe colombiana donde se muestra la proporción del lecho marnio que presenta mayores depresiones o donde es estable, en esta se puede observar que la mayoría del lecho marino presenta pendientes menores a 3 grados de inclinación.

Los deslizamientos generan dificultades operativas para el desarrollo de operaciones, por lo tanto es importante determinar el grado de inclinación de la

plataforma, pues las limitaciones en dichas operaciones son despreciables para pendientes menores a 3° de inclinación, moderadas entre 3° y 80° y altas cuando la pendiente es mayor a 90°.

**FIGURA 112: Distribución de pendientes en el Mar Caribe Colombiano.**



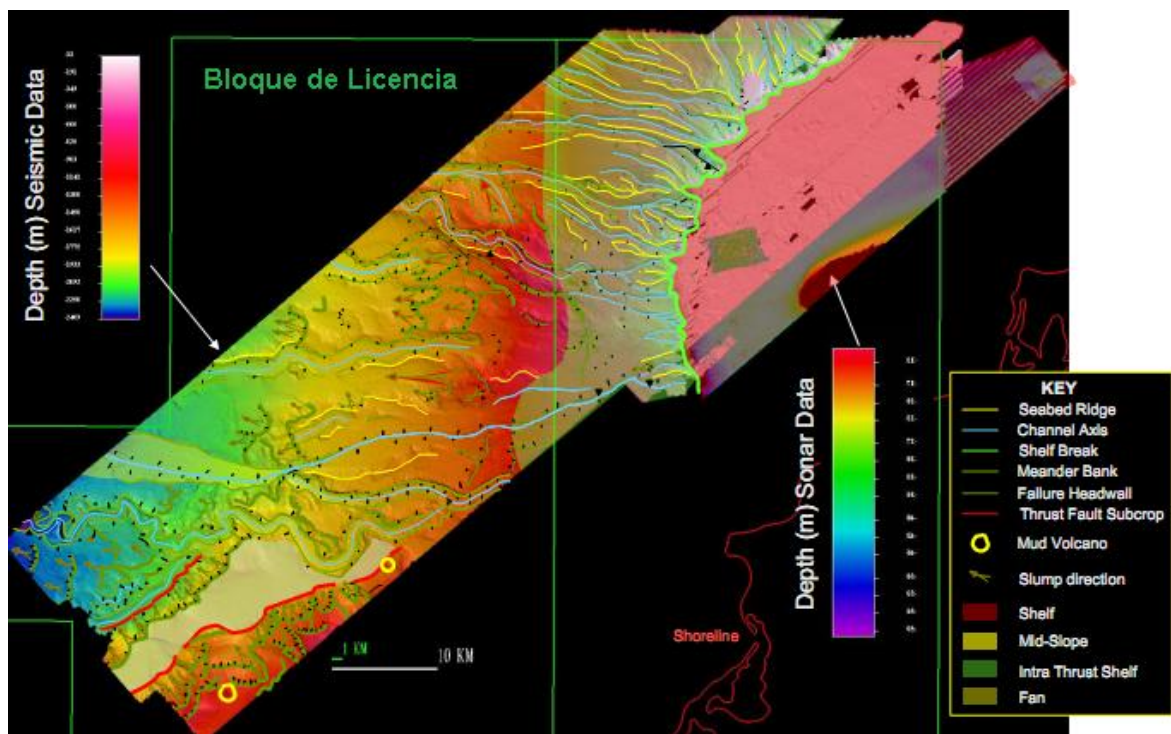
Fuente: ( Thomson, 2010, pág. 6).

#### **4.3.7 Otros**

Existen otros riesgos geológicos someros además de los mencionados anteriormente, pero de igual forma se pueden determinar mediante análisis de estudios de batimetría integrados, donde reúnan desde los mapas de isoprofundidad hasta fotografías de alta resolución pasando por sísmica alta resolución que determine la disposición de los estratos a profundidades someras de que ayuden a determinar los principales mecanismos de activación de movimientos de sedimentos o bloques y salida de fluidos del subsuelo.

En la figura 113 se muestra la geomorfología marina del bloque RC4 ubicado en la el Mar Caribe Colombiano, en esta imagen se pueden observar dos volcanes de lodo señalados con círculos amarillos, crestas en el lecho marino (líneas amarillas), canales (línea azul), taludes (línea verde claro), meandros de abanicos (línea verde estándar), bordes de los canales (líneas verde oscuro), ejes de pequeñas fallas (líneas rojas), dirección de deslizamientos (flechas roja-verde), plataforma (color vino tinto), inclinación media (color amarillo), abanico (verde oliva).

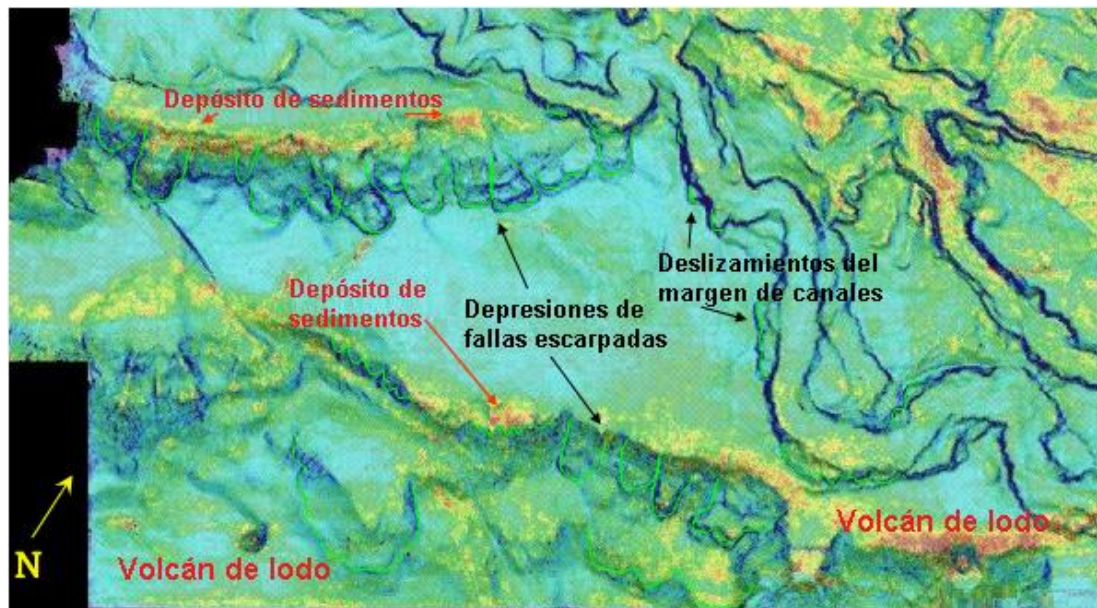
**FIGURA 113: Elementos geomorfologicos en el bloque RC4 del Mar Caribe Colombiano.**



Fuente: ( Thomson, 2010, pág. 13).

En la costa Caribe colombiana se encuentran muchos riesgos en el lecho marino, pero ninguno de ellos lo representa en mayor escala, sin embargo el movimiento se esta dando continuamente a través de los distintos canales y fallas escarpadas que se presentan, también se lograron identificar dos volcanes de lodo en un área pequeña lo que hace pensar que se pueden encontrar otro tipo de volcanes cerca, además esto indica la presencia de zonas de alta presión en los estratos litológicos a pocas profundidades. La figura 114 muestra un mapa con la geomorfología detallada de la zona RC4 del Caribe colombiano, allí se observan básicamente canales en el lecho marino, escarpes de falla, zonas de acumulación de sedimentos y los volcanes de lodo.

**FIGURA 114: Mapa de pendientes y del fondo marino bloque RC4 Caribe Colomniano.**



Fuente: Modificada de ( Thomson, 2010, pág. 11).

## **4.4 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS A PROFUNDIDADES SOMERAS**

### **4.4.1 Generalidades**

Los métodos de identificación de riesgos geológicos someros o riesgos geológicos que se encuentran a poca profundidad del lecho marino se determinan básicamente por medio de estudios de núcleos, análisis de registros eléctricos, acústicos, de densidad y resistividad, y demás registros de perforación de pozos en campos cercanos si existen; la reflexión sísmica 2D de alta resolución, 3D y 4D, además del análisis de patrones anómalos de reflexión asociados al fondo BSR (Artiles Pérez, Pérez Salazar, Gabilondo Márquez, Barrera Godines, & Hernández Valdés, 2005), (Wardlaw & Salisbury, 2010).

La figura 115 corresponde al proceso de adquisición sísmica 3D de alta resolución, que es una de las mejores herramientas para caracterizar riesgos geológicos someros y anomalías de sobrepresión, por que posee una resolución vertical de menos 3 metros y puede alcanzar profundidades de hasta 1500 metros, lo que permite determinar la disposición de los estratos e identificar riesgos geológicos a nivel somero (Wardlaw & Salisbury, 2010).

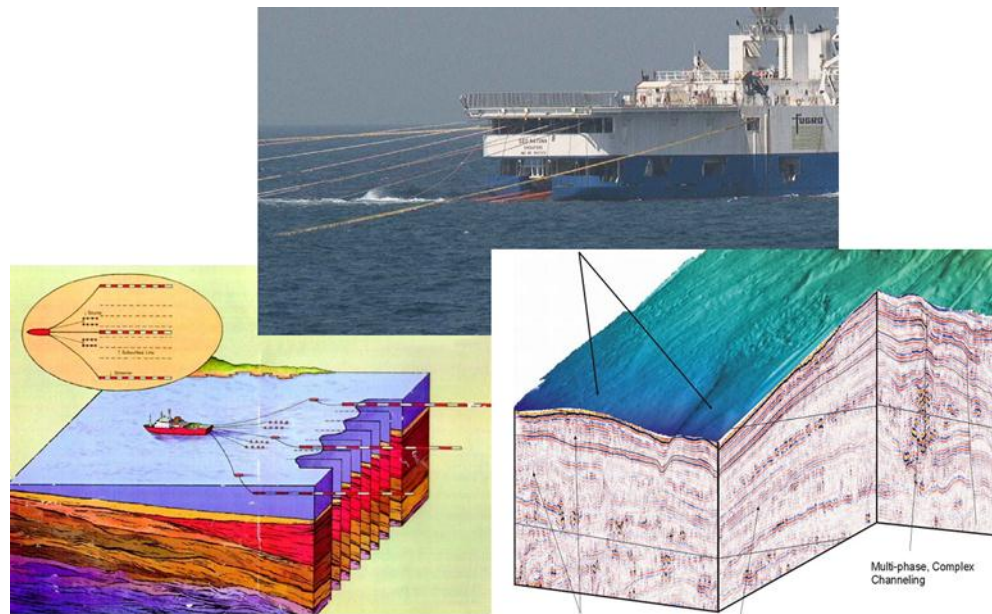
### **4.4.2 Hidratos de Gas**

La identificación de hidratos de gas se da básicamente mediante el análisis de registros de resistividad, densidad y sónico además de sísmica de alta resolución y reflexión sísmica para determinar la base de los hidratos a través de la base de la zona de estabilidad de hidratos (GHSZ).

Los BSR son anomalías presentadas en la reflexión sísmica, por el cambio en la impedancia acústica debido a la disminución en la velocidad del sonido, que es causada por la presencia de gases en la zona de estabilidad de hidratos, El BSR además indica la base de la zona de estabilidad de hidratos, pues es la zona de transición entre el gas hidrato y el gas libre. La línea de BSR se identifica básicamente por que imita la forma del mar, se pueden hacer cortes estratigráficos

transversales y tiene una polaridad opuesta a la polaridad del fondo oceánico (López & Ojeda Y, 2006).

**FIGURA 115: Sísmica 3D para caracterizar el lecho marino y el subsuelo.**

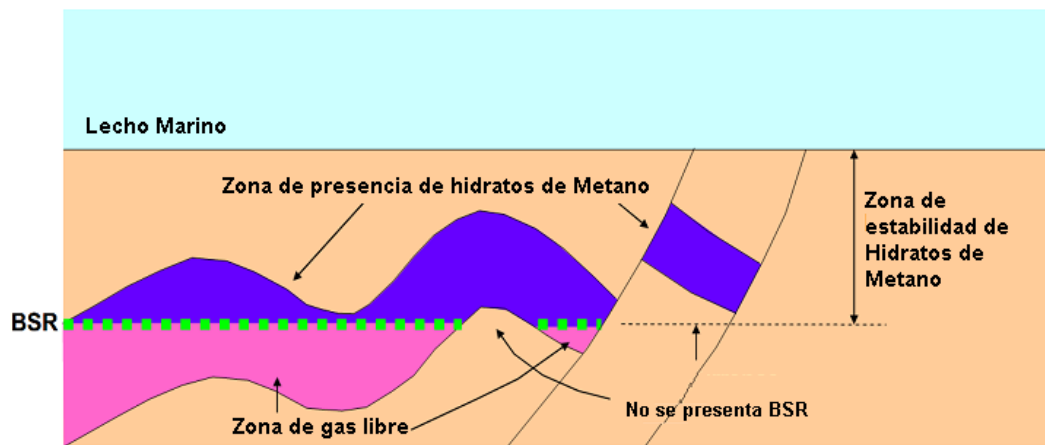


Fuente: (Wardlaw & Salisbury, 2010, pág. 5).

La figura 116 muestra una representación grafica de como se puede caracterizar los hidratos de gas y de la necesidad del uso de sísmica para poder caracterizar las zonas de estabilidad de hidratos, pues la línea de BSR solo marca la base de los hidratos de gas pero pueden aparecer discontinuidades debido a fallas que impiden determinar el espacio ocupado por la zona de hidratos o la zona de estabilidad de hidratos. Sin embargo, la existencia de una anomalía en la reflexión acústica o existencia de línea BSR no indica la existencia neta de hidratos de gas, El hidrato de gas se puede encontrar como cemento de los sedimentos y esto afecta en gen medida la velocidad de las ondas P y de las ondas S, lo que puede llevar a errores, por lo tanto, es importante corroborar con registros de resistividad

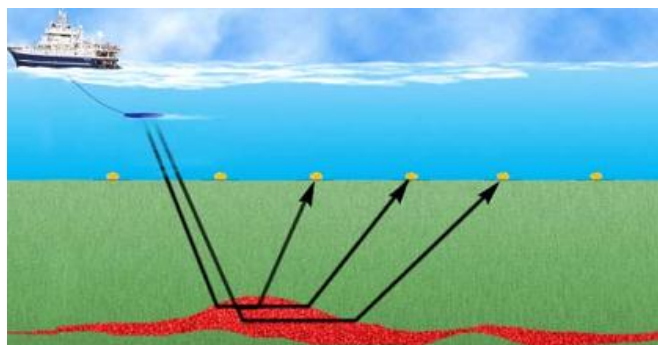
y sónico, y con análisis de muestras en laboratorio (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009), (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011).

**FIGURA 116: Representación gráfica de la zona de estabilidad de hidratos de gas y la relación con el BSR.**



Fuente: Modificada de (Saeki, y otros, 2008, pág. 2)

**FIGURA 117: Identificación de hidratos de gas mediante registros de lecho marino usando reflexión de ondas electromagnéticas.**



Fuente: (NGI-OffshoreGeohazards, 2005, pág. 36).

Una vez se tenga información de la posible zona de hidratos de gas se pueden hacer estudios por medio de ondas electromagnéticas mediante registros de fondo marino (Sea Bed Logging SBL) que ayuden a determinar la resistividad de los estratos mediante mapas de resistividad del subsuelo, y así poder identificar el espacio ocupado por los hidratos (NGI-OffshoreGeohazards, 2005), ver figura 117.

Los hidratos de gas poseen propiedades que se pueden medir e identificar por medio de registros de resistividad, densidad, porosidad y velocidad de las ondas P, en la tabla 9 se indica las propiedades con las cuales se pueden identificar mediante el análisis de registros (Digby, 2005).

**TABLA 9: Propiedades aproximadas de los hidratos de gas.**

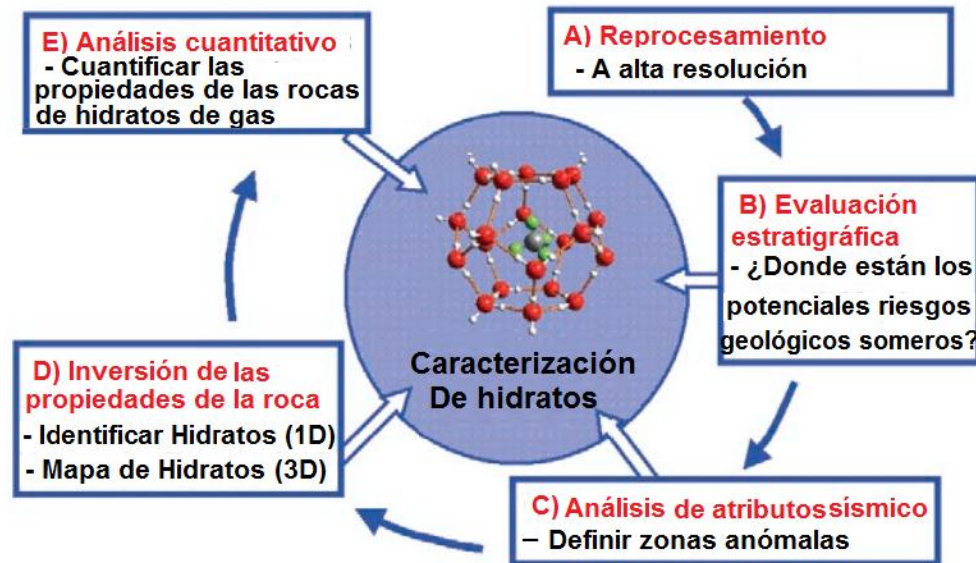
TIPO DE REGISTRO	PROPIEDAD
<b>Densidad</b>	Entre 0,988 y 1,055 g/cc o ligeramente menor.
<b>Calliper</b>	Generalmente irregular y de gran tamaño
<b>Resistividad</b>	Entre 155 0 185 $\Omega$ /m o mayor.
<b>Velocidad de Ondas P</b>	Mayor a 3,690 m/s.
<b>Porosidad-Neutron</b>	Ligeramente alto alrededor del 67%

Fuente: (Digby, 2005, pág. 884) y otros.

En el Mar Caribe Colombiano es evidente la existencia de hidratos de gas, pues ha sido confirmado por varios estudios publicados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos y el Instituto Colombiano del Petróleo además de otras investigaciones realizadas (Guzmán, 2011), (López & Ojeda Y, 2006).

Algunas metodologías como la desarrollada por Schlumberger para la identificación de hidratos de gas integran los datos sísmicos en cinco pasos en el flujo de trabajo para definir y cuantificar los hidratos de gas. La metodología integra la interpretación geológica, procesamiento sísmico, inversión sísmica, y modelamiento petrofísico para asegurar la existencia y cuantificar los hidratos de gas.

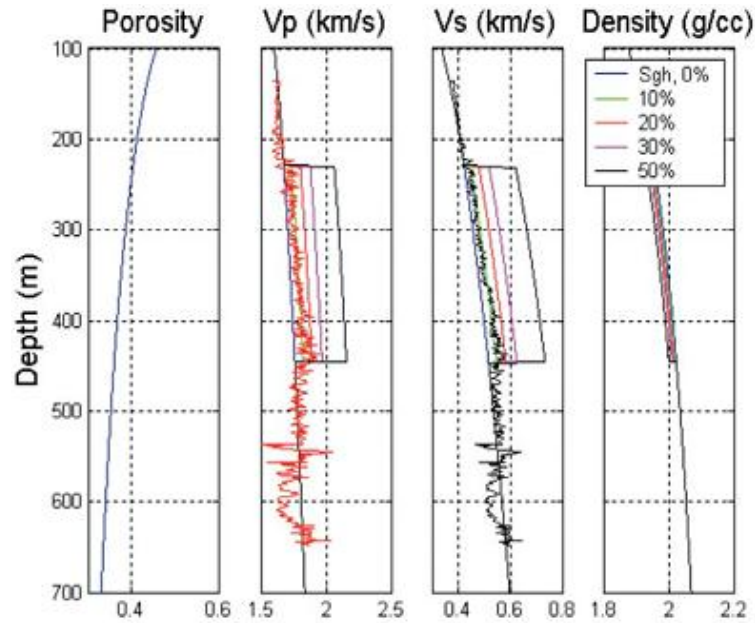
**FIGURA 118: Modelamiento y análisis de hidratos de gas: los 5 pasos del proceso.**



Fuente: (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004, pág. 60).

La figura 118 muestra la metodología planteada en 2004 por Dai et al y Xu et al, donde se comienza con un reprocesamiento convencional de datos de sísmica 3D de alta resolución usando amplitud y preservando el flujo de migración antes del apilamiento. Posteriormente se hace una evaluación estratigráfica detallada para identificar las potenciales zonas de hidratos. En tercer lugar se hace un análisis de atributos sísmico para definir con mayor precisión las zonas anómalas. El cuarto paso consiste en una inversión total de inversión de forma de onda antes del apilamiento (PSWI) para caracterizar las propiedades acústicas de los hidratos de gas en 1D y un mapa en 3D usando técnicas de inversión de híbridos. Por ultimo se hace una estimación cuantitativa de la saturación de hidratos de gas con inversión sísmica y modelamiento físico de las rocas (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004), (Dai & Dutta, 2007).

**FIGURA 119: Análisis de registros en la identificación de hidratos de gas.**



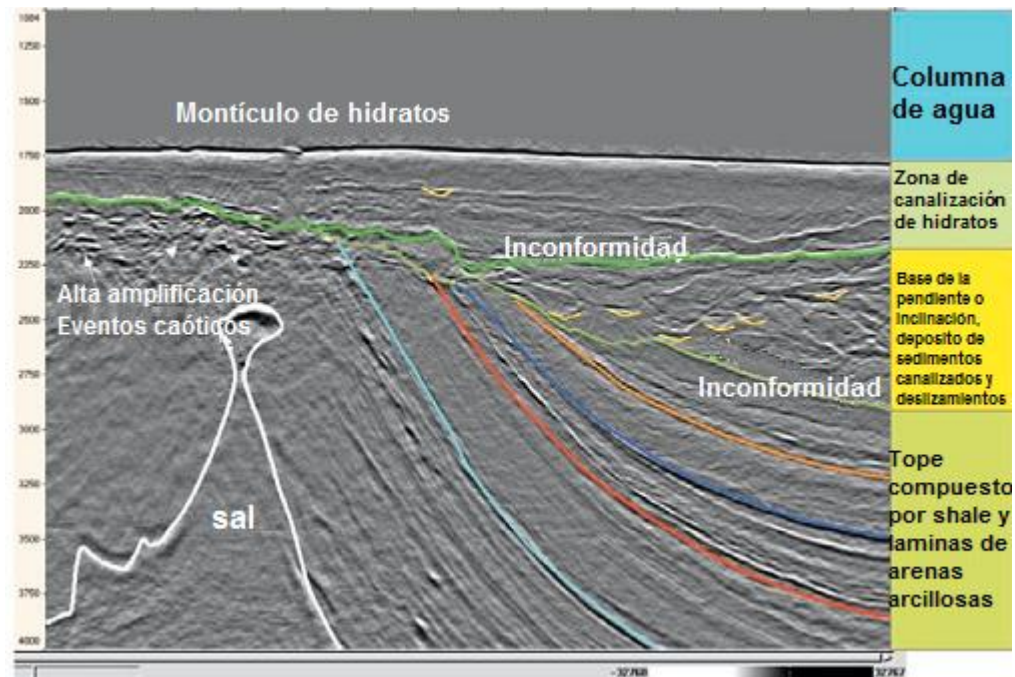
Fuente: (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004, pág. 63).

En la figura 119 se observan cuatro tipos de registros usados para la identificación de hidratos de gas, registros de porosidad, densidad, y velocidades de las ondas P y las ondas S.

En la figura 120 se muestra como se identifican las posibles zonas con presencia de hidratos de gas mediante el análisis de secciones sísmicas y teniendo en cuenta las secciones estratigráficas.

El análisis cuantitativo de los hidratos de gas en ausencia de datos de perforación se realiza por medio de procedimientos que integren la inversión de las propiedades elásticas de las rocas, el modelamiento físico de las rocas, un análisis cuantitativo de la saturación de los hidratos de gas (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004).

**FIGURA 120: Sección sísmica que muestra montículos de hidratos de gas en un análisis de estratigrafía general.**



Fuente: (Dai, Xu, Snyder, & Dutta, 2004, pág. 61).

#### **4.4.3 Shallow Water Flow (SWF)**

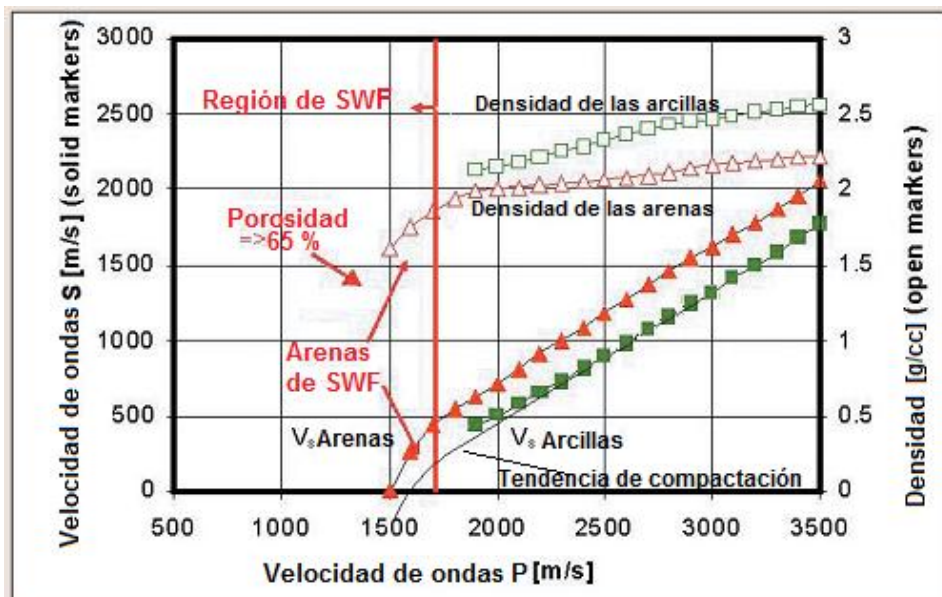
Los SWF por ser flujos de aguas someros se necesita de una análisis sísmico de alta resolución y otras pruebas relacionadas a las propiedades elásticas de las rocas y las velocidades de las ondas P y las Ondas S, pues las zonas con presencia de SWF tienen unas características propias que las hacen diferentes al resto de los estratos someros.

Las mediciones in situ de las elasticidad y otras propiedades de las rocas es limitada debido a que las capas de SWF están asociadas a velocidades sísmicas muy bajas, la medición de velocidades tan bajas es difícil para pozos entubados

por limitaciones de las herramientas de registros y por otro lado el registro a pozo abierto es peligroso si existe SWF por las condiciones de presión. Por lo tanto la identificación se basa generalmente en determinar la elasticidad de las arenas de SWF a partir de la tendencia de elasticidad de arenas y lutitas cercanas a la zona de SWF.

Estudios realizados por Huffman y Castagna (2001) y Zimmer et al. (2002) Examinaron las propiedades de la roca en sedimentos de SWF basados en mediciones de laboratorio, ellos encontraron que las regiones donde se encuentran los flujos de agua somera los sedimentos se caracterizaban por tener bajas densidades y bajas velocidades de las ondas P y ondas S; Por otro lado al aumentar presión, los sedimentos pierden cohesión causando una disminución mayor en la velocidad de las ondas P que las ondas S, algo típico de los sedimentos de SWF sobrepresionados (Subhashis & DUTta, 2002).

**FIGURA 121: Propiedades elásticas de las arenas y arcillas y la región típica de sedimentos en la zona de SWF.**



Fuente: (Subhashis & DUTta, 2002, pág. 675).

En la figura 121 se muestra las propiedades elásticas de las arenas y arcillas, en la grafica se observa la región típica donde se encuentran los sedimentos de SWF que se encuentran caracterizados por bajas densidades y bajas velocidades de las ondas P y las ondas S. Además de la grafica se puede deducir que la relación de  $V_p/V_s$  y el Coeficiente de Poisson son altos para la región de SWF, lo que indica que existe pobre contacto entre los granos y por ende baja compactación (Subhashis & DUTta, 2002).

La interpretación de datos sísmicos es clave para detectar la presencia de SWF antes de perforar, y existen varios métodos sísmicos para identificar las zonas de SWF, El estudio sísmico de Geohazards a profundidades someras donde generalmente se producen los SWF proporcionan imágenes de alta resolución, lo que permite hacer una buena interpretación de secuencias estratigráficas (Subhashis & DUTta, 2002).

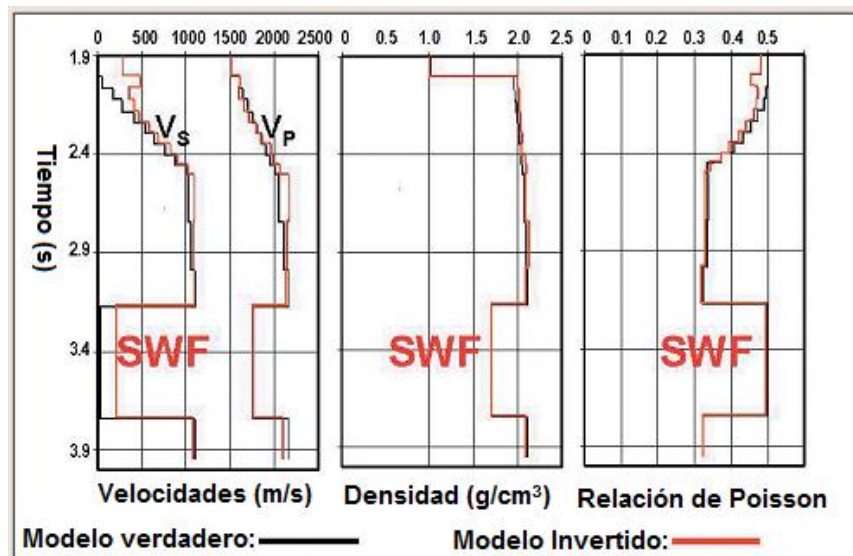
El uso de técnicas AVO también es indispensable para caracterizar las zonas no solo de SWF sino también de SGF, espesores de los estratos y las fallas o discontinuidades estratigráficas, el análisis cualitativo de variación de amplitud con el desplazamiento (AVO Amplitude Variation with Offset) es usado por los geofísicos para evaluar el espesor, la porosidad, la densidad, la velocidad de las ondas, la litología y el tipo de fluido contenido en las rocas de la formación, mediante el análisis de la variación de amplitud de las reflexiones sísmicas cuando varia la distancia del punto de disparo y el receptor. Un análisis AVO exitoso requiere el procesamiento especial de los datos sísmicos y el modelamiento sísmico para determinad las propiedades de la roca con el fluido presente en el medio poroso (Subhashis & DUTta, 2002).

Una alta relación de  $V_p/V_s$  puede ser característica de las areniscas de flujo de aguas someras porque la relación teóricamente se acerca al infinito a medida que los sedimentos se hacen más fluidos. Los parámetros  $V_p$  y  $V_s$  disminuyen al aumentar la fluidez, pero  $V_s$  cae más rápidamente y cae a cero en el agua.

Cuando existe una secuencia estratigráfica apropiada, tal como debajo de un flujo turbidítico depositado rápidamente, aumenta la probabilidad de riesgos de perforación.

Los análisis AVO estándar arrojan respuestas de índole cualitativa mas que cuantitativa, lo cual dificulta la integración de sus resultados en los modelos; para los SWF es recomendable aplicar esta técnica para ángulos de incidencia menores a 25° o 30°, pues para ángulos mayores puede generarse fenómenos de interferencia lo que incurriría en errores, para ángulos mayores se usa el análisis de la relación de las velocidades de onda  $V_p/V_s$  y la relación de Poisson a partir de datos sísmicos. Empero, la técnica AVO para ángulos mayores debe realizarse para hacer posteriores análisis cuantitativos (Subhashis & DUtta, 2002).ver figura 122, 123 y 124.

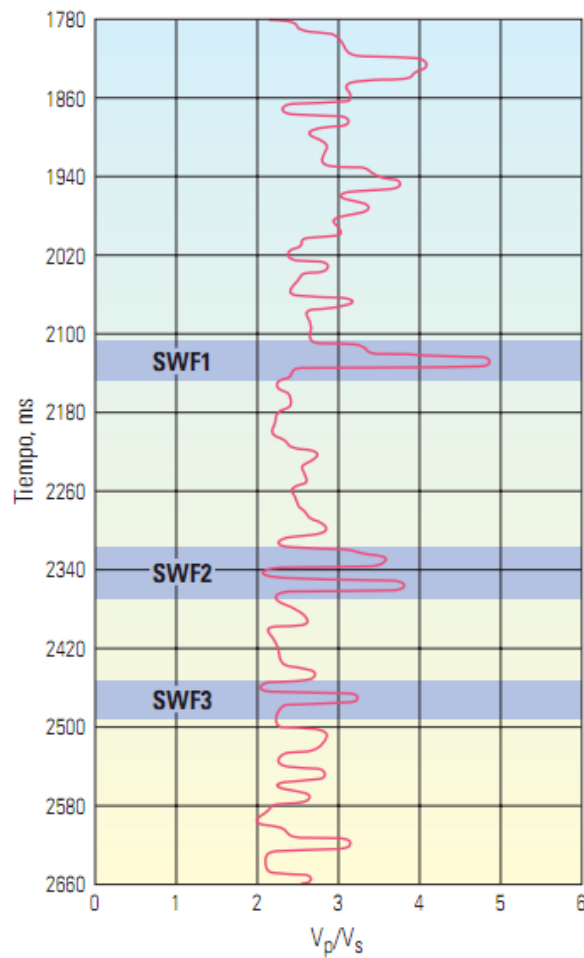
**FIGURA 122: Análisis por medio de la técnica AVO en la identificación de SWF.**



Fuente: Modificada de (Subhashis & DUtta, 2002, pág. 676).

En la figura 123 se observa que para relaciones de  $V_p/V_s$  altas indica tres riesgos geológicos someros de flujo de aguas someras. A medida que la rápida sedimentación de lutitas de baja permeabilidad entierra a las areniscas más permeables, se inhibe la expulsión de agua intersticial. En consecuencia, el valor de  $V_p$  sigue siendo bajo pero  $V_s$  se mantiene cercano a cero ya que los fluidos no transmiten las ondas de corte (Subhashis & DUtta, 2002).

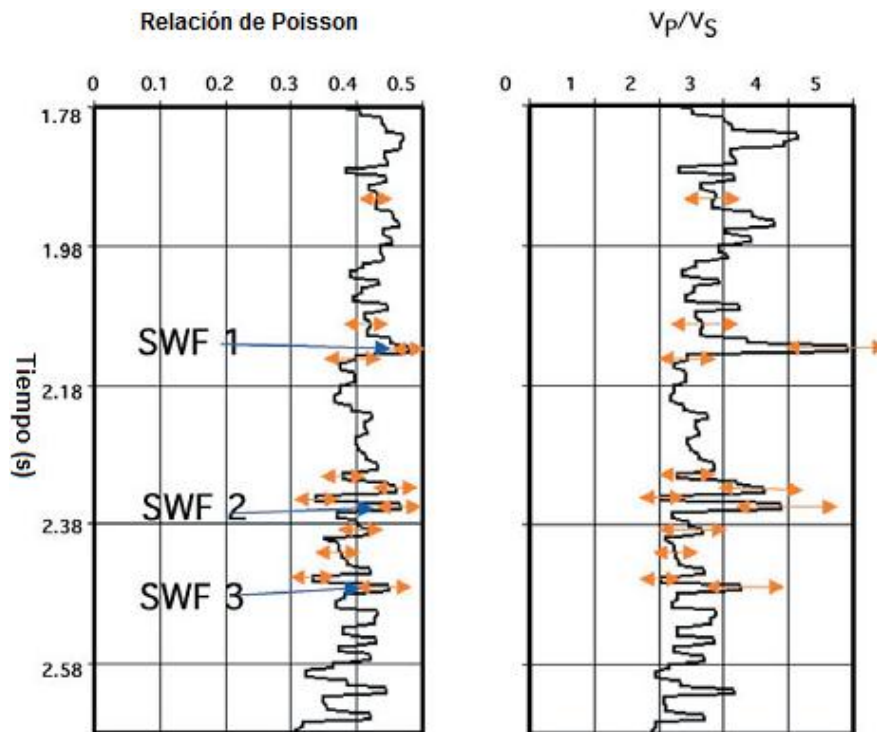
**FIGURA 123: Identificación de SWF mediante el análisis de tiempo contra la relación  $V_p/V_s$ .**



Fuente: (Alsos, y otros, 2002, pág. 62).

En la figura 124 se muestra que tanto para una relación mayor entre las velocidades  $V_p/V_s$  como para un alto valor en la relación de Poisson se asocian las zonas de SWF, este análisis es conocido como inversión antes del apilamiento (Prestack Inversion). Sin embargo es importante combinar varios métodos para tener un mayor grado de certeza sobre la existencia de zonas de SWF (Subhashis & DUTta, 2002).

**FIGURA 124: Identificación de SWF mediante el análisis de tiempo contra la relación  $V_p/V_s$  y la relación de Poisson.**



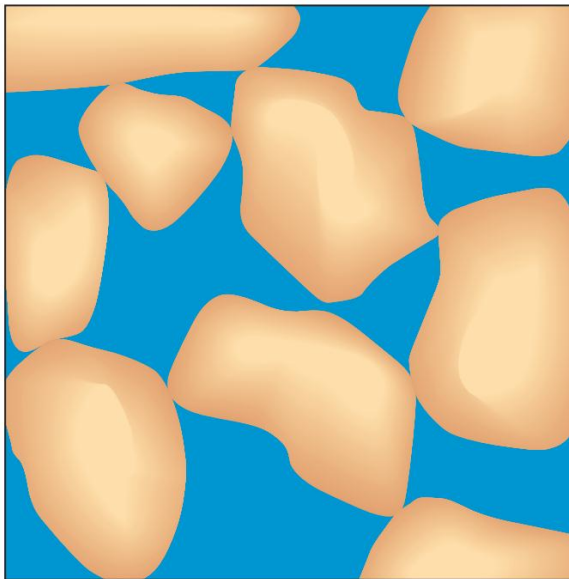
Fuente: Modificada (Subhashis & DUTta, 2002, pág. 679).

La causa principal de geopresión es la compactación por desequilibrio. Cuando se depositan los granos de roca se encuentran débilmente empaquetados, lo cual

genera un valor de porosidad inicial muy elevada y un contacto entre granos deficiente como se indica en la parte izquierda de la figura 125. El peso de sobrecarga es soportado por los granos a través del contacto entre los mismos y por el fluido alojado en los poros. Al aumentar el peso de sobrecarga, la formación se compacta y expulsa agua lo cual reduce la porosidad y mejora el contacto entre los granos como se muestra en la parte derecha de la figura 125. Cuando el peso de sobrecarga aumenta demasiado rápido, una mayor parte del peso es sustentado por el fluido generando así una alta presión de poro (Alsos, y otros, 2002).

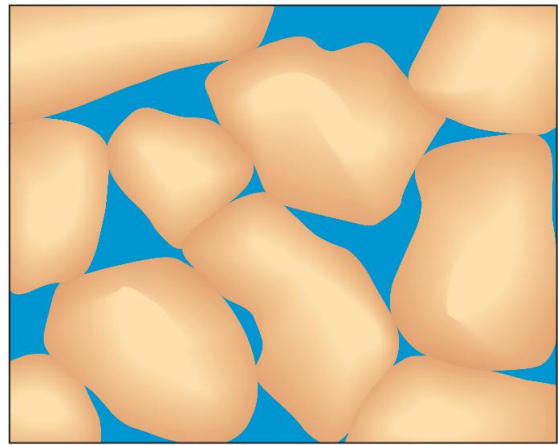
**FIGURA 125: Compactación asociada a fenómenos de sobrepresión y generadora de riesgos geológicos a nivel somero.**

**Compactación por desequilibrio**



- Esfuerzos efectivos bajos
- Presión de poro alta
- Menor densidad
- Menor velocidad
- Contacto entre granos deficiente

**Compactación normal**

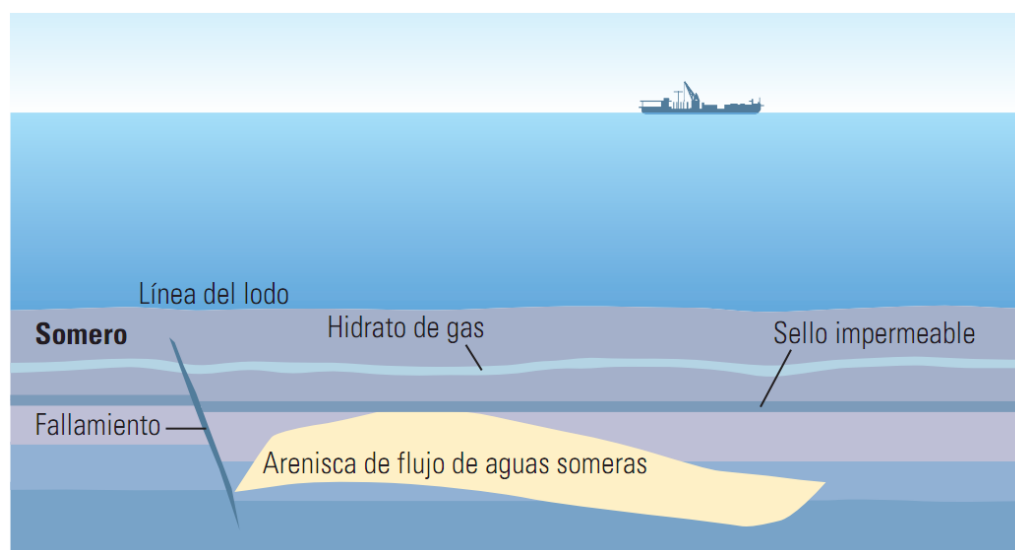


- Esfuerzos efectivos altos
- Presión de poro baja
- Mayor densidad
- Mayor velocidad
- Contacto entre granos suficiente

Fuente: (Alsos, y otros, 2002).

Los peligros someros son comunes en ambientes de aguas profundas, donde las areniscas de alta presión plantean riesgos a la perforación por su falta de compactación. El volumen de poros es tan grande que la relación de areniscas parece en sí una lechada. Si se encuentra cubierta por lutitas menos permeables, el agua intersticial no puede escapar y la presión de poro aumente. Cuando la barrera atraviesa este tipo de formación, la arenisca puede fluir fuera del pozo y torcer la columna de perforación durante el proceso. Se debe controlar cuidadosamente la densidad del lodo de perforación ya que la separación entre el gradiente de fractura y el de la presión de poro será muy pequeña (Alsos, y otros, 2002). Ver figura 126.

**FIGURA 126: Condiciones típicas de formación de SWF y otros riesgos geológicos someros.**



Fuente: (Alsos, y otros, 2002, pág. 61).

Algunas compañías como WesternGeco utilizan un proceso compuesto por cinco pasos para identificar potenciales areniscas que presentan flujo de aguas poco profundas. Dado que cada estudio depende de una señal sísmica banda ancha, de amplitud verdadera y alta frecuencia, se evalúa la adecuación de la secuencia de procesamiento de datos. A continuación, se realiza una interpretación estratigráfica para identificar los ambientes y facies sedimentarias. En tercer lugar, se realiza un análisis AVO para extraer la ordenada al origen de las ondas compresionales y los volúmenes de gradientes. La combinación ponderada de ambos procesos da como resultado un pseudo volumen de ondas S. En cuarto lugar, una aplicación sísmica conocida como inversión sísmica conocida como inversión sísmica total de formas de onda de apilamiento, emplea una metodología que incluye algoritmos genéticos (GA), para el modelo de un conjunto de ángulos sísmicos observados y para la inversión de propiedades elásticas de las rocas; tales como  $V_p$ ,  $V_s$ , densidad, Relación de Poisson. Por último, la tendencia de baja frecuencia inducida por las inversiones 1D antes del apilamiento con una inversión después del apilamiento; a los volúmenes de  $V_p$  y  $V_s$ , que luego se dividen entre si para dar un volumen  $V_p/V_s$  (Alsos, y otros, 2002). Ver figura 127.

**FIGURA 127: Condiciones típicas de formación de SWF y otros riesgos someros.**



Fuente: (Subhashis & DUtta, 2002, pág. 676).

En la investigación realizada por BP en los bloques RC4 y RC5 en el Caribe Colombiano determino la existencia de flujo de agua somera generada por las altas ratas de deposición ( Thomson, 2010).

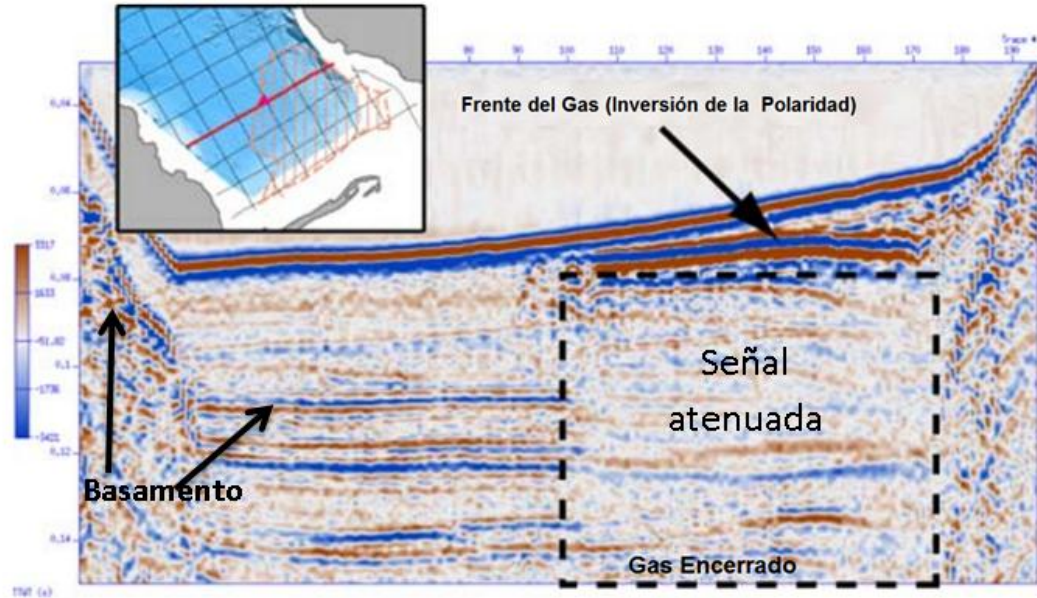
#### **4.4.4 Shallow Gas Flow (SGF)**

La sísmica 2D y 3D comprenden herramientas importantes en la identificación de flujo de gas somero, pues usa alta frecuencia y tiene una resolución vertical de hasta tres metros y puede alcanzar profundidades de hasta 1500 metros (Wardlaw & Salisbury, 2010).

Identificar los riesgos geológicos someros asociados a flujos de gas es de vital importancia, pues como se mencionó en la definición de términos gran parte de los accidentes que se han presentado se han dado por riesgos asociados a SGF. Sin embargo el sistema de identificación muy similar a la identificación de hidratos de gas o SWF, pues se trata de tener datos sísmicos de alta calidad que permitan hacer una buena representación de las facies litológicas y de la estratigrafía del subsuelo para poder identificar las anomalías causadas por las zonas sobrepresionadas donde se encuentran los flujos de gas someros.

En la figura 128 se muestra un análisis de sísmica 3D de alta resolución para identificar riesgos geológicos someros en la cual se muestran dos regiones en particular, una donde se muestra gas superficial que puede estar asociado a ventanas de gas o pockmarks y otra sección de gas un poco mas profundo que se encuentra depositado por la rápida sedimentación dada por un fenómeno similar al de la formación de SWF.

**FIGURA 128: Análisis de sísmica 3D HR para identificar flujos de gas somero en la costa de finneidfjord Noruega.**



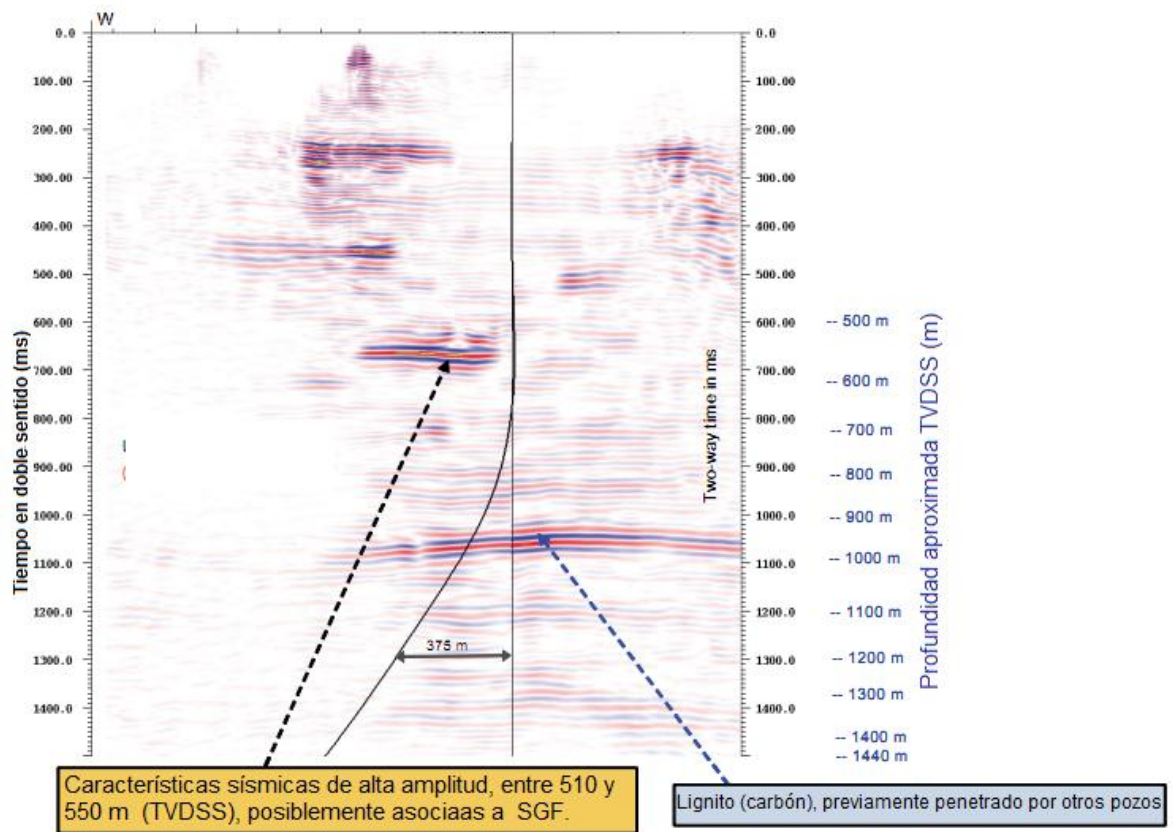
Fuente: Modificada de (Sheahan & DeGroot, 2009, pág. 103).

Otras formas de identificar riesgos geológicos someros son a través de registros sísmicos de alta resolución tomados de pozos previamente perforados para identificar la mejor dirección de los nuevos pozos a perforar para evitar atravesar zonas sobrepresionadas, las anomalías o lugares con características sobresalientes representan ciertos riesgos o cualidades de las estructuras estratigráficas (Oumer, Taufiqurrachman, Perruchot, & Yunus, 2010). Ver figura 129.

Con el fin de obtener mejores trayectorias de futuros pozos, obtener una mejor definición de las zonas con presencia de SGF y reducir la incertidumbre que expone a los recursos de la empresa a riesgos se suelen hacer mediciones por medio de registros en los primeros pozos perforados analizando los perfiles de

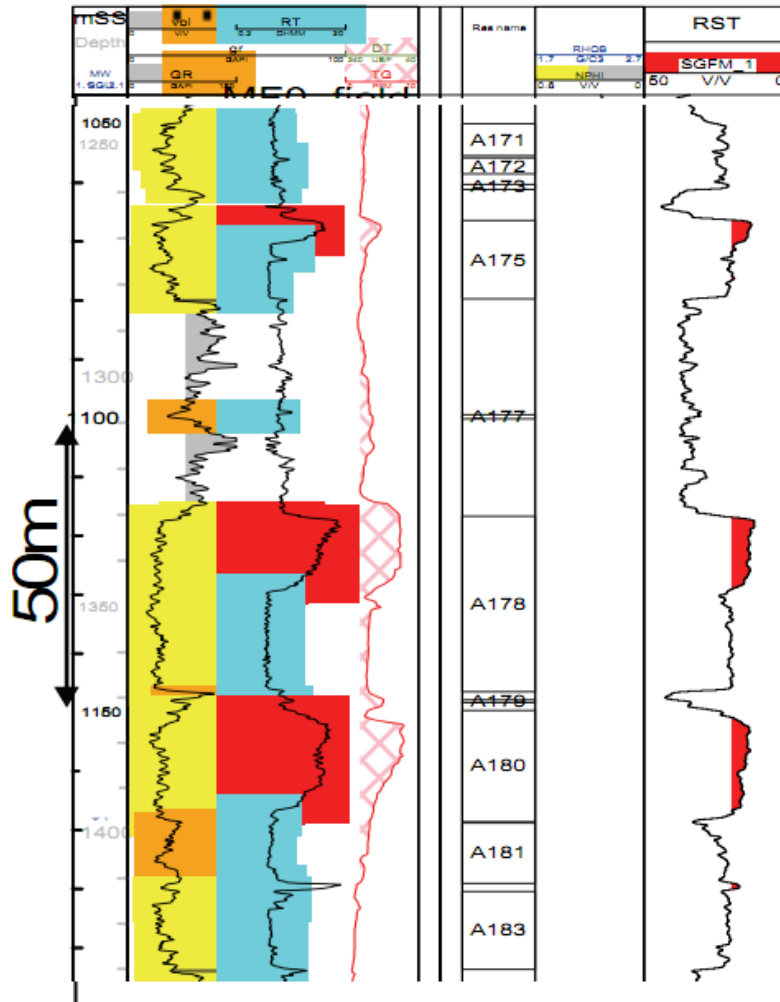
resistividad, densidad y porosidad. En la figura 130 se muestran las zonas de SGF marcadas con color rojo las zonas, estas zonas se caracterizan por presentar altas resistividades y baja radioactividad como es típico de una formación porosa con presencia de hidrocarburos (Oumer, Taufiqurrachman, Perruchot, & Yunus, 2010).

**FIGURA 129: Anomalías en sismica 3D HR asociadas a SGF.**



Fuente: Modificada de (Oumer, Taufiqurrachman, Perruchot, & Yunus, 2010, pág. 3).

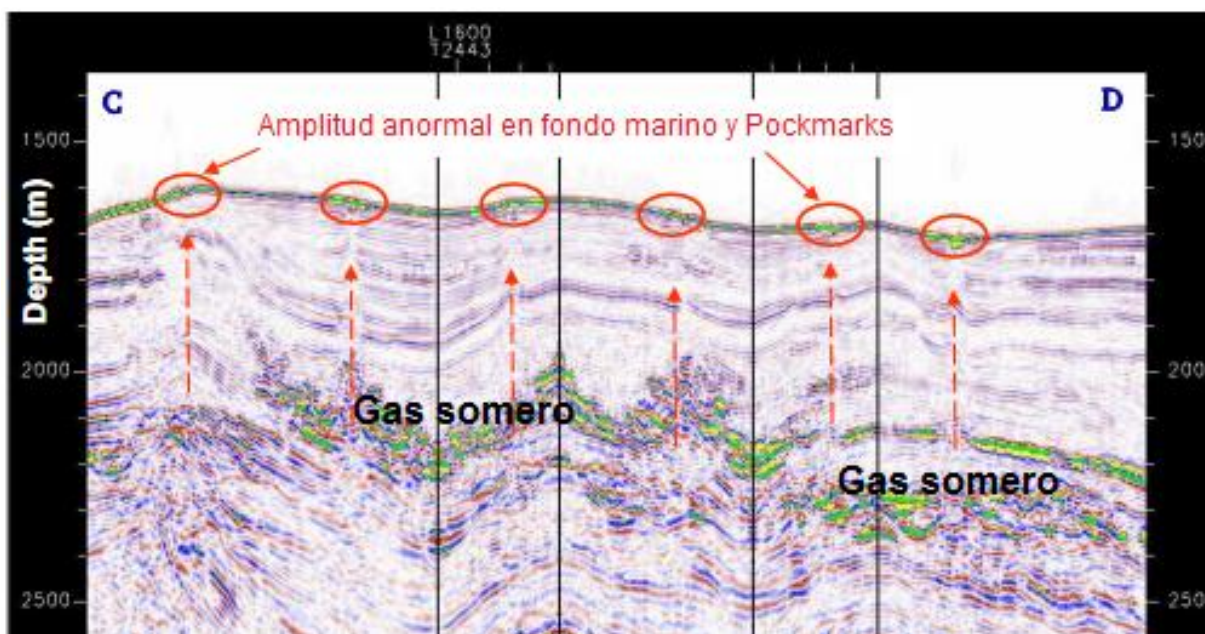
**FIGURA 130: Anomalías en sismica 3D HR asociadas a SGF.**



Fuente: Modificada de (Oumer, Taufiqurrachman, Perruchot, & Yunus, 2010, pág. 3).

En la costa Caribe colombiana se detecto la presencia gas somero en el estudio realizado por BP para Ecopetrol en los bloques RC4 y RC5 por medio de interpretación sísmica. En la figura 131 se muestra con color verde las posibles zonas donde se encuentra el gas somero, además se muestra las evidencias en superficie en forma de Pockmarks que se pueden detectar por medio de batimetría ( Thomson, 2010).

**FIGURA 131: Anomalías en fondo marino presentadas por la salida del gas somero y presencia de gas somero en el Caribe Colombiano.**



Fuente: modificada de ( Thomson, 2010, pág. 20)

#### 4.4.5 Domos Salinos

En los estudios publicados hasta el momento no muestran que existan grandes cantidades de sal a grandes profundidades en la costa Caribe Colombiana, lo que si ocurre en el Golfo de México.

La identificación de domos salinos se da básicamente de la misma forma que se identifican los demás riesgos geológicos someros, es decir mediante el análisis de registros y la sísmica 2D y 3D de alta resolución. Sin embargo, algunas veces debido al proceso de diapirismo, generado por la presión ejercida por los domos salinos a los estratos superiores, pueden evidenciarse en el fondo del mar, en este caso se puede hacer mediante mediciones de la concentración de sal con la profundidad y mediante los mencionados estudios batimétricos.

En la figura 132 se muestra el escarpe de Sigsbee detalladamente por medio de estudios batimétricos y los desniveles del terreno formados por procesos de diapirismo en el Golfo de México (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009).

**FIGURA 132: Escarpe Sigsbee en el Golfo de México.**



Fuente: (Washington, 2010) y (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009, pág. 9)

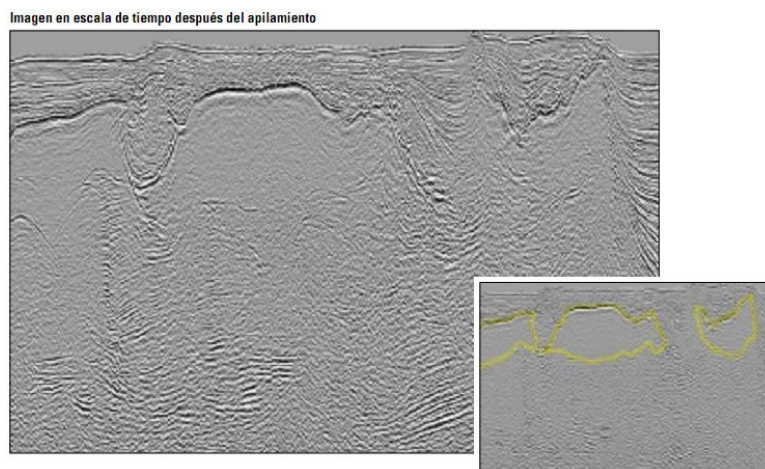
En casos como el de Sigsbee además de problemas o riesgos asociados a riesgos geológicos someros este proceso de diapirismo también se convierte en un riesgo en el lecho marino puesto que impide el desarrollo de las operaciones normalmente, pues el proceso de diapirismo es dinámico y las rocas de sal por ser de menor densidad tienden a salir a superficie generando fracturas y plegamientos en las rocas suprayacentes.

Si bien los avances sísmicos han sido muy significativos aun se continúan buscando distintas formas de hacer mejores caracterizaciones de las zonas en profundidad. En la actualidad existen regiones offshore con dificultades para el

desarrollo de operaciones, por lo tanto es importante identificar dichos domos salinos o cuerpos subsalinos. Día a día las técnicas de sísmica se están perfeccionando para poder definir los límites del domo salino y así poder ejecutar las distintas actividades con mayor seguridad.

Algunas técnicas usadas son las técnicas de análisis de migraciones en el tiempo y en profundidad. La migración en el tiempo después del apilamiento revela (poststack time imaging) (Figura 133) revela las cimas de las intrusiones salinas. Sin embargo, este método deja una imagen poco clara de las bases de la sal que podrían interpretarse en el límite inferior de la zona que tiene poca reflexión o carece de carácter.

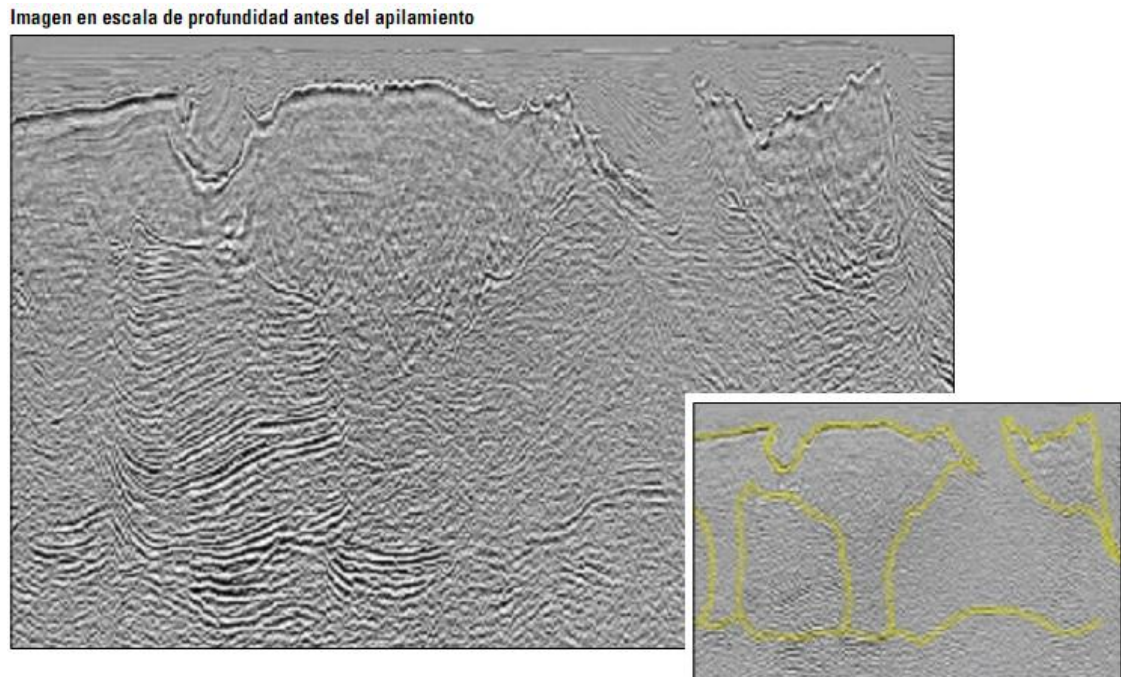
**FIGURA 133: Identificación de cuerpos salinos mediante análisis de apilamiento en Gran Canyon.**



Fuente: (Albertin, y otros, 2002, pág. 9).

La interpretación de la imagen en profundidad antes del apilamiento (prestack depth imaging) (Figura 134) sugiere que los dos cuerpos salinos situados a la izquierda no flotan, sino que están conectados a las raíces que se extienden hasta 40000 pies (12200m) (Albertin, y otros, 2002).

**FIGURA 134: Identificación de cuerpos salinos mediante análisis de apilamiento en Gran Canyon.**

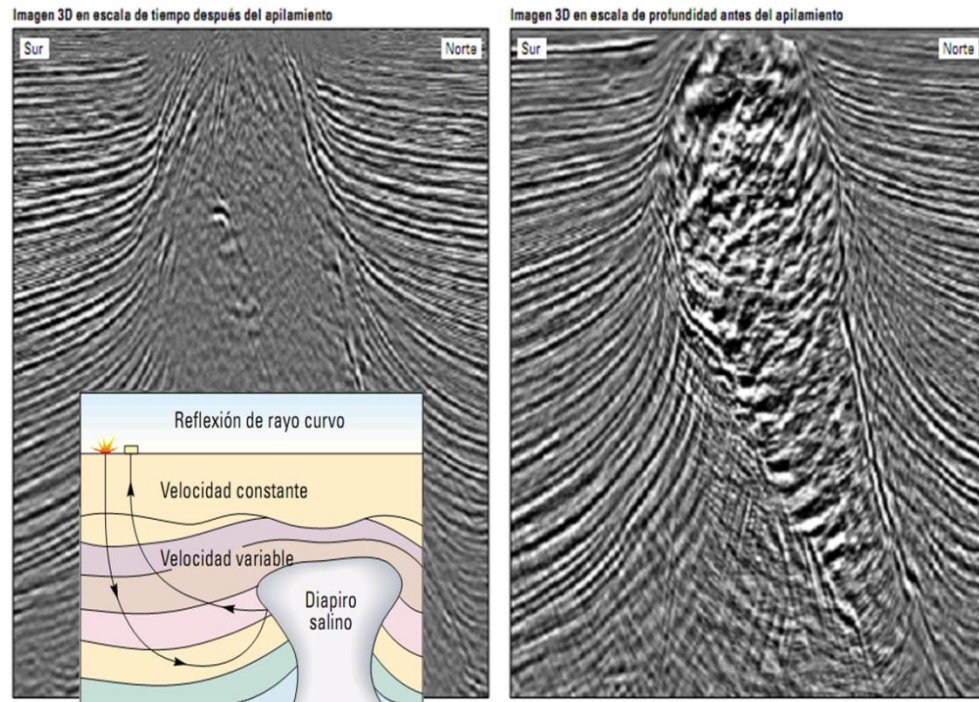


Fuente: (Albertin, y otros, 2002, pág. 9).

Además de este análisis se puede hacer el análisis para datos obtenidos de sísmica 3D como se muestra en la figura 135. La migración en tiempo después del apilamiento (imagen de la izquierda) logra generar una imagen del flanco norte de un diapiro salino, pero el flanco sur se pierde en una sombra creada por un bloque colgante. Si se incluyen los rayos curvos (imagen observada en el recuadro de colores) y los rayos que atraviesan la sal, la migración en profundidad antes del apilamiento (imagen de la derecha) permite obtener una imagen de las capas fuertemente inclinadas y del bloque colgante en el flanco sur de intrusión (Albertin, y otros, 2002).

Las imágenes de la figura 135 corresponden a un estudio sísmico realizado en el Golfo de México donde existe un proceso de diapirismo de sal activo y constante.

**FIGURA 135: Imagen debajo de un bloque salino colgante del Golfo de México con migración en tiempo y en profundidad.**



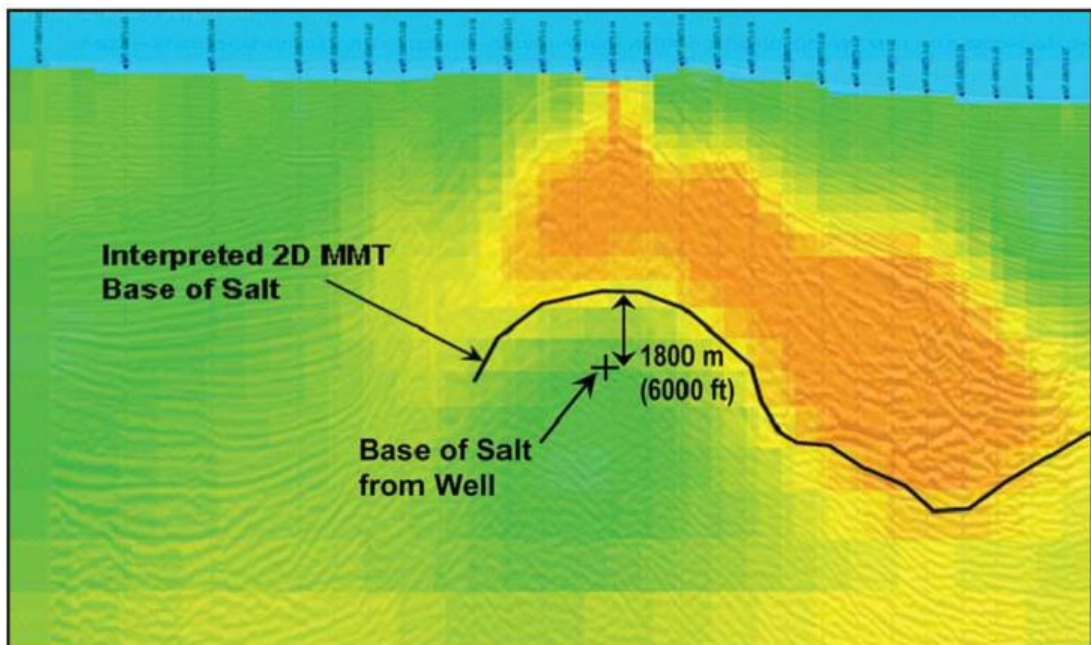
Fuente: (Albertin, y otros, 2002, pág. 10).

Es necesaria la elaboración de modelos que ayuden a predecir el movimiento futuro de la sal, para no tener inconvenientes en los planes de perforación.

Otras formas de identificar la presencia de cuerpos salinos en el subsuelo es las mediciones sísmicas mientras se perfora, los datos obtenidos ayudan a confirmar el modelo elaborado o a recalibrarlo para reducir la incertidumbre en la predicción de presiones de poro (Mora Rios, Olivares, Aguilera, Gaitan, Cristian, & Rodriguez, 2011). Actualmente se usa una técnica denominada MMT (Marine

Magnetotellurics), el método MMT se basa en la caracterización de imágenes de estructuras del subsuelo debido a las variaciones naturales del campo magnético de la tierra. El método consiste en la toma de mediciones de los campos eléctricos y magnéticos de corrientes inducidas para posteriormente ser procesadas y modeladas en imágenes de resistividad del subsuelo como la que se indica en la figura 136.

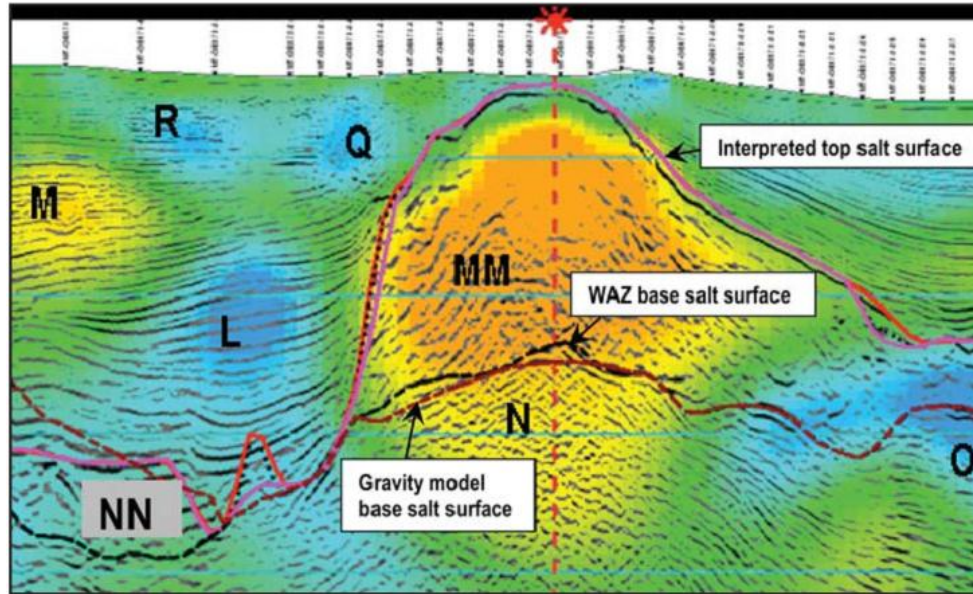
**FIGURA 136: Resultados de un modelo de inversión suave.**



Fuente: (Sandberg, 2008, pág. 2)

En la figura 137 además de presentar un modelo combinado también se considera una amplia cobertura azimutal (WAZ wide-azimuth) y la última tecnología de imágenes denominada (MMCI multimeasurement constrained imaging) que con la integración de estas herramientas se a podido mejorar los mapas de cuerpos de sal y reducir la incertidumbre en los programas de exploración (Colombo & De Stefano, 2007).

**FIGURA 137: Mapa de cuerpo salino integrando técnicas MMT y FTG.**



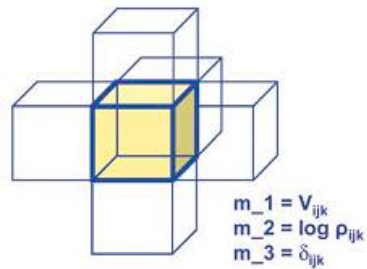
Fuente: (Sandberg, 2008, pág. 3).

Algunas veces se suelen integrar al análisis MMT la técnica FTG (full-tensor gravity), para obtener una mayor definición del cuerpo de sal y de sus futuros movimientos para reducir riesgos en las operaciones, En la figura 137 se muestra un modelo basado en la combinación de las técnicas MMT y FTG el cual comprende un modelo mas robusto que trabajar cada técnica por separado (Colombo & De Stefano, 2007).

Los cuerpos salinos también se pueden caracterizar y predecir su comportamiento a través de la simulación de modelos numéricos 2D y 3D, para la elaboración del modelo se necesita un estudio completo y detallado de la estratigrafía y además la distribución de las facies. El principio del modelamiento parte de una mínima unidad denominada celda en modelos 2D o grid-block en modelos 3D; y cada unidad mínima interactúa con todos los límites que comparte, de esta manera se pueden elaborar modelos dinámicos para predecir el comportamiento futuro de los movimientos del domo salino o caracterizarlo de una mejor manera. En la figuras

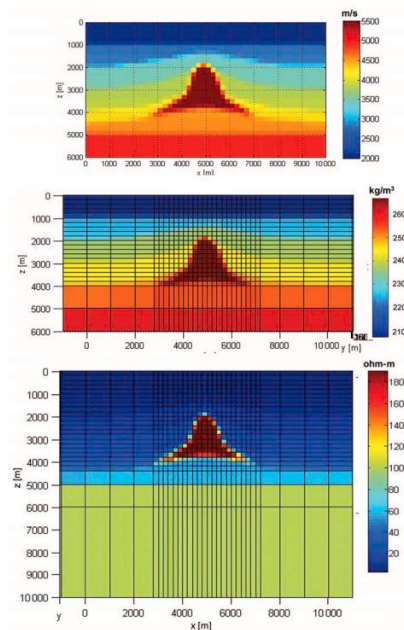
138 a 140 se ilustra la aplicación de la simulación a la identificación de cuerpos de sal en el subsuelo.

**FIGURA 138: Modelo espacial dependiente de multiples parámetros y dominios geofisicos**



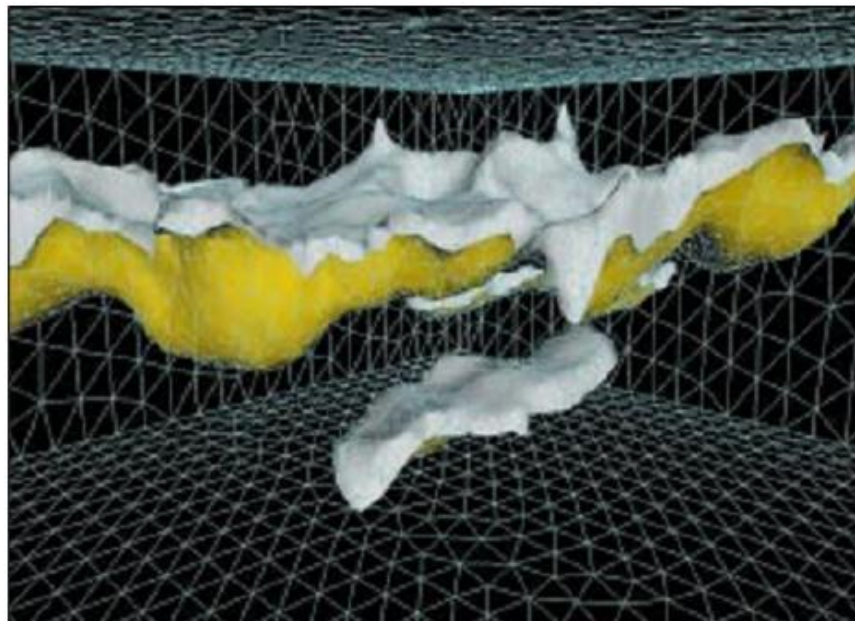
Fuete: (Colombo & De Stefano, 2007, pág. 327).

**FIGURA 139: Modelo bidimensional para identificar cuerpos salinos en el subsuelo usando graficas de velocidad de Ondas P, Resistividad y Densidad.**



Fuete: (Colombo & De Stefano, 2007, pág. 328)

**FIGURA 140: Modelo tridimensional para cálculo de volumen de sal usando una estructura compleja a varias escalas.**



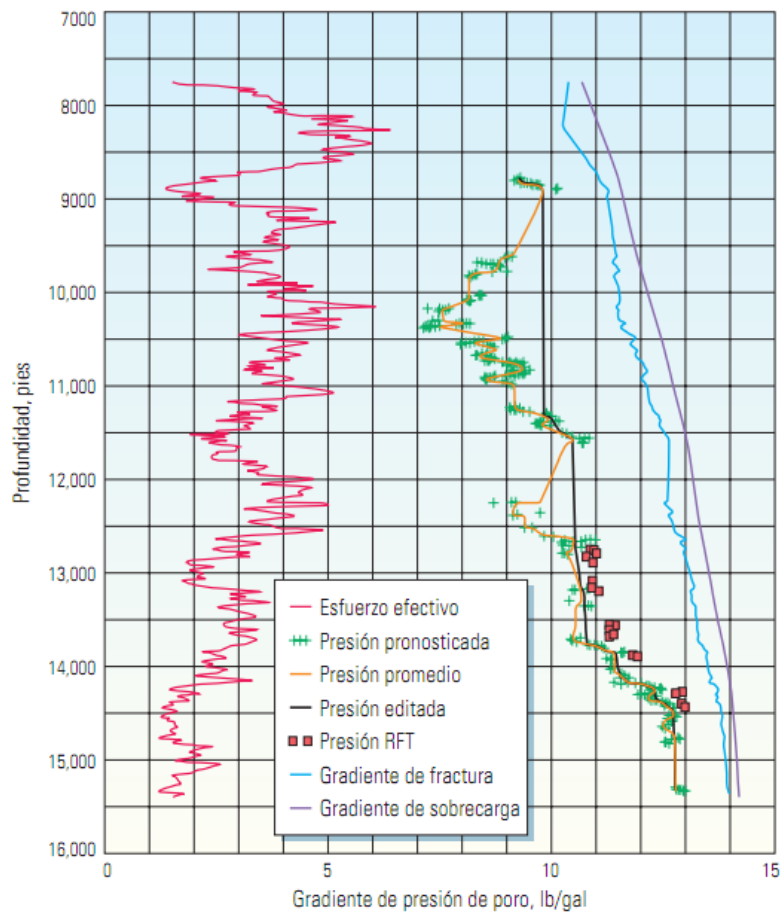
Fuente: (Farmer, Miller, Pieprzak, Rutledge, & Woods, 1996, pág. 61).

#### **4.4.6 Anomalías de Sobrepresión**

A las actuales profundidades de perforación, la sobrepresión puede duplicar la presión hidrostática. Para evaluar los riesgos de perforación que plantean las condiciones de alta presión y contribuir al diseño de revestimiento antes de la perforación es necesario elaborar modelos de compactación por desequilibrio y diagénesis de lutitas como se indica en la figura 141. En esta figura se muestra la estimación de la presión de poro a alta profundidad. Esta estimación de presión se baso en datos sísmicos solamente, sin contar con información de calibración de pozos. Las presiones pronosticadas (cruces verdes) y los valores medidos con el multiprobador de medición (cuadros rojos), se encontraron dentro de valores correspondientes a una densidad de lodo de 0,5 Lbm/gal. A los 14,500 pies de

profundidad, la diferencia entre la presión de poro y la de fractura miento corresponden a una densidad de lodo de 1 Lbm/gal (Alsos, y otros, 2002).

**FIGURA 141: Modelo previo a la perforación de estimación de la presión de poro con la profundidad.**



Fuente: (Alsos, y otros, 2002, pág. 62).

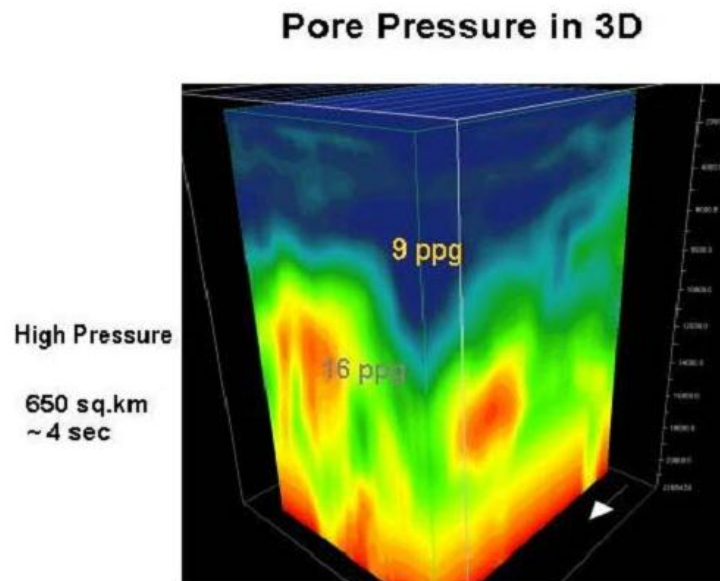
Para la identificación de zonas sobrepresionadas se deben seguir procedimientos que permitan obtener la presión de poro de la formación; un proceso adecuado y usado es el siguiente. La información de velocidad se extrae de los datos sísmicos

y, a través de una serie de inversiones, se obtiene información de porosidad y densidad. A partir de la densidad obtenida de los datos sísmicos, se calcula un gradiente de sobrecarga. Otras curvas calculadas muestran el gradiente de fracturamiento, la tendencia de compactación normal, el esfuerzo efectivo normal y el esfuerzo efectivo; presión en los contactos entre granos. Por último, se calcula la presión de poro utilizando el principio de Terzaghi, que establece que la sobrecarga es igual a la presión de poro más el esfuerzo efectivo (Alsos, y otros, 2002).

La geopresión de la formación y sus propiedades (velocidad, densidad, rigidez, entre otras) son susceptibles a metodologías de predicción cuantitativa mediante el uso limitado de la inversión de desplazamiento de datos convencionales de las ondas p, y el modelado del conjunto de propiedades físicas de las rocas.

La figura 142 muestra un cubo de presión en 3D derivados de una inversión antes del apilamiento de los datos de velocidad que incluye análisis de velocidades en cada trazo y en cada muestra de tiempo.

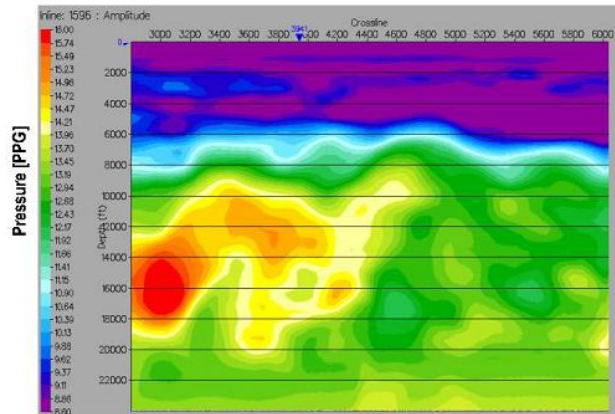
**FIGURA 142: Imagen en 3D de presión de poro obtenida de una inversión sísmica.**



Fuente: (Dutta, 2003, pág. 4).

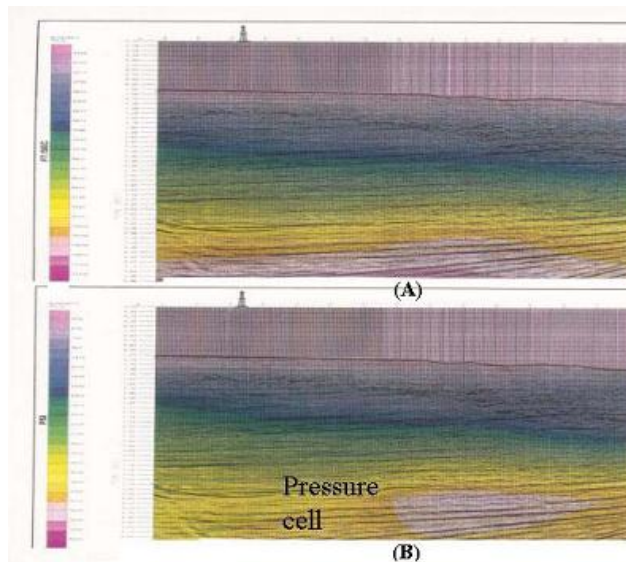
Las figuras 143 y 144 se muestran ejemplos en 2D que ilustran la distribución de la presión de poro; la figura 143 se muestra el desplazamiento de la presión de poro mediante un corte transversal del cubo de la figura 142, mientras que en la figura 144 se muestra una perspectiva más regional de la distribución de poro.

**FIGURA 143: Imagen en 2D, corte transversal de un modelo 3D.**



Fuente: (Dutta, 2003, pág. 4).

**FIGURA 144: Sección transversal de velocidad: A) presión, B) inversión de la presión.**



Fuente: (Dutta, 2003, pág. 4).

#### **4.5 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS ARTIFICIALES**

Los riesgos artificiales se deben identificar mediante la solicitud de documentos a las entidades gubernamentales y militares para verificar que la zona no se ruta de navegación marítima, ni áreas de practicas militares, los demás riesgos asociados a los errores humanos deben corresponden básicamente a cumplir con las normas de seguridad adecuadas y elaborar los estudios correspondientes de identificación valoración y mitigación de riesgos geológicos, por que además de ser el riesgo geológico un riesgo por defecto, también puede ser catalogado como riesgo artificial por no prestárseles la suficiente atención o interés para reducir la incertidumbre y evitar exposición de los recursos de la compañía y del medio ambiente.

La empresa petrolera invierte anualmente más de 20 mil millones de dólares americanos en operaciones de perforación, de este importante monto de dinero, unos 3 mil millones se atribuyen a perdidas; el capital de las empresas, los bienes y equipos materiales y la vida humana este expuesta a riesgos. Una de las principales causas de pérdidas es encontrarse con presiones de formación inesperadas, anormalmente alta, hecho que se le conoce como riesgo geológico a poca profundidad o riesgo somero. Dado que la exploración ese esta extendiendo hacia zonas de petróleo y gas cada vez más profundas, los ingenieros de perforación deben conocer las condiciones de presión para asentar correctamente las tuberías de revestimiento, ya que una sola profundidad de revestimiento mal seleccionada puede impedir que se alcance la profundidad final planeada para el pozo.

# 5 ESTIMACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS

## 5.1 GENERALIDADES

Una vez se han identificado los distintos riesgos y peligros (Shallow Hazards and Geohazards) que pueden tener efectos negativos en el medio ambiente, las personas y las facilidades de la empresa se procede a evaluar y clasificar de acuerdo a las consecuencias y basado en las frecuencias de cada riesgo en específico (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006), (Veritas, Marine risk assessment, 2001).

El equipo de análisis de riesgos debería hacer recomendaciones a la gestión para la mitigación de riesgos. En la mayoría de los casos, la mitigación de los riesgos es simple u obvia e implican modificaciones para cumplir con la práctica habitual. Las recomendaciones se basan en la propia evaluación cualitativa del riesgo del equipo. Para más artículos importantes, el equipo puede recomendar una investigación o evaluación cuantitativa de riesgos por algún otro grupo. La evaluación de riesgos considera tanto la probabilidad y consecuencia (NORSOK, 2001).

La norma API RP 75 indica que el análisis de riesgos debe ser realizado por todos los centros de operación, con el propósito de reducir al mínimo la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias de pérdidas o liberaciones de hidrocarburos mediante la identificación, evaluación y control de los acontecimientos que podrían

producir la liberación que puede resultar en un lamentable accidente (NORSOK, 2001).

La norma API RP 14J establece que para un análisis predictivo de riesgos el segundo paso es la evaluación que cada uno de los peligros previamente identificados. La evaluación de riesgos normalmente incluye la identificación de eventos iniciales, identificar secuencia de accidentes, estimar la probabilidad de la secuencia de los eventos de accidentes y la magnitud de las consecuencias además juzgar o determinar si el riesgo es aceptable (NORSOK, 2001).

La evaluación de situaciones de riesgo se comenzó a dar desde 1974 donde se comienzan a aplicar normativas para la salud y seguridad en el trabajo dentro del desarrollo de la industria de los hidrocarburos a nivel offshore, en 1995 se dan regulaciones en lo relacionado a implementación de instalaciones marinas, la prevención de incendios y explosiones y finalmente los planes para la respuesta adecuada ante situaciones de emergencia. A continuación se desarrollaron regulaciones en 1996 en cuanto al diseño y construcción de las instalaciones marítimas y pozos. En los últimos años se han venido dando distintas medidas de restricciones ambientales que son estrictas y están enfocadas al cuidado del medio ambiente y el bienestar de las personas, dichas medidas también comprenden el cuidado de los bienes de la empresa (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006).

Lo que se busca con la normativa vigente es llevar el nivel de riesgo lo más bajo que sea razonablemente práctico (ALARP en ingles) considerando lo más bajo que sea razonablemente posible en términos económico, teniendo en cuenta que el riesgo en un proyecto no desaparece pero si se puede reducir o minimizar (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006).

La evaluación de riesgos geológicos someros debe hacerse tanto de forma cuantitativa como de forma cualitativa; la evaluación busca valorar el riesgo que se identifiquen y de acuerdo a la clasificación dada para posteriormente darle el manejo adecuado y establecer las medidas de control pertinentes para mitigarlos y reducirlos hasta donde sea razonablemente practico basado en que las normas vigentes de seguridad manejan tolerancias muy bajas con el animo de mantener la integridad de todos los sistemas que comprenden el proyecto de perforación offshore sin dejar grandes rangos de incertidumbre que ponga en riesgo ésta actividad (Veritas, Marine risk assessment, 2001).

La norma internacional BS EN ISO 17776 publicada en 2002 establece 3 pasos en la identificación y evaluación de riesgos que comprenden en primera medida la identificación de riesgos, en segundo lugar la evaluación de riesgos y por ultimo la eliminación o reducción del riesgo; estos pasos son inherentes a las metodologías utilizadas por cada empresa para el manejo de riesgos, puesto que deben ser adoptados de la norma internacional (BS EN ISO, 2002).

La metodología de evaluación de riesgos debe ser eficiente en términos económicos y de suficiente detalle para permitir la clasificación de la magnitud de los riesgos con el fin de establecer los controles para reducirlos o reducir la probabilidad de ocurrencias de situaciones no deseadas durante la perforación offshore en la industria de los hidrocarburos. Adicionalmente el rigor de la evaluación del problema debe ser proporcional a la complejidad y magnitud del riesgo. La guía de evaluación re riesgos para instalaciones offshore dada en 2006 por la dirección de HESQ presenta 3 etapas de evaluaciones de riesgos (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006), (BS EN ISO, 2002).

- **Cuantitativa (Q):** En la cual se evalúa la frecuencia y la severidad potencial del daño a nivel cualitativo.

- **Semi-Cuantitativo (SQ):** En la cual se hace una aproximación cuantitativa de la frecuencia y severidad de los posibles riesgos dentro de un rango estimado.
- **Evaluación Cuantitativa de Riesgos (QRA):** En esta fase se hace un análisis cuantitativo completo.

En la evaluación de riesgos se deben tener cuatro (4) niveles fundamentales que permitan desarrollar un análisis apropiado a cada tipo de riesgo Ver figura145.

**FIGURA 145: Niveles para el análisis y desarrollo para una adecuada evaluación de riesgos.**



Fuente: Modificada de (BS EN ISO, 2002, pág. 6).

En muchas circunstancias, el conocimiento y la experticia de **personal con experiencia** es importante para dar un enfoque estructurado sobre el control y manejo del riesgo. Las **listas de verificación** son herramientas rápidas y fáciles de usar, además estas ayudan a determinar si los estándares de desuño y las practicas programadas se cumplen, por otro lado, ayudan a verificar que los riesgos identificados previamente se traten de forma adecuada (BS EN ISO, 2002).

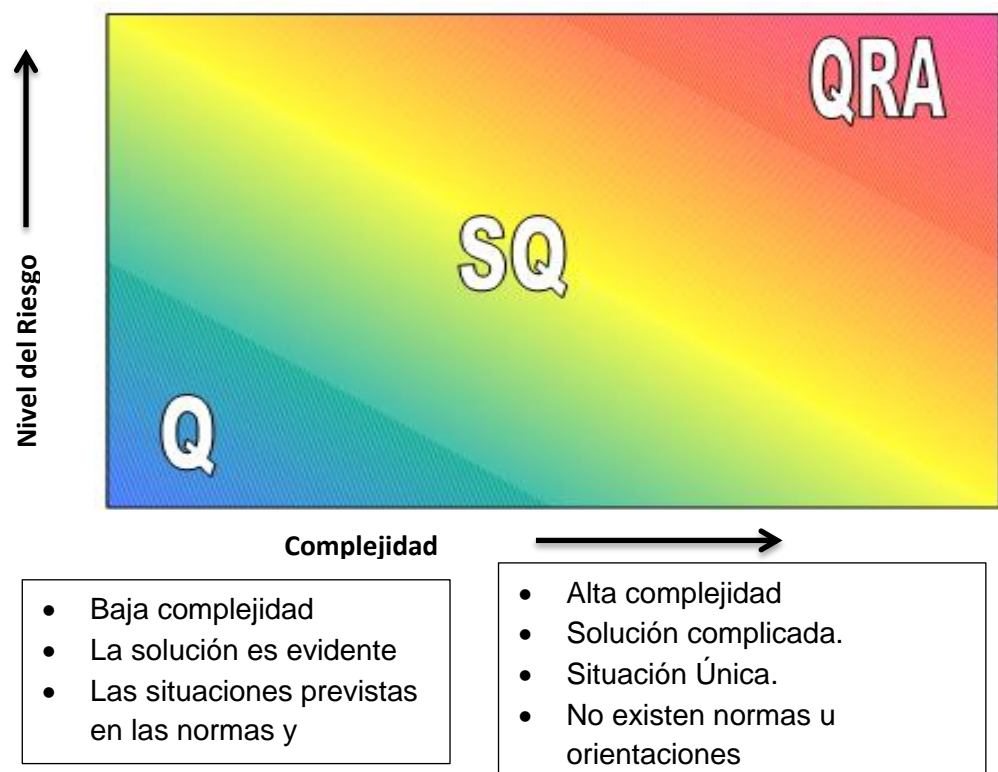
Cuando la experiencia adquirida por la industria ha sido traducida y estructurada en **códigos, normas o metodologías propias de la empresa**, se puede lograr un alto nivel de seguridad en el proyecto mediante la comprobación del cumplimiento de estas prácticas estándar en el diseño, construcción, operación y mantenimiento que se lleven a cabo durante la perforación offshore. Sin embargo se pueden **usar técnicas de revisión estructuradas** como un último nivel para identificar métodos de control y evaluar los riesgos que no se han tratado en la empresa previamente, y los eventos no deseados que no se le ha dado solución completa mediante la evaluación dada en los niveles mencionados anteriormente (BS EN ISO, 2002).

La evaluación de proyectos exploratorios se hace un poco más difícil que para lugares donde se tenga cierta información que es de gran utilidad para una evaluación más precisa y efectiva de riesgos. En el caso de perforaciones exploratorias donde no se cuente con información suficiente y se puedan presentar riesgo potencial se debe tener especial cuidado, y el modelo evaluativo debe ser más detallado a medida que avanza el proyecto, pues se debe refinar mejor el modelo de análisis, control y manejo de riesgo durante el desarrollo proyecto. Adicionalmente los riesgos que puedan detectarse en el desarrollo deben ser evaluados de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia (Basado en la frecuencia de ocurrencia de eventos similares) y la potencial gravedad de consecuencias derivadas del suceso que indica un determinado grado de riesgo (BS EN ISO, 2002).

Basado en la metodología (Q, SQ y QRA) se puede observar la complejidad del riesgo de acuerdo a la etapa de valoración, La figura 146 muestra que para la metodología de análisis cuantitativo de riesgos (QRA) se presenta la mayor complejidad de análisis y un riesgo más alto, mientras que para una valoración cuantitativa (Q) el riesgo esta en un valor muy bajo y el riesgo puede ser tratado con la experiencia de eventos similares o mediante guías existentes que permitan una valoración adecuada y tolerable.

Lo más importante de la evaluación de riesgos es proporcionar un insumo para la toma de decisiones, por lo tanto el personal que participe en esta evaluación debe ser calificado y responsable de la toma de decisiones, por lo tanto se recomienda que lo haga un experto en el área para tener suficiente criterio profesional y ser competente en el área.

**FIGURA 146: Enfoque de la evaluación de riesgos desde el nivel del riesgo y la complejidad de este.**



Fuente: (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006)

La matriz de evaluación de riesgos debe servir para evaluar cada tipo de riesgo y darle un valor de acuerdo a las consecuencias potenciales y a la ocurrencia de eventos del mismo tipo ver figura 147. En esta matriz se deben diferenciar los métodos de evaluación para cada riesgo dentro de ella se incluirán el aspecto humano de la empresa, el posible impacto ambiental, las pérdidas económicas y la imagen de la compañía.

En la estimación y evaluación de riesgos, lo más importante no es el tipo de matriz de riesgos, pues cada compañía maneja distintas metodologías de evaluación, pero si es necesario hacer un análisis de frecuencias asociadas a la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias potenciales de los eventos y entrecruzarlos para obtener una idea del tipo de control que se debe implementar. Ver figura 147.

**FIGURA 147: Ejemplo de matriz de riesgos**

CONSECUENCIAS					AUMENTO DE LA PROBABILIDAD				
Rating de severidad	Personas	Bienes	Medio ambiente	Imagen de la empresa	A	B	C	D	E
					Ocorre rara vez en la industria	A ocurrido varias veces por año en la industria	A ocurrido en la compañía	A ocurrido varias veces en la compañía	A ocurrido varias veces en el campo o localidad
0	Ninguna lesión	Ningún daño	Ningún efecto	Ningún impacto					
1	Lesión leve	Daños leves	Efectos leves	Impacto leve					
2	Considerable lesión	Daños medianos	Efectos considerables	Impacto limitado					
3	Lesión grave	Daño local	Efectos locales	Impacto considerable					
4	Un muerto	Daño grave	Graves efectos	Impacto nacional					
5	Varios muertos	Daños irreparables	Efectos irreparables	Impacto internacional					

Intolerable	Incorporar medidas de reducción de riesgos para contuiar	Se puede continuar la operación con mejoras

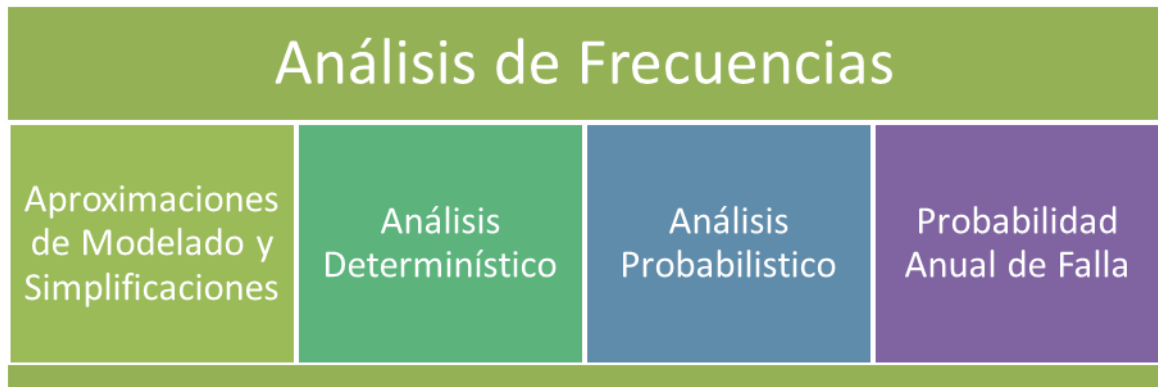
Fuente: modificada de ISO 17776 (Veritas, Marine risk assessment, 2002)

Los dos parámetros más importantes en la interpretación de riesgos desde un nivel estimativo son el análisis de frecuencias y el análisis de consecuencias.

## 5.2 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

El análisis de frecuencias en primera medida comprende los parámetros básicos determinísticos y estadísticos de ocurrencia de eventos de falla en un periodo determinado en el cual se hace una aproximación o simplificación a modelos analíticos, en la figura 148 se muestran los principales factores a tener en cuenta en un análisis de frecuencias.

**FIGURA 148: Componentes del análisis de frecuencias en la interpretación y estimación de riesgos.**



Fuente: Modificada de (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

### 5.2.1 Aproximaciones de modelado y simplificaciones

Para una adecuada estimación de riesgos se requiere de una evaluación de la probabilidad de ocurrencia de eventos de falla y las consecuencias asociadas a cada escenario de falla para cada riesgo identificado. Para el caso de Geohazards los datos son escasos y las estadísticas por lo general no están disponibles para el lugar. La evaluación de frecuencias esta basada principalmente en la

combinación de observaciones de campo, información de eventos recientes, y análisis geotécnico de eventos de falla.

Lo ideal es construir un modelo mecánico que comprenda todos los factores que deben ser analizados teniendo en cuenta la interacción que existe entre el suelo, su estructura, los procesos medioambientales, los procesos geológicos y los efectos de cargas inducidas al fondo marino considerando la incertidumbre en cada una de las variables en las tres dimensiones espaciales y el tiempo; sin embargo, hasta hoy no existe un software que realice un análisis tan detallado, pues los análisis solo se limitan a riesgos específicos en cuanto a análisis y consecuencias de este, pero no existe un entrelazado de los distintos riesgos como un todo.

### **5.2.2 Análisis Determinístico**

EL análisis determinístico de los escenarios de falla generalmente son el punto de partida, este análisis ofrece factores de seguridad mediante la variación de parámetros del suelo y la magnitud de las cargas que pueden llegar a ser un mecanismos de activación o un conjunto de mecanismos de activación de escenarios de falla.

La incertidumbre como tolerancia aceptada o rechazada dentro del proyecto de perforación debe ser tenida en cuenta en las variables de entrada, esta incertidumbre puede ayudar a identificar o reconocer más fácilmente los parámetros de mayor impacto en la generación de escenarios de falla.

En la Tabla 10 se muestra un esquema general de los parámetros involucrados en el análisis determinístico de estimación de riesgos.

Dentro del análisis determinístico se incluyen análisis numéricos como consideración de límites de equilibrio, condiciones de frontera, tipo de enmallado, tipos de movimientos a modelar y los fenómenos físicos asociados, entre otros; En

la tabla 11 se indican los principales aspectos a considerar en un correcto análisis determinístico.

**Tabla 10: Análisis geotécnico de escenarios de falla, revisión retrospectiva de los eventos de falla presentados**

MECANISMO DE ACTIVACIÓN	PROCESO SECUNDARIOS-SOFTWARE DE MODELADO
<b>Esfuerzos efectivos y Condiciones de presión de poro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos de sedimentación y sedimentación, software-BASIN (NGI-BASIN, 2001).</li> <li>• Condiciones de sobrepresión, software-BASIN</li> </ul>
<b>Estabilidad de taludes, inicialización de eventos de falla</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendientes verticales e inestabilidad de pendientes, software-SLOPE (BASIN-EPA, 2007) y/o software-W PLAXIS (PLAXIS, 2011)</li> <li>• Gradientes críticos en el lecho marino y áreas afectadas, software-SLOPE</li> </ul>
<b>Reducción de resistencia del debido a huracanes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta del lecho marino a eventos de deslizamientos y modificación de esfuerzos, software-AMPLE (NGI, 1991) y software- SHAKE (Ordoñez, 2001)</li> <li>• Evaluación de licuefacción en arenas. (AMPLE)</li> <li>• Perdida de la resistencia del suelo en arcillas. (AMPLE)</li> </ul>
<b>Escalamiento del deslizamiento de sedimentos por retrogresión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perdida de resistencia del suelo gracias al ablandamiento progresivo, software-PLAXIS y/o software-BIFURC (Jostad, 2012)</li> <li>• Deslizamiento progresivo: Tamaño de la pendiente, velocidad del deslizamiento, agotamiento del deslizamiento y áreas afectadas. Software-(CFX,tri-bock, BING)</li> </ul>

Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

**Tabla 11: Aspectos a considerar en el análisis determinístico de estimación de riesgos.**

Predicción / análisis de esfuerzos efectivos y las condiciones de presión de poro
Respuesta a terremotos en el lugar y reducción de esfuerzos
Análisis de estabilidad de taludes
Limites de Equilibrio
Análisis de técnicas numéricas como Elementos Finitos
Ablandamiento del terreno
Análisis de fallas progresivas
Análisis de deslizamientos retrogrado
Análisis computacional de la dinámica de fluidos.

Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

### **5.2.2.1 Predicción / análisis de esfuerzos efectivos y las condiciones de presión de poro**

Existen distintas herramientas de análisis y modelamiento de las condiciones de presión de poro; La técnica de elementos finitos, por ejemplo son muy utilizada para el análisis de procesos de sedimentación y compactación. Muchos de los códigos y programas hasta hoy desarrollados incluyen el modelado de la roca fuente, la formación y migración de los hidrocarburos, la trampa y el yacimiento en general.

No obstante, se presentan inconvenientes de modelado del fondo marino en zonas cercanas a eventos de deslizamientos, procesos de descarga y sobrecarga de sedimentos, aunque aun utilizan métodos que consideran los fenómenos de compactación y los efectos de la presión de poro (Wangen, 1993), hoy día se continúan desarrollando nuevas herramientas que tratan de modelar de forma más real los fenómenos asociados a la compactación y esfuerzos del fondo marino debidos a efectos de presión de poro (NGI, 1991). Adicionalmente se han incluido códigos comerciales de geotecnia que emplean Elementos Finitos con capacidad de modelar efectos de procesos de excavación y construcción de facilidades en fondo marino, algunos de ellos son ABAQUS y PLAXIS.

Los datos de entrada requieren la mejor estimación de cronoestratigrafía basados en perfiles de sísmica y estimación de edades y esfuerzos dependientes de la propiedades de compresibilidad y la permeabilidad los sedimentos. Los resultados obtenidos también son dependientes del tiempo, pues la acumulación y la compactación de la columna de sedimentos sometidos esta asociada a esfuerzos efectivos y desarrollos del exceso de presión de poro.

El objetivo del desarrollo de métodos numéricos es llegar a probar que los datos obtenidos del simulador encajan con datos de laboratorio que se obtienen de muestras in situ y así poder cumplir con la finalidad del desarrollo de códigos numéricos que es predecir el comportamiento de los sedimentos en el fondo

marino que a su vez dependen de las características estratigráficas y los fluidos del subsuelo.

Algunos estudios relacionados a la interpretación y estimación de eventos asociados a la presión de poro y los esfuerzos efectivos son por ejemplo: El workshop desarrollado en 2009 por (US National Science Foundation-PIRE) donde se establece el desarrollo de protocolos internacionales para los sedimentos costa afuera y el rol de los Geohazards en la caracterización, evaluación y mitigación (Sheahan & DeGroot, 2009), Las mediciones y el monitoreo de problemas de inestabilidad (Strout & Tjelta, 2007), La predicción de las condiciones de presión de poro y la caracterización de yacimientos en aguas profundas mediante la combinación de técnicas geomecánicas y de inversión sísmica (Bachrach, et al., 2007), La inestabilidad del fondo marino y el exceso de presión de poro como resultado de fallas asociadas a la disociación y disolución de hidratos de gas (Sultan N. , 2007), Identificación de mecanismos de activación de deslizamientos marinos (Feeley, 2007), entre otros estudios relacionados.

Por otro lado algunos análisis determinísticos se han desarrollado en algunos campos a nivel mundial por medio del modelamiento numérico como es el caso de: El análisis de fallas progresivas en pendientes naturales (Andresen & Jostad, 2004), Mecanismos de falla en arcillas blandas y sensibles aplicado a Geohazards en costa afuera (Andresen & Jostad, 2005), análisis probabilístico de estabilidad de pendientes en el escarpe de Sigsbee (Nadim, Krunic, & Jeanjean, OTC 15203 Probabilistic Slope Stability Analyses of the Sigsbee Escarpment, 2003), Análisis probabilístico y determinístico de los peligros sísmicos y la influencia de cuencas sedimentarias (Lindholm, Roth, Bungum, & Faleide, 2005), Análisis de determinístico de riesgos sísmicos para terremotos someros (Moratto, Orlecka-Sikora, Suhadolc, Papaioannou, & Papazachos, 2007), Condiciones del suelo y estabilidad de pendientes en Ormen Lange (Kvalstad, Nadim, Kaynia, Mokkelbost, & Bryn, 2005), Evaluación de las fuentes de activación de mecanismos de deslizamiento (Kvalstad, Andresen, Forsberg, Berg, & Bryn, 2005).

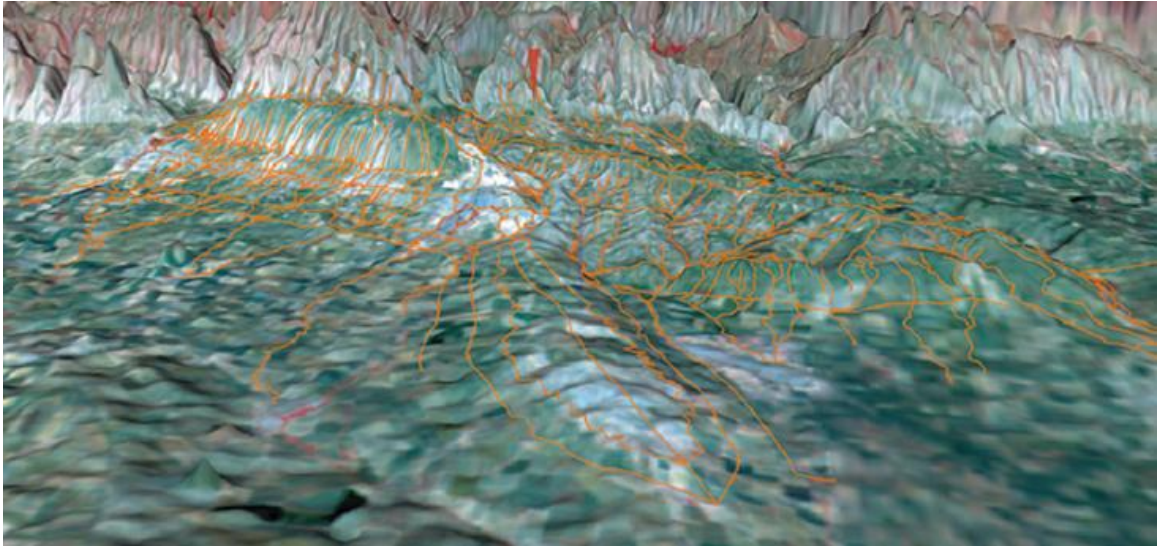
### **5.2.2.2 Respuesta a terremotos in situ y reducción de esfuerzos**

Existe software de modelamiento basado en técnicas de Elementos Finitos para simular el comportamiento 1D (terrenos horizontales o terrenos con pendientes constantes) de los deslizamientos a través del tiempo y teniendo en cuenta la resistencia del material ya sea lineal, no lineal o elastoplástico (NGI, 1991). Este tipo de análisis permite una evaluación de la aceleración de entrada de sedimentos al lecho marino, la estimación de esfuerzos generados y las historias de desplazamiento y sobrecarga de sedimentos en el tiempo. También existen herramientas de modelado que consideran los deslizamientos en un plano bidimensional que se modifica con el tiempo.

En terrenos de pendientes la vibración generada de los terremotos puede provocar deslizamiento de sedimentos y la sobrecarga en las zonas más bajas. La acumulación esta asociada al aumento de esfuerzos de corte y de la presión de poro que pueden conducir a la reducción de la resistencia de corte del suelo durante y después del terremoto. Este tipo de eventos pueden ser simulados por medio de Elementos Finitos en 1D y 2D donde se consideren las deformaciones debidas a esfuerzos cíclicos y acumulación de esfuerzos de corte combinándolos también con datos obtenidos de ensayos de laboratorio para obtener información del comportamiento del lecho marino ante terremotos futuros, la historia de movimientos de sedimentos en el lugar y determinar la resistencia máxima del terreno.

Ejemplos de casos aplicados son los siguientes: Visualización de simulación avanzada de terremotos ver figura 149 (Kellogg, y otros, 2008), estado del arte de terremotos a nivel geotécnico relacionado con las tareas de ingeniería (Finn, 2000) y modelamiento computacional de movilidad cíclica después de la respuesta a la licuefacción del suelo (Elgamal, Yang, & Parra, 2002).

**FIGURA 149: Sistema de caracterización y mapeo del fondo marino para simular el comportamiento en terremotos usando RIM (Real-time Interactive Mapping System)**



Fuente: (Kellogg, y otros, 2008)

### **5.2.2.3 Análisis de estabilidad de taludes**

En pendientes prolongadas, el análisis de talud infinito puede dar un rápido indicio del factor de seguridad contra deslizamientos bajo cargas estáticas de gravedad y cómo se ve afectado por el exceso de presión de poro y la inclinación de la pendiente. Empero, se asume comportamiento plástico ideal, donde el efecto de desnivel local o abultamiento, los esfuerzos de ablandamiento y los efectos del terremoto no se pueden evaluar.

Algunas investigaciones han aportado datos valiosos para la interpretación y estimación de eventos de falla en el fondo marino dentro de los que se encuentran: métodos híbridos para análisis de estabilidad de pendientes (Yu & Batlle, 2011), análisis probabilístico y práctico de estabilidad de taludes (Low, 2003), análisis probabilístico de estabilidad de pendientes usando redes neuronales artificiales

basadas en la respuesta de superficie (Eun Cho, 2009) y Un enfoque probabilístico aplicado a la estabilidad de pendientes (Sultan & Leynaud, 2010).

En la figura 150 se observan el resultado de un modelamiento numérico teniendo en cuenta el factor de seguridad, en la figura a) se muestra un factor de seguridad de 2,49 para el punto medio y en la figura b) de 1,03 para el punto de diseño. Es de rescatar que entre menor sea el factor de seguridad mayor es la probabilidad de eventos de falla.

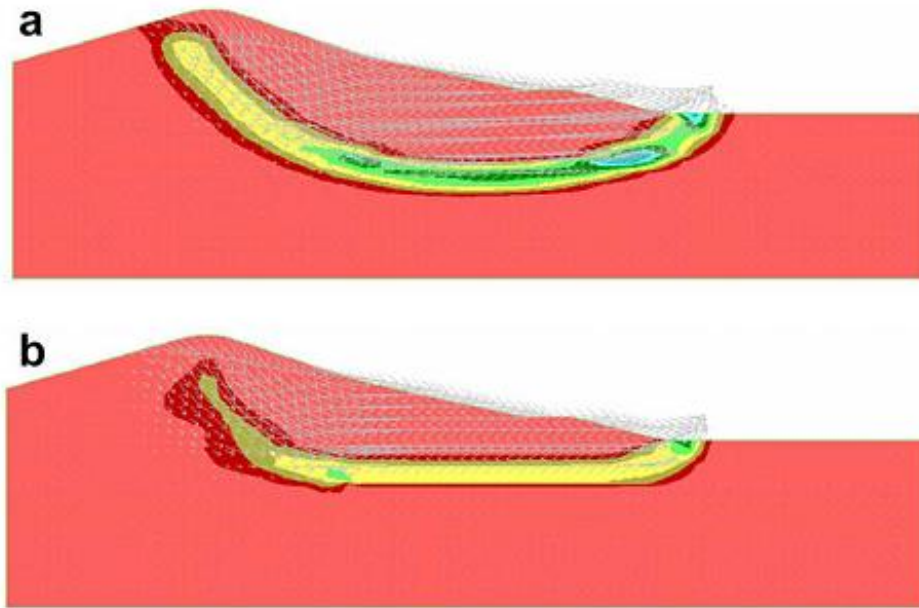
#### **5.2.2.4 Límites de Equilibrio**

El criterio de límites de equilibrio sigue siendo el método de corte más ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad de las pendientes en acantilados. Este método se basa en un comportamiento plástico ideal, pero en este caso permite incluir las variables del terreno, la estratigrafía y los modelos de esfuerzos del suelo. Las cargas estáticas de la superficie se pueden ser aplicadas, simulando los efectos de los mecanismos de activación como caída de rocas, anclajes, apertura de drenajes, etc.

Software más avanzados tienen ahora búsqueda automática o semi-automática para la superficie de deslizamiento crítico, y esto permite una fácil evaluación de la sensibilidad del factor de seguridad a las variaciones en los parámetros de entrada. Actualmente existen varios códigos de los programas comerciales disponibles. Con todo, este no es un modelado físicamente preciso de un proceso dinámico por lo tanto no es el método preferido.

Algunos casos aplicados o investigaciones de límites de equilibrio son: análisis de estabilidad dependientes en las rocas y la utilización de técnicas numéricas avanzadas (Eberhardt, 2003), análisis de límites de equilibrio 2D en la estabilidad de taludes para suelos y rocas (Slides, 2004)

**FIGURA 150 : Resultados de un análisis de estabilidad de taludes.**



Fuente: (Eun Cho, 2009, pág. 7)

#### **5.2.2.5 Análisis de técnicas numéricas como Elementos Finitos**

A través análisis por medio de Elementos Finitos se ha encontrado una amplia aplicación al modelado de la estabilidad de taludes y propósitos geotécnicos a nivel general. Los códigos compuestos por Elementos Finitos se encuentran disponibles y han sido verificados con soluciones rigurosas en la estabilidad de taludes que tienen un comportamiento plástico.

Mediante la técnica de Elementos Finitos se detecta de manera automática los deslizamientos críticos en el fondo marino, los modos de falla, las deformaciones y desplazamiento de sedimentos. Con los avances de la simulación numérica se han desarrollado códigos que permiten reducir los esfuerzos de modelado y el tiempo maquina.

#### **5.2.2.6 Ablandamiento del terreno**

El ablandamiento del terreno es el componente más importante del comportamiento del suelo oceánico en la evaluación de estabilidad de taludes submarinos. No requiere características estándar en software de geotecnia; existen algunos simuladores de Elementos Finitos como PLAXIS y BIFURC que ofrecen soluciones robustas por medio de algoritmos que permiten definir modelos de ablandamiento del terreno incluyendo la anisotropía de esfuerzos. Otros software como FLAC y ABAQUS pueden simular el ablandamiento del terreno, y manejar las condiciones estáticas se sobrecarga a la vez.

El modelamiento del ablandamiento del terreno es indispensable para la adecuación de las instalaciones de perforación en el fondo marino, las técnicas de simulación numérica van de la mano de estos análisis como se muestra los siguientes estudios: implementación de elementos finitos para el modelado del ablandamiento del terreno (Wang, Zheng, Chunguang, & Ge, 2011), Avances recientes in geotecnia en costa afuera para aguas profundas en la explotación de petróleo y gas (Randolph, Gaudin, Gourvenec, White, Boylan, & Cassidy, 2011).

#### **5.2.2.7 Análisis de fallas progresivas**

Cuando los modelos de ablandamiento del material ya han sido incorporados al análisis determinístico, las fallas progresivas su pueden modelar y evaluar teniendo en cuenta los modos de falla que se pueden presentar en el lugar.

El ablandamiento del terreno esta ligado a los distintos tipos de esfuerzos que se presentan en la zona, los cuales pueden ser por sobrecarga de sedimentos, por concentración de esfuerzos de surgencias del subsuelo o por esfuerzos inducidos. Los deslizamientos progresivos se presentan dependiendo de la fragilidad del terreno y la distribución de los esfuerzos.

Un reporte dado por el instituto geotécnico de Noruega en 2005 muestra los distintos tipos de análisis numéricos que se pueden desarrollar para el modelamiento y análisis determinístico de fallas progresivas (NGI, Offshore

geohazards Summary Report Research institution-based strategic project 2002 - 2005), otros estudios relacionados son: La relación entre los domos salinos, las fallas del subsuelo y la geomorfología del lecho marino (Orange, y otros, 2003), modelamiento numérico de mecanismos de falla en arcillas blandas y sensibles aplicado a Geohazards en costa a fuera (Andresen & Jostad, 2005), evaluación de fuentes de activación de fallas y mecanismos de deslizamientos (Kvalstad, Andresen, Forsberg, Berg, & Bryn, 2005) y análisis de fallas progresivos en pendientes naturales extensas (Andresen & Jostad, 2004).

En la figura 151 se muestra la malla generada de un modelamiento numérico con Elementos Finitos donde se consideran la inclinación del terreno, el ablandamiento del material y la formación de bandas de cizallamiento (Kvalstad, Andresen, Forsberg, Berg, & Bryn, 2005).

#### **5.2.2.8 Análisis de deslizamientos retrogrado**

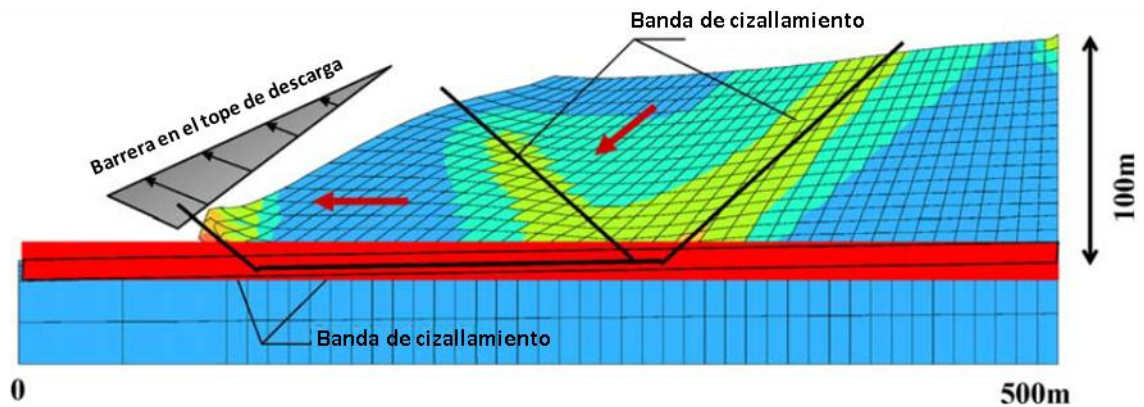
Con el aumento y desarrollo de deslizamientos progresivos, el desplazamiento de sedimentos aumenta con el tiempo, y la dinámica de los deslizamientos puede pasar de ser un proceso lento o cuasi-estático a un proceso de cambio continuo en el tiempo. Si la movilidad de sedimentos es muy alta el proceso de deslizamiento puede convertirse en un deslizamiento retrogrado.

En la figura 152 se muestra un modelo de simulación dinámica para deslizamientos retrógrados basado en modelos de cuñas múltiples donde se pueden determinar como cambia la morfología del fondo marino en un periodo de tiempo determinado.

A continuación se mencionan estudios recientes relacionados al deslizamiento de retrogrado y su aporte en el análisis determinístico de la estimación de riesgos: estabilidad de pendientes en Ormen Lange (Kvalstad, Gauer, Kayina, & Bryn, 2002), La relación entre los domos salinos, las fallas del subsuelo y la geomorfología del lecho marino (Orange, y otros, 2003), evaluación de fuentes de activación de fallas y mecanismos de deslizamientos (Kvalstad, Andresen,

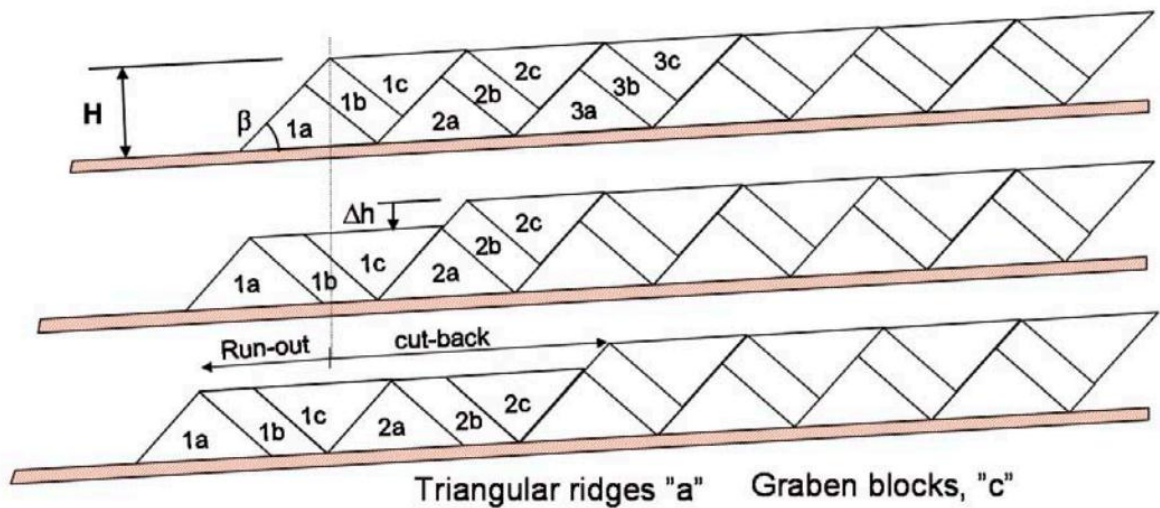
Forsberg, Berg, & Bryn, 2005), explicación de los deslizamientos (Bryn, Berg, Forsberg, Solheim, & Kvalstad, 2005)

**FIGURA 151: Malla generada del modelamiento numérico de deslizamientos progresivos.**



Fuente: modificada de (Kvalstad, Andresen, Forsberg, Berg, & Bryn, 2005)

**FIGURA 152: Modelo de simulación dinámico para deslizamientos retrogrados**



Fuente: modificada de (Kvalstad, Andresen, Forsberg, Berg, & Bryn, 2005)

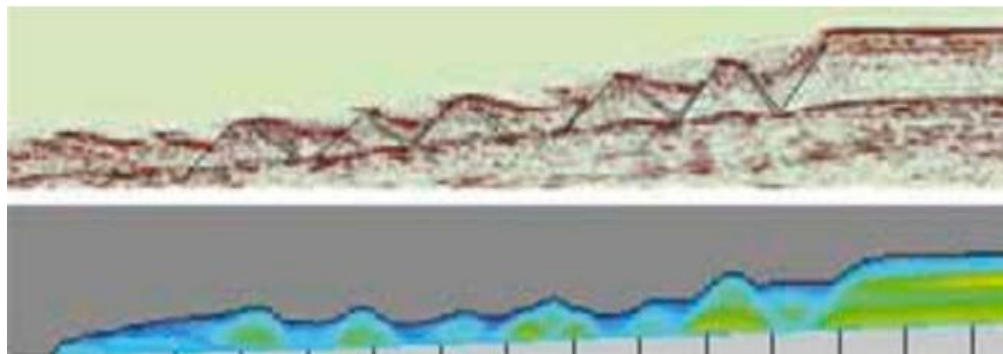
### 5.2.2.9 Análisis computacional de la dinámica de fluidos.

La dinámica de fluidos también se puede simular de acuerdo a las características de estos, generalmente se asume que es un fluido que cumple con las especificaciones de un fluido de Bingham donde se considera la resistencia de corte y la viscosidad.

Existen software de modelado del comportamiento del fluido y la interacción con los sedimentos del suelo. En estos simuladores se debe considerar la resistencia del suelo, los bloques hundidos, los bloques levantados y las bandas de cizallamiento, una de las aplicaciones de modelado es caracterizar las direcciones, cantidad de flujo y dirección de las corrientes de turbiditas.

En la figura 153 se muestra una un modelo dinámico de un proceso de deslizamiento retrogrado, comparado con la interpretación de un perfil sísmico.

**FIGURA 153: Modelo de deslizamiento dinámico comparado con modelo de interpretación sísmica.**



Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

### 5.2.3 Análisis probabilístico

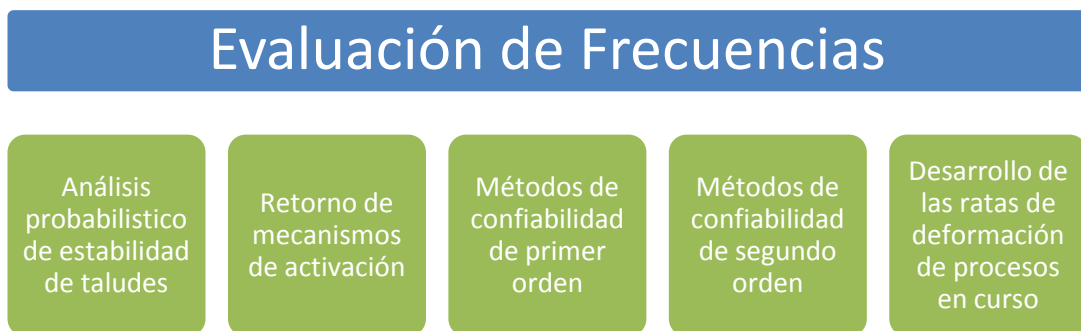
Los análisis probabilísticos son necesarios para establecer estimativos de la frecuencia la frecuencia de ocurrencia de escenarios de falla. Algunos estudios

desarrollados hasta el momento como análisis de riesgos geológicos son: estudios para el proyecto Atlantis/Mad Dog en el escarpe de Sigsbee (Nadim, Kronic, & Jeanjean, OTC 15203 Probabilistic Slope Stability Analyses of the Sigsbee Escarpment, 2003), y el proyecto del campo Ormen Lange ubicado en el escarpe de Storegga (Bryn, Berg, Forsberg, Solheim, & Kvalstad, 2005) donde sea analizado el comportamiento de los escarpes por medio de análisis probabilísticos.

La evaluación de las frecuencias debe ser determinada por medio del esquema mostrado en la figura 154.

En la evaluación de frecuencias se debe tener en cuenta la probabilidad de fallo del sistema como un todo, por tal razón se debe estimar la incertidumbre que aporta cada variable al modelo general el cual tendrá un factor determinado de confiabilidad que a su vez da una idea de la probabilidad de ocurrencia de eventos de fallo.

**FIGURA 154: Esquema de evaluación de frecuencias por medio de un análisis probabilístico.**



Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

#### 5.2.4 Probabilidad anual de falla

En el análisis de probabilidad anual se tiene en cuenta el método de confiabilidad de primer orden que consiste en determinar la probabilidad de falla inmediata del sistema si se construyera en el momento. En esta interpretación se tienen en cuenta factores humanos en el fondo marino como presas de tierra y terraplenes para instalar equipos en fondo marino y factores ambientales, por lo tanto este análisis no es complejo.

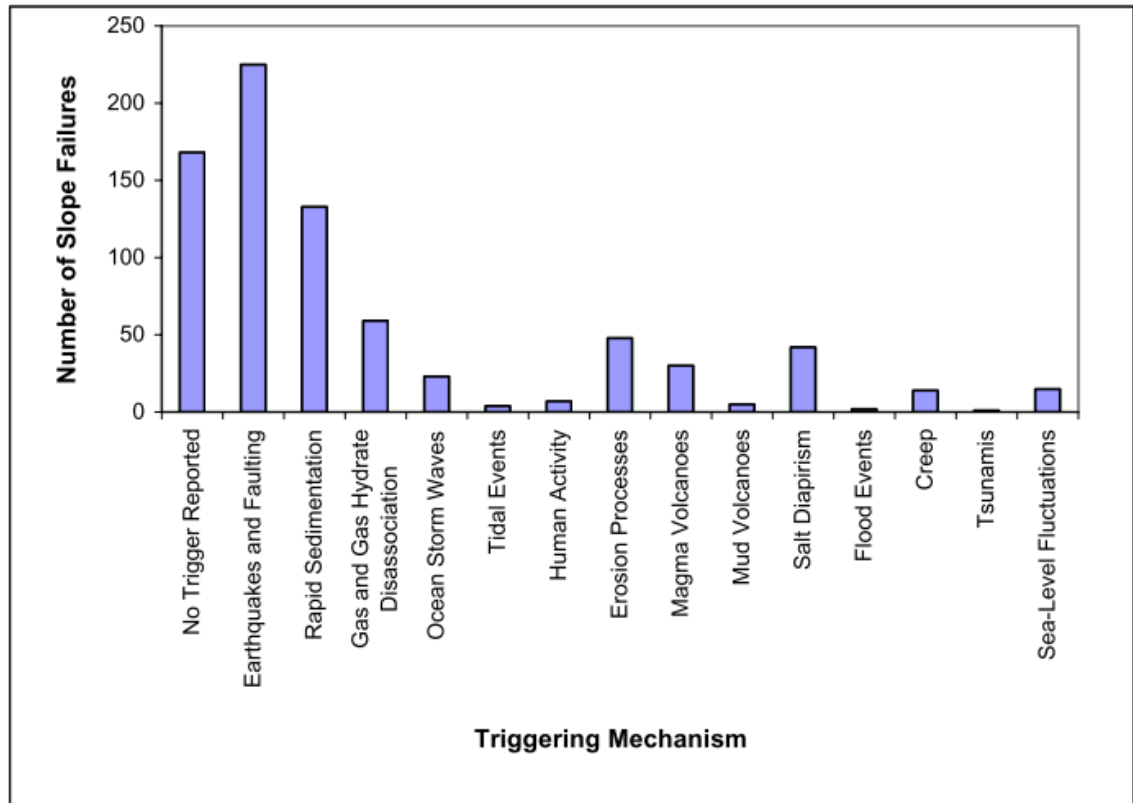
Si no existiera ninguna probabilidad de ocurrencia de fallo inmediato en el sistema, el resultado obtenido del método de confiabilidad de primer orden sería de cero, sin embargo el método de confiabilidad de primer orden solo da una idea de la probabilidad de fallo al inicio del proyecto y no de la probabilidad anual.

Existen dos mecanismos de activación: los **eventos al azar** como los terremotos y las ondas de carga y descarga, y los eventos de activación que se **desarrollan de manera lenta** como la deposición de sedimentos, la activación de fallas o el desplazamiento de diapiros.

Distintos análisis e investigaciones se han desarrollado para analizar y caracterizar el comportamiento de los deslizamientos ocurridos en el fondo marino están fuertemente relacionados los fenómenos de exceso de presión en el subsuelo dentro de los que se destacan los siguientes: mecanismos de activación de movimientos en el fondo marino (Feeley, 2007), mecanismos sísmicos de activación de deslizamientos submarinos (Nadim, Biscontin, & Kaynia, OTC 18911 Seismic Triggering of Submarine Slides, 2007), Estabilidad de taludes submarinos (Hance & Wright, 2003), cuantificación de riesgos asociados a la inestabilidad del fondo marino en Ormet Lange (Nadim, Kvalstad, & Guttormsen, 2005) y análisis probabilístico de estabilidad de taludes en el escarpe de Sigsbee (Nadim, Kronic, & Jeanjean, 2003).

En la figura 155 se observa el número de fallas ocasionadas por los distintos mecanismos de activación.

**FIGURA 155: Distribución de mecanismo de activación**

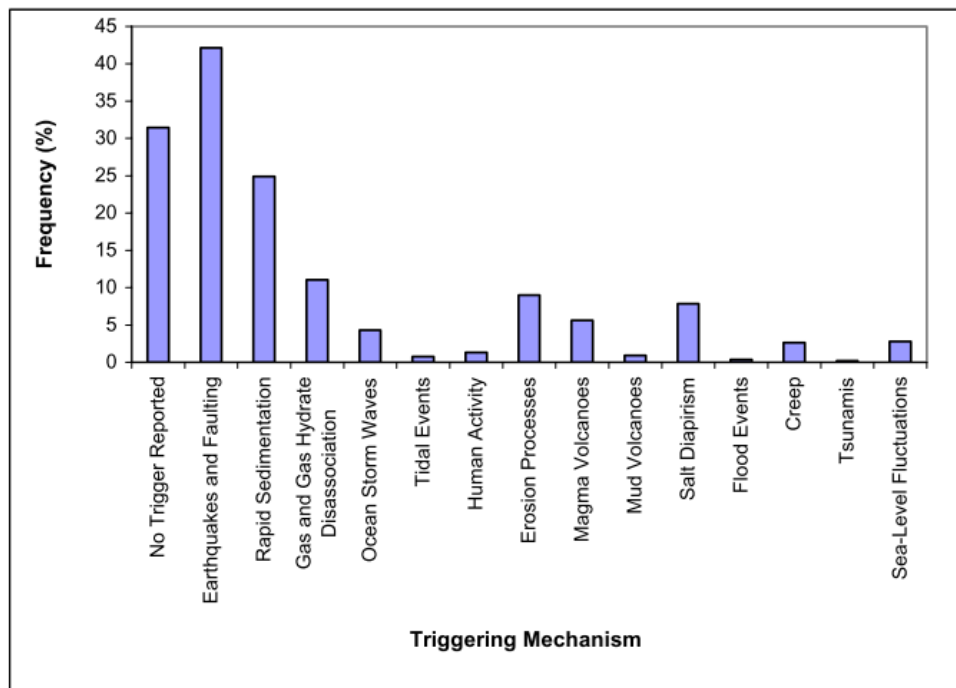


Fuente: (Hance & Wright, 2003)

El estudio realizado en la Universidad de Texas y publicado por Offshore Technology Research Center en 2003 muestra que la mayoría de los deslizamientos en el fondo marino ocurren en latitudes entre 20-40 °N, longitud entre 80-40 °S; la mayoría de los deslizamientos y flujo de sedimentos se dan para pendientes entre 2-8 grados de inclinación, los deslizamientos son más frecuentes para espesores entre 4-40 metros de espesor, y para masas con volumen menores a 0,1 m<sup>3</sup>, de igual forma los deslizamientos ocurren más frecuentemente a menores columnas de agua (entre 0-2500 metros) y en suelos de tipo arcilloso más que en limo, arena o grava.

La distribución de frecuencias de mecanismos de activación se muestra en la figura 156 donde se observa que al igual que el número de eventos los mecanismos de activación de terremotos y fallas son los que mas aportan los deslizamientos del fondo marino.

**FIGURA 156: Distribución de frecuencias de los mecanismos de activación de fallas.**



Fuente: (Hance & Wright, 2003)

Como resultado en la tabla 12 se muestra un resumen de las frecuencias de ocurrencias donde se mencionan los límites máximos y mínimos de ocurrencia, los valores medio y los valores más probables de acuerdo a los datos analizados.

Una buena evaluación y definición del sistema permite establecer los métodos de control adecuados, puesto que se tiene una idea clara de lo que se desea controlar, Un estudio de la evaluación del impacto de movimientos de masas

submarinas en el desarrollo del fondo marino muestra los distintos movimientos que se pueden presentar y la forma de evaluar cada uno de ellos dentro de una metodología de análisis de riesgos geológicos someros (Thomas, Hooper, & Clare, 2010).

**Tabla 12: Características en las cuales se presentan los deslizamientos en el fondo marino de acuerdo a la base de datos hasta 2003**

Características	Unidad	Máximo	Mínimo	Valor medio	Valor más probable
Distancia de agotamiento	Kilómetros	850	0.04	8	41
Espesor del deslizamiento	Metros	4,500	< 1	50	141
Área total influenciada	km <sup>2</sup>	88,000	< 1	200	3,600
Volumen del deslizamiento	km <sup>3</sup>	20,331	0.000006	3.5	354
Angulo de la pendiente de falla	Grados	45	0,22	4.0	5.8
Profundidad de agua superficial	Metros	4,300	0	1000	1,125
Profundidad en aguas profundas	Metros	6,700	8	1750	1,868

Fuente: (Hance & Wright, 2003)

### 5.3 ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS

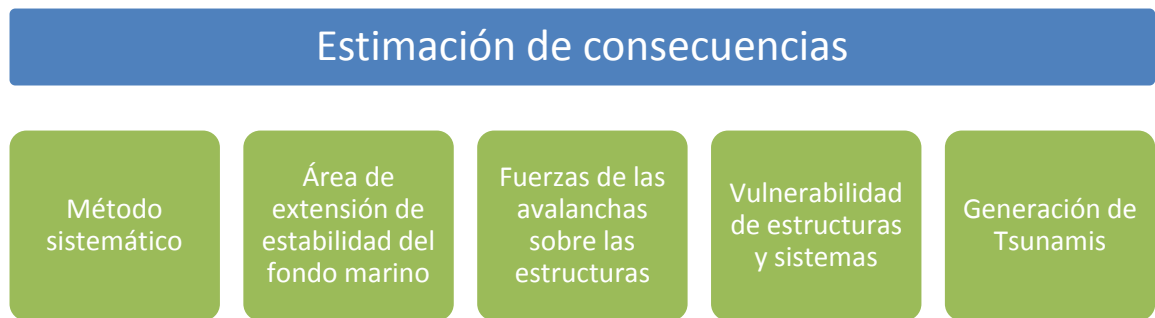
En la estimación de consecuencias se deben considerar varios parámetros para hacer un buen análisis de riesgos, los parámetros más importantes se muestran en la figura 157.

Las consecuencias típicas de los riesgos asociados a la inestabilidad del fondo marino y los riesgos geológicos someros son:

- Pérdida de los anclajes de la plataforma en el fondo marino o inestabilidad o daño a las líneas de soporte, lo que puede generar el hundimiento de la plataforma.

- Daño estructural a los elementos de cimentación, estructuras y tuberías submarinas como el cizallamiento, el pandeo y la deformación y la flexión; causado por el impacto de escombros de avalanchas.
- Daños al pozo durante la perforación y la producción.
- Entierro de las instalaciones del lecho marino por el deslizamiento de sedimentos y las avalanchas.
- Colapso total y grandes deslizamientos de las instalaciones de campo ubicadas en los principales eventos de deslizamientos.

**FIGURA 157: Esquema de estimación de consecuencias por medio de un análisis probabilístico.**



Fuente: (Kvalstad T. J., OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow, 2009)

### 5.3.1 Método sistemático

Las consecuencias potenciales de los escenarios de falla deben ser estimados desde el punto de vista ingenieril, HSE y económico. Una recopilación sistemática del daño estimado versus la probabilidad estimada de ocurrencia es necesaria para cada uno de los escenarios de falla para evaluar los riesgos geológicos acumulativos. Existen diferentes metodologías que pueden ser aplicadas para evaluar los riesgos potenciales.

### **5.3.2 Área de extensión de estabilidad del fondo marino**

La distancia al lugar de las instalaciones a los deslizamientos de sedimentos, avalanchas y deslizamientos retrógrados es un factor importante a considerar en el análisis de consecuencias. Es de rescatar que los deslizamientos deben ser caracterizados con métodos existentes y sin descartar la influencia del agua en el aumento de movimiento y disminución de la resistencia del terreno y basados en casos aplicados, pero aun no se tienen conclusiones y recomendaciones estrictas al respecto.

Los estudios de batimetría el modelamiento numérico comprenden las herramientas mas utilizadas para estimar el comportamiento de los deslizamientos.

### **5.3.3 Fuerzas de las avalanchas sobre las estructuras**

Las instalaciones ubicadas bajo la influencia de las avalanchas deben estar diseñadas para resistir el impacto, y las fuerzas de arrastre de éstas. El modelamiento de las avalanchas y de las fuerzas de arrastre se dio inicialmente por medios modelos de elementos cilíndricos, pero posteriormente se han realizado pruebas teniendo en cuenta el comportamiento con bajas velocidades y bajas ratas de deformación del terreno. Algunos códigos de modelamiento numérico se han desarrollado para hacer simulaciones estáticas y dinámicas (Kvalstad T. J., 2007), (COFS, 2010).

Las fuerzas de arrastre se incrementan rápidamente con el aumento de la velocidad y el espesor de los sedimentos arrastrados, situación que puede dañar hasta las barreras construidas; es de rescatar que se han presentado varios accidentes debido a la falta de atención en este aspecto, puesto que el diseño de las instalaciones muchas veces se limita al análisis de la resistencia del suelo y a los eventos de fallas por riesgos geológicos someros y no a los eventos como deslizamientos y flujos de turbaditas.

### **5.3.4 Vulnerabilidad de estructuras y sistemas**

La evaluación de la capacidad estructural y la vulnerabilidad de estructural de equipos y sistemas instalados en el fondo marino sometida distintas cargas y eventos geológicos es un eslabón necesario para establecer los criterios de falla y la gravedad de los potenciales daños y así estimar el riesgo asociado a las instalaciones y al proyecto de perforación.

### **5.3.5 Generación de Tsunamis**

Deslizamientos ocurridos en pendientes extensas pueden generar ondas de tsunamis. La altura de las olas depende de la profundidad de la columna de agua, el volumen transportado, la forma de la pendiente por donde se deslizan las masas y el desarrollo de la velocidad y la aceleración. Los eventos presentados en aguas profundas no generan atención importante en cuanto a los movimientos de las olas en superficie del mar por lo tanto no afecta sustancialmente la flotabilidad de plataformas ni buques. Sin embargo para eventos ocurridos en columnas de agua poco significativas los deslizamientos en el fondo marino pueden generar situaciones devastadoras a nivel del mar.

Un deslizamiento ocurrido en Storegga generó un tsunami que dejó depósitos de más de 10 metros sobre el nivel del mar en el oeste de Noruega y más de 20 metros sobre el nivel del mar y más de 20 metros en las islas de Shetland (Bondevik, Løvholt, Harbitz, Mangerud, Dawson, & Svendsen, 2005). Las consecuencias de este evento fueron probablemente catastróficas para las zonas costeras. Análisis de tsunamis pueden dar estimaciones de las variaciones del nivel del mar a lo largo del área costera y en el área del campo frente a las características del deslizamiento (Løvholt, Harbitz, & Haugen, 2005).

#### **5.4 EVALUACIÓN DE RIESGOS**

Los riesgos asociados a peligros de tipo geológico deben ser incluidos en la evaluación de riesgos del proyecto en general. Si la contribución del riesgo es considerable y no esta dentro de los criterios aceptables se debe buscar y adoptar medidas de reducción de riesgos. En zonas con riesgos potenciales significativos de deslizamientos o fenómenos asociados e eventos de falla en general se buscan alternativas como la reubicación de pozos, estructuras y tuberías a zonas de menor peligro o si los riesgos son a nivel somero se buscan alternativas de perforación direccional (Kvalstad T. J., 2007).

La calificación de altos niveles de riesgo asociados a Shallow Hazards pueden estar asociados a altos niveles de incertidumbre por la pobre caracterización del subsuelo, en este caso se deben hacer investigaciones adicionales con el fin de conocer la parte estructural y reducir la incertidumbre.

Los riesgos humanos inducidos pueden ser reducidos mediante una cuidadosa planeación desde la parte ingenieril con el animo de minimizar efectos de riesgos inducidos (Kvalstad T. J., 2009).

La norma NORSOK Z-013 trae formularios normalizados que constituyen la base de la gestión de riesgos para mantener el desarrollo de las mejores prácticas operacionales. En esta norma se encuentra una evaluación integral incluyendo glosario de términos, sin embargo existen estudios adicionales que ayudan a complementar la evaluación de riesgos.

Es importante tener en cuenta cada uno de los parámetros en la evaluación de riesgos para incluir la incertidumbre de las variables de entrada, las propiedades del suelo y el comportamiento de los materiales a evaluar.

El objetivo de la evaluación de riesgos geológicos someros es identificar todas las posibles limitaciones generadas por el hombre y los eventos de peligros geológicos que pueden afectar la integridad operativa, generar perdidas humanas

y posibles daños medioambientales; la evaluación debe hacerse para determinar los métodos apropiados de mitigación y manejo de los riesgos previamente identificados (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

La evaluación de riesgos en aguas profundas se hace más exigente, e incluso de debe evaluar el comportamiento del fondo marino a grandes distancias del pozo puesto que puede verse afectado por la dinámica de deslizamientos u surgencias en zonas cercanas.

La evaluación de riesgo geológico comprende los eventos en la superficie marina, los eventos en el suelo marino, las características del subsuelo al menos a 2500 metros de profundidad a partir del lecho marino y los eventos artificiales que son los asociados a fallas humanas.

Existen otras metodologías de evaluación de riesgos que igualmente son muy validas y utilizadas en la industrial del petróleo aplicado a proyectos de perforación offshore, algunas de estas son: prácticas recomendadas para el diseño y análisis de riesgos en la instalación de facilidades de producción en costa afuera (API RP 14J, 2005), guía para la evaluación de riesgos de las instalaciones en costa afuera (HSE Hazardous Installations Directorate, 2006), guía y herramientas técnicas de identificación de peligros y evaluación de riesgos en las instalaciones de producción en costa fuera para la industria del gas natural y el petróleo (BS EN ISO, 2002).

#### **5.4.1 Evaluación de riesgos geológicos a nivel del mar**

A nivel del mar la evaluación de riesgos se limita al análisis de mareas, la dinámica de las corrientes oceánicas, las mareas altas, los ciclones y posibles tsunamis, para los cuales se puede encontrar información en las agencias nacionales e internacionales marinas.

#### **5.4.2 Evaluación de riesgos geológicos en fondo marino**

Una vez identificados los riesgos por medio de estudios de batimetría y sísmica para determinar las características del fondo marino, su morfología y los riesgos allí presentes se hace la respectiva evaluación.

Los principales riesgos que se encuentran en el fondo marino están asociados a escarpes de falla, expulsión de fluidos del subsuelo, conductos de ventilación de gas, inestabilidad del terreno, escarpes, flujo de turbiditas y lóbulos de lodo, saltos, ondas de arena, volcanes de lodo, afloramientos, disociación de hidratos de gas, características de colapso del terreno, mantenimiento de la flora marina en cuanto a arrecifes entre otros.

La correcta evaluación de estos riesgos me permite elegir el tipo adecuado de equipos, anclajes y herramientas a utilizar en el fondo marino, la ubicación del pozo, e incluso el tipo de plataforma a utilizar.

Para aguas profundas donde la columna de agua sea mayor a 1300 pies se debe evaluar las comunidades quimiosintéticas y las ventanas de hidratos de gas para mantener la estabilidad de la plataforma y o alterar la dinámica medioambiental (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

#### **5.4.3 Evaluación de riesgos geológicos a profundidades someras**

Los riesgos geológicos someros son identificados por medio de estudios de sísmica y de registros eléctricos, también se debe considerar la información de campos o pozos cercanos. Las fallas en someras deben ser caracterizadas para evitar problemas con la salida de fluidos sobrepresionados, que pueden causar explosiones y pérdidas de los equipos del fondo marino e incluso daños considerables en la plataforma. Es importante caracterizar otros tipos de riesgos geológicos someros sobre todo en aguas profundas como depresiones, canales enterrados y domos salinos (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

Los flujos de gas somero (SGF) representan un peligro significativo por asociarse a las patadas de gas y las explosiones además de la pérdida de boyancia de la plataforma, por lo tanto debe ser evaluado correctamente (Flores Jr, Garner-Boots, & Scarborough-Boots, 2007).

Los flujos de agua somera generalmente se presentan en aguas profundas (columnas de agua mayores a 1000 pies) y a profundidades entre 950 y 2000 pies a partir del nivel del mar. Los flujos de agua somera que no se identifican de manera adecuada pueden convertirse en problemas de integridad del pozo, colapso de las sartas de perforación o revestimiento, salida de fluidos incontroladamente a la plataforma e incluso pérdida del pozo o pérdidas humanas.

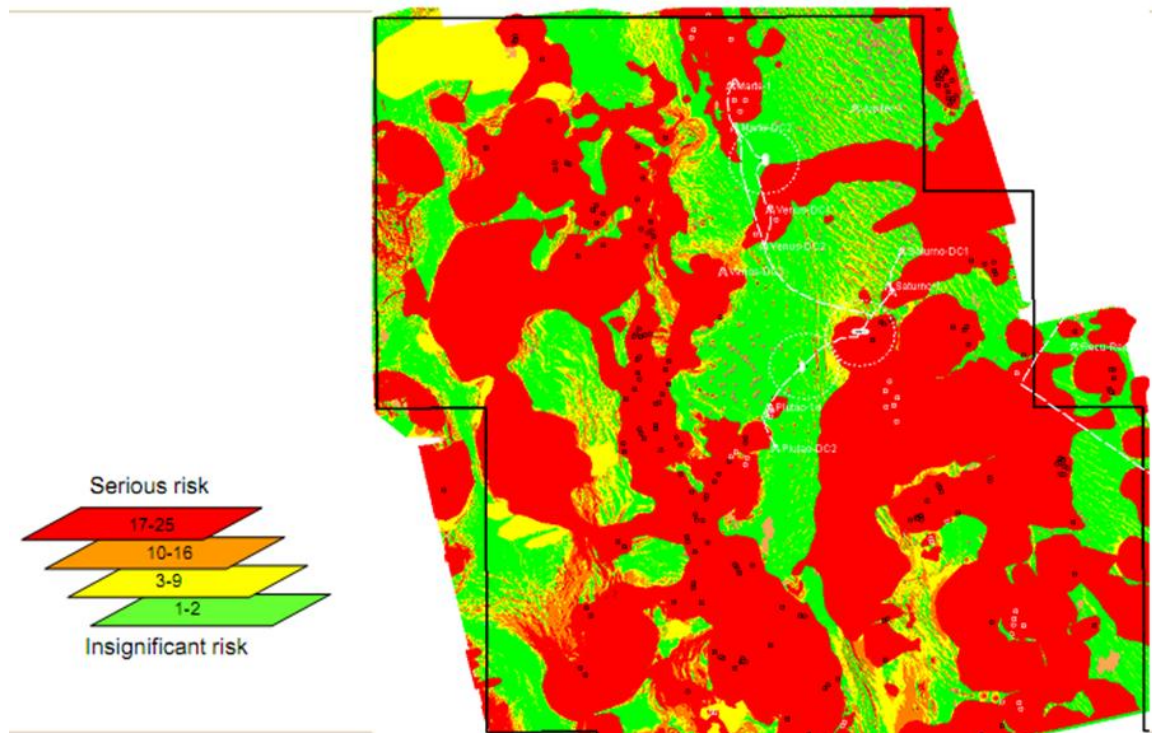
Los hidratos de gas se presentan a pocas profundidades del lecho marino, pero en columnas de agua generalmente mayores a 2000 pies donde se dan las condiciones de altas presiones y bajas temperaturas, estos eventos pueden estar asociados a las ventanas de gas, pérdida de resistencia del terreno, pérdida de boyancia de la plataforma y otros aspectos que deben ser evaluados como la emisión de gases de invernadero.

Finalmente lo que se busca es elaborar mapas que ayuden a determinar los puntos de mayor interés en cuanto al control y mitigación de riesgos, la figura 158 muestra un mapa de riesgos en el cual el color rojo representa un riesgo serio o muy considerable, mientras que el color verde representa un riesgo insignificante (Wardlaw & Salisbury, 2010).

#### **5.4.4 Evaluación de riesgos artificiales**

La correcta caracterización de todos los riesgos geológicos presentes en el área es de gran ayuda para reducir los riesgos humanos, por lo tanto es indispensable hacer estudios por medio de métodos geofísicos como sísmica de ondas de corte, muestreo y análisis de laboratorio del terreno, herramientas sísmicas, perfiles de pozos, métodos físicos y métodos numéricos (NGI, Offshore geohazards Summary Report Research institution-based strategic project 2002 - 2005, 2005).

**FIGURA 158: mapa de riesgos para shallow hazards**



Fuente: (Wardlaw & Salisbury, 2010)

Con los datos obtenidos de la caracterización de los riesgos identificados se recomienda hacer arboles de decisión para no perder detalles en la evaluación de riesgos humanos (Stauffer, Ahmed, Kuzela, & Smith, 1999).

## **6 CONTROL, MITIGACIÓN Y MANEJO DE RIESGOS GEOLÓGICOS**

El control, la mitigación y el manejo de riesgos geológicos asociados a la perforación offshore se realiza para riesgos identificados, analizados, estimados y evaluados. Aquellos riesgos a los que se consideran que no cumplen con los criterios de aceptación de riesgos después del análisis por la matriz de riesgos se deben controlar, mitigar y manejar si la calificación lo permite. Sin embargo todo riesgo que tenga calificación intolerable no se puede controlar, por lo tanto esa actividad no se debe realizar, puesto que representa pérdidas significativas ya sea para la empresa, el medio ambiente o el personal.

Dentro del control, mitigación y manejo de riesgos se pueden considerar muchas alternativas, las cuales pueden ser controles que ataquen la fuente, controles o controles en el medio ambiente y equipos para evitar daños en la operación de perforación como tal (NORSOK, 2001).

En la literatura existen metodologías que se pueden adoptar para el control, mitigación y manejo de riesgos geológicos, pero todas apuntan a hacer una correcta estimación y evaluación de los riesgos para poder implementar las medidas correctivas adecuadas y llevar la situación a la normalidad.

En muchos casos los controles se deben hacer de manera muy rápida o a mediano plazo, en cualquiera de los dos casos se debe tener una planificación previa para tener disponibilidad de recursos e implementar los métodos de control de riesgos.

Casos indeseados se pueden presentar como blowouts provocados por flujos de gas somero que pueden convertirse en incendios de las instalaciones de superficie, todos estos eventos deben estar previstos, por lo tanto parte de la mitigación y el control es contra con equipos de detección de gases para alertar oportunamente al personal y reducir la probabilidad de incendios. También se debe contar con sistemas de detección de incendios, para identificar y localizar el área de inicio de la ignición para evitar que se propague, limitar el área de afectación y propagación, y extinguirlo finalmente.

Otras medidas de control en caso de un evento de salida de fluidos sobrepresionados es la instalación ya activación de barreras físicas para impedir la salida del fluido a superficie, sin embargo, como medida de mitigación y aseguramiento el personal a cargo del control del evento debe evacuar las instalaciones y la cercanía a estas donde exista riesgo de fatalidades.

Todas las medidas adoptadas a raíz de eventos peligrosos que van desde los primeros pasos de mitigación y control a través de la búsqueda de condiciones seguras para el reestablecimiento de la operación a su estado normal se denomina respuesta de emergencia o medidas de preparación para emergencias.

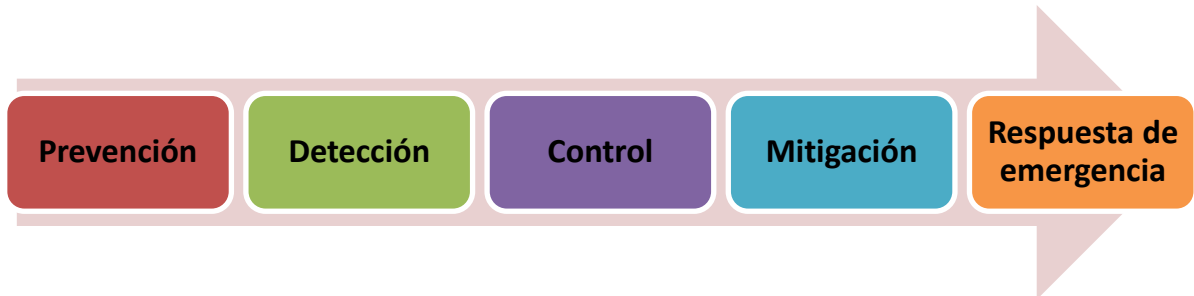
En muchos casos, las medidas para mitigar y controlar los riesgos y peligros son simples y obvios aunque implique pequeños cambios para que la operación reduzca el riesgo y vuelva a su curso habitual. En otros se deben buscar medidas alternativas para reducir el riesgo a través de medidas adicionales que disminuyan el nivel de incertidumbre de las operaciones (BS EN ISO, 2002).

El procedimiento de reducción de riesgos se presenta en la figura 159.

En el control de riesgos es importante considerar una amplia gama de soluciones posibles ante peligros específicos, y no asumir que el riesgo no se sale de los rangos mínimos suponiendo que las modificaciones físicas es el medio más adecuado para controlar y mitigar los riesgos. Por ejemplo, es fundamental buscar

la mayor cantidad posible de controles viables desde el punto de vista tecnico y economico para reducir la frecuencia de los peligros y la exposición a los mismos (BS EN ISO, 2002).

**FIGURA 159: pasos a tomar dentro del procedimiento de reducción de riesgos geologicos someros.**



Fuente: modificada de (BS EN ISO, 2002)

Siempre el control y la mitigación deben evitar ser usados mediante las medidas de prevención que estan encaminadas a reducir todo tipo de riesgos para evitar desastres naturales. El uso de principios de diseño inherentemente mas seguros se aplica a la reducción de riesgos, los conceptos de este diseño se muestran en la figura 160.

**FIGURA 160: Conceptos un diseño inherentemente seguro.**

Reducción	Sustitución	Atenuación	Simplificación
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tiempo de exposición</li> <li>•Frecuencia</li> <li>•situaciones de riesgo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cambio de materiales peligrosos por otros menos peligrosos o de mejor calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Limitar la exposición al mínimo.</li> <li>•Trabajar a menores presiones y temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Equipos con mejoras tecnologías.</li> <li>•Reducir las fallas humanas</li> </ul>

Fuente: modificada de (BS EN ISO, 2002)

En la reducción de riesgos se busca aplicar medidas de restringir la escala de riesgo del evento, proteger el recurso humano y normalizar la condición a un estado anterior. En la plataforma deben existir sistemas de detección de gases y de incendios además de sistemas de agua contraincendio. También se deben tener sistemas pasivos y activos de protección contra el fuego, refugios temporales, sistemas de evacuación, equipos y procedimientos de limpieza y recolección de crudo, ropa de protección, entre otros factores indispensables para garantizar las mínimas medidas de protección del personal y del medio ambiente.

La tabla 13 muestra los factores que influyen en la selección de medidas para reducir el riesgo.

Las primeras medidas a implementar son aquellas que requieran menor esfuerzo y contribuyan a una reducción significativa del riesgo, todo el tiempo se deben implementar medidas para llevar el riesgo a un nivel tan bajo como sea prácticamente posible.

**Tabla 13: Factores que influyen en la selección de medidas de reducción de riesgos.**

<b>Viabilidad técnica de la medida de reducción de riesgos</b>	<b>La contribución de la medida en la reducción de riesgos</b>	<b>Los costos y el riesgo asociado a la aplicación de la medida</b>	<b>El grado de incertidumbre asociado al riesgo, la técnica de reducción de riesgos y los factores humanos</b>
--	--	---	--

Fuente: modificada de (BS EN ISO, 2002)

La adopción de medidas de reducción de riesgos debe ser propuesta por personal experto en el área para tomar decisiones razonables, pues en algunas ocasiones desde el punto de vista técnico económico es más viable abandonar el proyecto que hacer los respectivos controles.

Un método de reducción de riesgos ampliamente utilizado es el de evaluar el esfuerzo y el costo involucrado en una serie de diferentes medidas de reducción

del riesgo y estimar el efecto de reducción de cada riesgo. Al evaluar cada riesgo por separado se pueden encontrar los riesgos que aportan más a la reducción de riesgos y es económicamente favorable, además se pueden hacer análisis de la relación costo beneficio.

La evaluación de las medidas de reducción de riesgos siempre debe estar basada en los principios de ingeniería y en el sentido común. Otros aspectos considerados en la implementación de medidas de control y mitigación del riesgo son las circunstancias locales, los conocimientos científicos y técnicos relativos a la situación en particular, los costos y los beneficios estimados.

En la norma ISO 13702 se mencionan estrategias que conllevan a un mejor control y mitigación de riesgos, pero en últimas lo que se busca es reducir el riesgo lo máximo posible siempre y cuando estas medidas de reducción tengan viabilidad económica y técnica y este control está enmarcado en el criterio de rechazo en la después de una evaluación del riesgo (ISO 13702, 1999).

Los flujos de gas somero son los principales causantes de las patadas de pozo y de las salidas incontroladas de fluidos, estas salidas también conocidas como Blowouts son uno de los riesgos más comunes en los proyectos offshore y los que han generado gran parte de los desastres ambientales y fatalidades humanas. Por lo tanto el control es fundamental.

Algunos métodos a tener en cuenta en la perforación offshore cuando se ha identificado flujos de gas somero son:

- **Prevenir la patada:** Se predice el comportamiento de la presión con la profundidad de acuerdo a la sísmica, los registros y el modelamiento numérico.
- **Cerrar el pozo:** este método o decisión se toma como último recurso para evitar situaciones no deseadas en la plataforma.

- **Pozos piloto:** la implementación de pozos piloto de menor diámetro que el del pozo normal (diámetros entre 8,5 y 12,25 pulgadas) para evitar la salida de mucha cantidad de gas y posteriormente de amplia el pozo ya conociendo las condiciones de presión.
- **Patadas dinámicas:** es una técnica que busca liberar energía de manera controlada durante la patada por medio de la fricción en el pozo, esta técnica es más aplicada para pozos profundos y de diámetros menores a 9,875 pulgadas.
- **Aumentar peso al lodo:** enviar baches de lodo de mayor peso para contrarrestar la presión del flujo de gas, sin embargo hay que tener en cuenta que si es a pocas profundidades no demora mucho en llegar, por lo tanto se debe determinar rápidamente la tasa de bombeo de lodo y el peso de este que depende de la capacidad de las bombas.
- **Patadas dinámicas y peso del lodo:** es una técnica de combinar el aumento del peso del lodo y la liberación dinámica de energía una práctica recomendada, pero tiene las limitaciones de los dos métodos (Adams & Kuhlman, 1990).

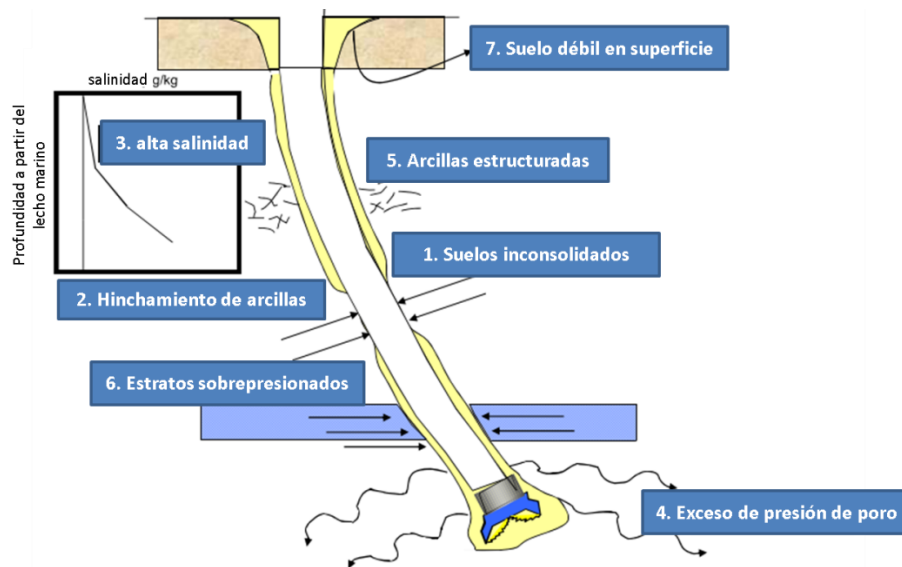
Si se ha identificado previamente zonas sobrepresionadas con presencia de gas se debe estar preparado para llegar a la zona del riesgo con herramientas de monitoreo y registros LWD y las técnicas mencionadas anteriormente, sin embargo en caso de pérdida de control del flujo se debe implementar la mitigación que comprende los siguientes pasos como mínimo:

- Informar inmediatamente para activar las alertas.
- Aumentar la tasa de bombeo con el lodo disponible para las patadas de pozo.
- Verificar la estabilidad de la plataforma en el fondo marino.
- Dar la orden de evacuación al personal y solo mantener personal especializado.

- Si el evento se vuelve incontrolable, todo el personal debe evacuar las instalaciones.
- Se debe liberar el la tubería de elevación de la plataforma o barco y moverlo de hay si es posible.
- Si la plataforma no es movil, buscar las envarcaciones y retirarse del lugar.

Una vez se empiece a perder el control del pozo se debe notificar a las entidades de atención de emergencias, y a profesionales que ayuden con soporte tecnico para controlar la situación si hay el tiempo necesario (Adams & Kuhlman, 1990).

**FIGURA 161: Riesgos someros durante la perforación asociados a la interacción con la formación.**



Fuente: (Sheahan & DeGroot, 2009)

La tabla 14 muestra algunos problemas que se presentan durante la perforación costa fuera y representan riesgos para la operación que deben ser controlados y mitigados, los mismos riesgos mencionados se pueden observar en la figura 161.

**Tabla 14: riesgos someros durante la perforación asociados a la interacción con la formación.**

Condición del suelo	Consecuencias	Mitigación	Riesgo Secundario
<b>1. Suelos inconsolidados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidad de pozo</li> <li>• mineralogía del suelo / Erosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso controlado del peso del lodo</li> <li>• Uso de un sistema de retorno del lodo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura</li> <li>• Deformación de pozo - que conduce a la deformación del casing</li> </ul>
<b>2. Hinchamiento de minerales arcillosos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empaque-off - "Gumbo"</li> <li>• Pérdida del espacio anular.</li> <li>• Mineralogía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos de lodo- a base de aceite / Silicato</li> <li>• Evaluar sistemas cerrados frente a sistemas abiertos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura - Integridad de las facilidades</li> <li>• pobre cementación del anular <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad del Casing</li> </ul> </li> <li>• Mantener el pozo para extraer los hidrocarburos</li> </ul>
<b>3. Alta salinidad del fluido en la formación/ alto potencial osmótico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hinchazón</li> <li>• Reducción de la resistencia al corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elegir el tipo de lodo apropiado <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de exposición</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pobre cementación del anular <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad del Casing</li> </ul> </li> <li>• Mantener el pozo para extraer los hidrocarburos</li> </ul>
<b>4. Exceso de presión de poro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resistencia a los esfuerzos de corte-suelos inconsolidados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hacer coincidir el peso del lodo con la fractura de presión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pobre cementación del anular <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad del Casing</li> </ul> </li> <li>• Mantener el pozo para extraer los hidrocarburos</li> </ul>
<b>5. Las arcillas altamente estructuradas, caras de deslizamiento y fisuras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de la presión de fractura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NO permitir que se produzcan fracturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos de campos lejanos</li> <li>• Integridad de las facilidades</li> </ul>
<b>6. Estratos sobrepresionados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujos de salmuera-Flujos de agua somera</li> <li>• Deformación del pozo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planeación de programas de perforación</li> <li>• Mantener presión balanceada.</li> <li>• Buena cementación del pozo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos de campos lejanos</li> <li>• Integridad de las facilidades</li> </ul>
<b>7. Suelos y arenas de baja resistencia (debiles)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wash-out</li> <li>• Estabilidad de equipos/ BOP/ facilidades de superficie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posible uso de un aislamiento en el casing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implicaciones para los anclar la plataforma</li> </ul>

Fuente: (Sheahan & DeGroot, 2009)

Para un manejo adecuado de riesgos se debe presentar la información ordenada por medio de esquemas, tablas o gráficos de manera integral (riesgos

identificados, la calificación signada y el control correspondiente) para poder tener una mejor percepción del riesgo y establecer las medidas de control, en la tabla 15 se muestran los algunos riesgos geológicos someros importantes a los cuales se les califica de acuerdo al grado de riesgo y se establecen los posibles controles.

**Tabla 15: Registro de riesgos para determinar el grado de riesgo y establecer controles**

PELIGRO	RIESGO	IMPACTO	GRADO DEL RIESGO	CONTROL
Shallow Gas penetrado en el pozo	Blowout	Incendios y/o pérdidas de la plataforma		Colocar configuraciones al Casing sobre el nivel del gas, reubicar el pozo
Sedimentos blandos en profundidades someras	Inestabilidad en el pozo	No es posible alcanzar la profundidad deseada		Desarrollar un proyecto de ingeniería
Exceso de presión de poro	No se puede bajar el casing a grandes profundidades	No es posible alcanzar la profundidad deseada		Predecir la presión de poro a partir de sísmica 3D
Shallow Water Flow (flujo de agua somera)	No se puede continuar la perforación	Pérdida del pozo		Análisis de la información por personal experimentado
Acumulaciones significantes de hidratos de gas	Disociación de hidratos	Explosión, expansión durante la perforación y posible pérdida del pozo.		Identificar la posible acumulación con información geofísica, hacer perforaciones y muestreos con precaución

Intolerable	Incorporar medidas de reducción de riesgos para continuar	Se puede continuar la operación con mejoras

Fuente: modificada de (Wardlaw & Salisbury, 2010)

En las tablas 15 y 16 se muestran los estudios realizados hasta 2003 donde se indican algunos métodos de control para riesgos asociados a hidratos de gas (Cochran, 2003).

**Tabla 16: Técnicas de control para eventos asociados a los hidratos de gas**

OPERADOR Y CAMPO	TECNICAS DE CONTROL DE HIDRATOS	OBSERVACION
Shell Serrano / Oregano Golfo de Mexico	Lineas de flujo sencillas para cada desarrollo. Aislamiento pipe-in-pipe para operación en continuo.	Desarrollo de multiples campos de petroleo y gas
	Calentamiento Electrico para periodos de cierre y/o reinicios cortos. No se aplica calentamiento electrico mientras el sistema este produciendo.	<i>Tieback</i> 9.7-km y 12-km
	Desprezurizacion en periodos largos de cierre. calentamiento electrico como remediacion. (Mas rapido que la desprezurizacion)	Capa de Agua $\approx$ 1040 m
BP Troika Golfo de Mexico	Aislamiento de lineas de flujon duales con el coeficiente global de transferencia de calor de $1,0 \text{ W/m}^2 / ^\circ \text{C}$ (Diseño pipe-in-pipe con nitrogeno prezurizado a 99 Bar en el espacio anular). Aislamiento de arboles, <i>jumpers</i> , <i>manifold</i> y <i>Vacuum-insulated</i> en la tuberia del pozo.	Desarrollo de petroleo
	Inyeccion de metanol en el fondo del pozo (arboles y/o manifold) durante el reinicio mientras el sistema se haya calentado.	<i>Tieback</i> 22,5 km
	Desprezurizacion para cierres y como remediacion de bloqueos.	Capa de Agua $\approx$ 825 m
Petrobras Roncador Costa Afuera Brazil	Lineas de flujo aisladas con polipropileno.	Desarrollo de petroleo
	Se tolera la formacion de hidratos basados en experiencia operativas previas. Se considera que se forman cristales pero no se aglomeran causando taponamiento	Capas de Agua de 1400 a 2000 m
	posteriormente en cortes de agua mas altos (>19%) se planea la inyeccion de inhibidores de la cinetica.	Promedios de <i>Tieback</i> 8 km 31 °API y punto de nube de 14 °C
Petrobras Marlim Costa Afuera Brazil	Lineas de flujo y <i>Risers</i> flexibles, algunos aislados.	Desarrollo de petroleo
	Inyeccion de etanol en el arbol.	Capa de Agua 620 a 1100 m <i>Tieback</i> 8 km
	Durante el cierre inyeccion de etanol en el arbol. Remediacion a través de desprezurizacion.	Temperatura mínima del fondo marino de 4 a 6 °C

Fuente: (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011) modificada de (Cochran, 2003)

**Tabla 17: Técnicas de control para eventos asociados a los hidratos de gas**

OPERADOR Y CAMPO	TECNICAS DE CONTROL DE HIDRATOS	OBSERVACION
Total Fina Elf Girassol Costa Afuera Africa Occidental	Aislamiento bundle	Desarrollo de petroleo
	Equipos submarinos aislados. Metanol como inhibidor	Capa de Agua 1350 m
	Aislamiento para ofrecer temperaturas de más de 40 ° C y tiempo de enfriamiento de 16 horas.	<i>Tieback</i> hasta 7 km
Petro-Canada Terra Nova Atalanti Norte	Lineas de Flujo y <i>Risers</i> aislados. Arboles <i>jumpers</i> y <i>manifolds</i> aislados para proporcionar un tiempo de enfriamiento igual al de las lineas de flujo.	Desarrollo de petroleo
	Circulación de aceite caliente para el calentamiento de las líneas de flujo y <i>Risers</i> antes de reiniciar el pozo.	Capa de Agua 94 m
	Para cierres previstos se inyecta metanol.	<i>Tieback</i> 2 km
	Para cierre imprevistos despresurización en las lineas de flujo.	Temperatura mínima del fondo marino de -2 ° C
Norsk Hydro Troll Oil Mar del Norte	Aislamiento térmico para evitar la inyección continua inyección de metanol durante la producción normal para proporcionar un mínimo de 8 horas de tiempo de enfriamiento tras el cierre	Desarrollo de petroleo
	Despresurización en las lineas de flujo para cierres previstos o imprevistos.	Capa de Agua 310 m
	Eliminación de los tapones de hidratos por despresurización en ambos lados, combinados con metanol.	

Fuente: (Ayala Rivera, López Medina, & Martínez Ramirez, 2011) modificada de (Cochran, 2003)

Finalmente la metodología de caracterización de riesgos geológicos someros comprende la identificación, análisis, estimación, cuantificación, evaluación, control y manejo de riesgos. Todas y cada uno de los pasos es indispensable para el éxito de los proyectos de perforación en cuanto a la seguridad de la operación, pero en los dos pasos de mayor énfasis son la identificación, la cuantificación las medidas de reducción de riesgos.

## CONCLUSIONES

Desde 1955, se han presentado numerosos accidentes en las operaciones de perforación costa afuera con resultados fatales a causa del mal manejo o desconocimiento de los riesgos geológicos someros (Shallow Hazards-Geohazards) que causan daños al recurso humano, medioambiental y económico en las compañías. Los Shallow Hazards han sido uno de los problemas que más accidentes ha causado a nivel de actividades industriales, pero gracias al estudio de estos riesgos, hoy los accidentes son de poca magnitud comparados con los acontecimientos ocurridos en la década de 1970. La investigación y análisis de accidentes fueron las bases de la elaboración de normas y manuales que ayudan al manejo, control y eliminación de muchos factores de riesgos asociados a las operaciones de perforación offshore.

Los riesgos geológicos que afectan las operaciones de perforación costa afuera y pueden generar situaciones no deseadas son cuatro: riesgo a nivel del mar, riesgo en el suelo marino, riesgo a profundidades someras y los riesgos artificiales; estos últimos son generados por el ser humano.

Los principales riesgos geológicos asociados a operaciones de perforación offshore en la superficie del mar son: mareas altas, tormentas, huracanes, tsunamis y comportamiento de las corrientes marinas. Estos riesgos geológicos están asociados principalmente las condiciones climáticas, y la desestabilización de sedimentos en fondo oceánico.

El ambiente marino es dinámico en su propia naturaleza, todos los factores en este ambiente interactúan entre sí de manera asombrosa. Allí, el suelo

oceánico es transformado y convertido en agente transformador. Las características del movimiento de los suelos marinos están influenciadas por múltiples factores entre los que se destacan la profundidad del suelo marino, el oleaje, el viento, las corrientes marinas, estabilidad del suelo marino, el flujo de sedimentos, la topología marina, la sismicidad, la actividad humana entre otros.

La estabilidad de la plataforma en superficie depende en gran medida de los riesgos geológicos que se encuentren a nivel del mar y en el lecho marino, estos riesgos no solo afectan las operaciones de perforación, sino, que también las de exploración y producción del campo; Alguno riesgos localizados en el fondo marino son: ventanas de gas, volcanes de lodo, deslizamiento de sedimentos y avalanchas, estabilidad de pendientes, flujo de turbiditas, escarpes de falla, presencia de taludes, la pérdida de resistencia del suelo, la salida de fluidos y sedimentos, las influencia de las características del subsuelo entre otros.

Los riesgos geológicos someros se pueden encontrar en aguas someras como en aguas profundas, puesto que se miden a partir del lecho marino. Los más conocidos y de mayor cuidado por su impacto en los accidentes ocurridos son: los sedimentos sobrepresionados, los flujos de agua someros (Shallow Water Flow), los flujos de gas somero (Shallow Gas Flow), las fallas almacenadoras de sobrepresiones, los suelos blandos a profundidades someras, las chimeneas de gas, los hidratos de gas, los domos salinos y formaciones con exceso de presión de poro.

La batimetría, los perfiles eléctricos, las muestras del suelo del fondo marino, los vehículos submarinos automáticos u operados a control remoto, el modelamiento numérico, el análisis probabilístico y geoestadístico, las corridas e interpretación de sísmica 1D, 2D, 1D y 4D son algunas de las herramientas básicas usadas para caracterizar los riesgos someros y realizar los respectivos análisis de identificación, evaluación y manejo de los mismos.

Los Hidratos de gas representan un riesgo inminente para la perforación por las condiciones en que se encuentra que son altas presiones y bajas temperaturas y por su asombrosa capacidad de expansión. Además ayuda a activar el movimiento de sedimentos en fondo que afectan la estabilidad del suelo y de los equipos lo que puede verse reflejado en un tsunami.

Los flujos de agua somera (SWF-Shallow Water Flow) representan peligros para la tubería y el personal en la plataforma por la fuerza con que salen los sedimentos debido a la presión a la que se encuentran en la formación; en el Golfo de México las pérdidas económicas por la caracterización inadecuada de los SFW han son muy significativas. Por otro lado los flujos de gas somero (SGF-Shallow Gas Flow) están clasificados como los riesgos someros de mayor impacto en las operaciones de perforación offshore por el numero de accidentes causados hasta el momento que se han representado en forma de Blowouts. Los Blowouts, son una de las consecuencias más probables de los riesgos someros y además han ocasionado la mayoría y los peores accidentes de la historia en cuanto a perforaciones costa fuera.

Algunos estudios realizados en la costa caribe colombiana muestran la existencia de riesgos geológicos como: terremotos y deslizamientos en el fondo marino e inestabilidad del mismo por la alta sismicidad de la zona, limitaciones operacionales por altas pendientes, presencia de volcanes de lodo, ventanas de gas, disociación de hidratos de gas, geomorfología complicada en algunas zonas debido a la salida de flujo y sedimentos del subsuelo. Adicionalmente se han encontrado escarpes significativos y canales de deslizamientos, elevaciones en el fondo marino que indican sobrepresión en los estratos poco profundos, chimeneas de gas, cráteres en el fondo marino (Pockmarks), presencia de hidratos de gas y fluidos sobrepresionados como flujos someros de agua y gas.

Los principales factores a considerar en la evaluación, medidas de control y manejo de riesgos geológicos asociados a la perforación costa afuera son: la

frecuencia de ocurrencia de los riesgos, la probabilidad de ocurrencia, la posible magnitud, la duración del posible evento, los daños causados al medio ambiente, los recursos humanos y los bienes e imagen de la empresa. Los anteriores factores ayudan a identificar que riesgos tienen mayor influencia sobre determinada área.

El estudio de riesgos geológicos asociados a la perforación hace parte indispensable de la dirección de proyectos de explotación de hidrocarburos costa afuera, puesto que da una idea del riesgo global del proyecto y de la incertidumbre al momento de invertir.

La caracterización de riesgos es obligatoria para todas las empresas puesto que existen normativas nacionales e internacionales que obligan a cumplir con requerimientos mínimos con el ánimo de salvaguardar la vida e integridad de las personas y del medio ambiente.

Tanto los riesgos geológicos a nivel del mar como los riesgos geológicos presentes en el lecho marino se presentan en todo el transcurso del proyecto de perforación, es decir existen desde el inicio de la perforación hasta el final del proyecto, al igual que los riesgos artificiales que son debidos a los errores humanos; mientras que los riesgos geológicos someros se presentan a medida que avanza la operación de perforación y de acuerdo a la profundidad que se esté manejando. Sin embargo es de rescatar que la presencia de ciertos riesgos geológicos esta limitada a la columna de agua y a la profundidad a partir del lecho marino y su magnitud puede ser de mayor o menor grado de peligrosidad dependiendo de dichos factores.

## RECOMENDACIONES

En bloques ubicados en las costas colombianas especialmente en el Mar Caribe donde se adelantan operaciones de exploración y explotación en Colombia existen riesgos someros que ya han sido identificados, por lo tanto se deben realizar estudios detallados para caracterizar cada uno de los riesgos geológicos allí presentes y hacer un análisis global de riesgos para evitar situaciones indeseadas, esto teniendo en cuenta que en Colombia no se cuenta experiencia suficiente a nivel de perforación offshore y que el mar caribe esta relativamente cerca del Golfo de México donde se han registrado accidentes lamentables.

Se recomienda que se realicen estudios mas detallados de cada uno de los riesgos presentes en el Mar Caribe Colombiano basados en métodos de identificación y análisis de los peligros asociados, especialmente los riesgos geológicos presentes en el fondo marino y a profundidades someras. Es de destacar que no existen estudios investigativos representativos suficientes respecto a la peligrosidad geológica en los prospectos de posibles reservas de hidrocarburos en los mares Colombianos.

Se recomienda hacer estudios detallados de la influencia de los hidratos de gas en la inestabilidad del fondo marino en el Mar Caribe Colombiano, para identificar el efecto de estos en el movimiento de sedimentos y en la disminución de la resistencia del terreno, y el cambio dinámica de las corrientes marinas.

Hacer estudios de sísmica y batimetría para tener una mejor caracterización del fondo marino y poder identificar las zonas de mayor actividad geológica, por medio de mapas que indiquen la geomorfología y la ubicación cada uno de riesgos.

Se recomienda establecer métodos de control y manejo de riesgos geológicos someros por medio del modelamiento numérico, ya sea con el software existentes en la industria o mediante la creación y desarrollo un software propio de la empresa. Lo anterior teniendo en cuenta que la simulación de los eventos de riesgo son de gran importancia para establecer los métodos de reducción de riesgos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburto Pérez, M., Clyde, R., D'Ambrosio, P., Israel, R., Leavitt, T., Nutt, L., y otros. (2009). Respondiendo al desafío de explotar estructuras subsalinas. Oilfield Review, SLB, Invierno de 2008/2009, 36-51.
- Dive, D. (26 de Mayo de 2010). cDiver.net. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de The Commercial Diver Network: <http://community.cddiver.net/profiles/blogs/ocean-odyssey-blowout-v>
- Thomson, J. A. (2010). Geohazards Identification for Safe Execution, Magdalena Fan Exploration Area, Offshore Colombia. Exploration & Production Technology, BP. Houston, Texas: Exploration & Production Technology, BP.
- PLAXIS. (2011). Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Geotechnical software tools, based on the finite element method and intended for 2-D and 3-D geotechnical analysis of deformation and stability of soil structures: <http://www.plaxis.nl/page/home2/>
- Adams, N. J., & Kuhlman, L. N. (1990). Case History Analyses of Shallow Gas Blowouts. Society of Petroleum Engineers, International Association of Drilling Contractors, 1-10.
- Adams, N. J., Kuhlman, L. G., & Adams Firefighter, N. (1991). Shallow Gas Blowout Kill Operations SPE 21455. Society of Petroleum Engineers, 1-12.
- Aemon07. (2007). Marine Studies and Projects. Recuperado el 5 de mayo de 2012, de Aemon07 OCEANOGRÁFICO: [http://www.aemon07.com/eng/2\\_10\\_mareografo.php](http://www.aemon07.com/eng/2_10_mareografo.php)
- Albertin, U., Kapoor, J., Randall, R., Smith, M., Brown, G., Whitfield, P., y otros. (Invierno de 2002). La era de las imágenes en escala de profundidad. Oilfield Review, 1-17.

- Alsos, T., Eide, A., Pickering, S., Benabentos, M., Dutta, N., Subhashis, M., y otros. (2002). Aplicaciones sísmicas a lo largo de la vida productiva del yacimiento. *Oilfield Review*, Otoño, 54-71.
- Andresen, L., & Jostad, H. P. (2004). Analyses of progressive failure in long natural slopes. (T. & plc, Ed.) Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 603-608.
- Andresen, L., & Jostad, H. P. (2005). OTC 18650 Numerical Modeling of Failure Mechanisms in Sensitive Soft Clay — Application to Offshore Geohazards. *Offshore Technology Conference*, 1-7.
- ANH. (2007). Caribbean Round 2007. Cartagena, Colombia: Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- API RP 14J. (2005). Recommended Practice for Design and Hazards Analysis for Offshore Production Facilities, API RP 14-J. Washington, D.C.: American Petroleum Institute.
- Arbitz, C., Limsdal, S., Øvholt, F., Edersen, G., & Anneste, M. (2010). Tsunami hazard assessment and early warning systems for the North East Atlantic. International Centre for Geohazards, NGI, NORSAR.
- Artiles Pérez, J., Pérez Salazar, C., Gabilondo Márquez, R. J., Barrera Godines, G., & Hernández Valdés, O. (2005). ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA EL ESTUDIO DEL FONDO MARINO EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS. III CONGRESO DE GEOFÍSICA, Geofísica Aplicada a la Exploración de Petróleo, La Habana, Cuba.
- Ayala Rivera, J., López Medina, F., & Martínez Ramirez, A. (2011). IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS RELACIONADOS CON HIDRATOS DE GAS DURANTE PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN OFFSHORE, Revisión del Estado del Arte. ECOPETROL, Instituto Colombiano del Petróleo, PIEDECUESTA – SANTANDER.
- Bachrach, R., Den, E., BACHRACH, R., NOETH, S., BANIK, N., SENGUPTA, M., et al. (2007, May). From pore-pressure prediction to reservoir characterization: A combined geomechanics-seismic inversion workflow using trend-kriging techniques in a deepwater basin. *The Leading Edge*, 590-595.

- Baird, R. W. (1976). Explanation of Shallow Blowouts and Lost Time Incidents with Some Recommendations ,OTC 2610. Offshore Technology Conference, 925-942.
- BAKER HUGHEES. (2006). Pressure Prediction and Control AND Deepwater Drilling Fluids, chapter 12 and 13. En B. HUGHEES, Drilling Fluids reference Manual (págs. 580-653).
- BASIN-EPA. (17 de Abril de 2007). EPA, United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de BASINS (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources): <http://water.epa.gov/scitech/datait/models/basins/index.cfm>
- Bass, R. (1985). Skiing the Pacific Ring of Fire and Beyond. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de The Volcanic Seven Summits: <http://www.skimountaineer.com/ROF/VolcanicSeven.html>
- Beall, J. (1976). Riserless shallow blowout-control method is safe and effective. Oil & Gas Journal, , 125.
- Bermuda, J. (15 de Noviembre de 2009). Ocean Explorer, NOAA. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de How Multibeam Sonar Works: <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/09bermuda/background/multibeam/multibeam.html>
- Birchwood, R., Dai, J., Shelander, D., Boswell, R., Collett, T., Cook, A., y otros. (2010). Desarrollo en Hidratos de Gas. En Schlumberger. En M. A. Andersen, & L. Stewart, Oil Field Review (Vol. 22, págs. 18-35). Houston, Texas: Oil Field Review.
- Biscontin, G., Pestana, J., NGI, & USGS. (s.f.). Seismic Triggering of Submarine Slopes in Soft Cohesive Soils. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de GeoEngineering Group , Department of Civil & Environmental Engineering : [http://www.ce.berkeley.edu/~pestana/seismic\\_triggering.html](http://www.ce.berkeley.edu/~pestana/seismic_triggering.html)
- Bondevik, S., Løvholt, F., Harbitz, C., Mangerud, J., Dawson, A., & Svendsen, J. I. (2005). The Storegga Slide tsunami—comparing field observations with numerical simulations. Marine and Petroleum Geology, 195–208.
- Bryn, P., Berg, K., Forsberg, C. F., Solheim, A., & Kvalstad, T. J. (2005). Marine and Petroleum Geology. Marine and Petroleum Geology, 11-19.

- BS EN ISO. (2002). Petroleum and natural gas industries — Offshore production installations — Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment (Vol. BS ISO 17776:2000). U K: INTERNATIONAL STANDARD.
- Businger, S. (2008 ). Huracanes, Estructura y Climatología.
- Bybee, K. (2008). Offshore Drilling and Completion: Deepwater Blowout: A Case Study. JPT, OFFSHORE DRILLING AND COMPLETION, 60-71.
- Caroll, J. (2009). Natural Gas Hydrate, A guide for Engineers (segunda ed.). United States of America: Gulf Professional Publishing, Elsevier.
- Chen, J., Ullmann, R. R., & Mason, A. B. (1989). Measurement of Earthquake Ground Acceleration and Structural Response of a Fixed Offshore Platform, OTC 6172. Offshore Technology Conference, 1-8.
- CIOH. (12 de Abril de 2012). Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas del Caribe (CIOH), . Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de <http://www.cioh.org.co/>
- Cochran, S. (2003). OTC 15255 Hydrate Control and Remediation Best Practices in Deepwater Oil Developments. Offshore Technology Conference, 1-14.
- COFS. (2010). Engineering, Computing and Mathematics, Annual Report 2010. The University of Western Australia. Perth, Western Australia: Centre for Offshore Foundation Systems, The University of Western Australia.
- Colombo, D., & De Stefano, M. (March de 2007). Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic , gravity , and electromagnetic data : Application to prestack depth imaging. THE LEADING EDGE, SLB, 326-331.
- COMITÉ TÉCNICO TSUNAMI. (5 de Mayo de 2012). COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCEANO, Vicepresidencia de la Republica. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de INFORMACIÓN TSUNAMI EN COLOMBIA, : <http://www.cco.gov.co/tsunami3.htm>
- Country Reports. (s.f.). Country Reports. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de Country Reports Edición en español:: <http://es.countryreports.org/country.aspx?countryId=55>

- Crimmins, D., & Manley, J. (15 de Mayo de 2008). Ocean Explorer, NOAA. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de What Are AUVs, and Why Do We Use Them?: <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/background/auvs/auvs.html>
- Dai, J. (., & Dutta, N. (. (11-14 de June de 2007). Exploration for Gas Hydrates Based on Seismic Information – With Examples from Northern Gulf of Mexico. EAGE 69th Conference & Exhibition, LONDON(A018), 1-6.
- Dai, J., Xu, H., Snyder, F., & Dutta, N. (2004). Detection and estimation of gas hydrates using rock physics and seismic inversion : Examples from the northern deepwater Gulf of Mexico. THE LEADING EDGE, 60-66.
- Digby, A. J. (2005). Assessment of the hydrate geohazard. GroupOcean Drilling Programme (ODP) , 882-888.
- DIMAR, & CIOH. (2009). Geografía Submarina del Caribe Colombiano. Cartagena de indias, Colombia: DIMAR, Dirección General Maritima.
- Dplot. (2012). Graph Software for Scientists and Engineers. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Geographic Maps: <http://www.dplot.com/maps.htm>
- Dribus, J. R., Jackson, M. P., Kapoor, J., & Smith, M. F. (2009). Respondiendo Respondiendo al desafío de explotar estructuras subsalinas. Oilfield Review, Invierno de 2008/2009, 4-19.
- Dupré, S., Buffet, G., Mascle, J., Foucher, J. P., Gauger, S., Boetius, A., y otros. (2009). High-resolution mapping of large gas emitting mud volcanoes on the Egyptian continental margin (Nile Deep Sea Fan) by AUV surveys. Marine Geophysical Researches(29), 275-290.
- Dutta, N. (2003). Geohazard Detection in Deepwater Clastics Basins Using a Seismic Technique Guided by Geology and Rock Physics Model : Methodology and Examples, OTC 15115 . Offshore Technology Conference, 1-5.
- Eberhardt, E. (2003). Rock Slope Stability Analysis, Utilization of Advanced Numerical Techniques. Geological Engineering/Earth and Ocean Sciences, 8-15.

- ECA, T. (Marzo de 2011). ALISTER A.U.V, Autonomous Underwater Vehicle. Project Management & Manufacturing Unit. LA GARDE, France: NAVARRO Imprimeur.
- Elgamal, A., Yang, Z., & Parra, E. (2002). Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 259-271.
- EnergyindustryPhotos.com. (5 de Mayo de 2012). EnergyindustryPhotos.com. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Oilfield Blowout Photos, Accidents, Mishaps and Oil Rig Fires: [http://www.energyindustryphotos.com/oilfield\\_blowout\\_photos\\_and\\_rig.htm](http://www.energyindustryphotos.com/oilfield_blowout_photos_and_rig.htm)
- Espinosa, C., & Mateus, L. M. (2010). IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES PROBLEMAS OPERACIONALES Y ALTERNATIVAS DE CONTROL DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS COSTA FUERA EN EL MAR CARIBE COLOMBIANO, Tesis de Pregrado. PIEDECUESTA - SANTANDER: ECOPETROL S.A; INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO UNIDAD DE INVESTIGACIÓN.
- Eun Cho, S. (2009). Probabilistic stability analyses of slopes using the ANN-based response surface. *Computers and Geotechnics*, 787-797.
- Farmer, P., Miller, D., Pieprzak, A., Rutledge, J., & Woods, R. (Spring de 1996). Exploring the Subsalt. *Oilfield Review*, 50-64.
- Feeley, K. (2007). Triggering Mechanisms of Submarine Landslides. Northeastern University, Department of Civil and Environmental Engineering, 1-45.
- Finn, W. D. (2000). State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1-15.
- Flores Jr, W., Garner-Boots, J. B., & Scarborough-Boots, C. (2007). Deepwater Blowout , A Case History : Shallow Gas Hazards Hide in the Weeds, SPE/IADC 105914-PP. Society of Petroleum Engineers and International Association of Drilling Contractors, 1-3.
- Frias, J. L. (2005). BATIMETRIA DE LOS MARES MEXICANOS. Manzanillo, Colombia: INEGI.
- Frontera, T., Olivera, C., Jara, J. A., & Goula, X. (2011). COBS : a Permanent Ocean Bottom Seismometer Integrated in the Catalan Seismic Network (NE

Iberian Peninsula). Barcelona, Spain.: Institut Geològic de Catalunya and GEOCAT (Gestió de Projectes, S.A.).

Gallagher, R. (summer de 2003). Mud Volcanoes, Mysterious Phenomena Fascinate Scientists and Tourists. (A. INTERNATIONAL, Editor, & AZERBAIJAN INTERNATIONAL) Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de [http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/ai112\\_folder/112\\_articles/112\\_mud\\_volcano.html](http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/ai112_folder/112_articles/112_mud_volcano.html)

geotechnical research groups. (s.f.). PARTNER INSTITUTE HIGHLIGHT Centre for Offshore. Obtenido de offshoregeohazards: <http://www.offshoregeohazards.org/>

Geresi, E., Champan, N. R., MCGee, T. M., & Woolsey, J. R. (s.f.). GAS HYDRATE GEOHAZARD ASSESSMENT IN THE NORTHERN GULF OF MEXICO USING A VERTICAL LINE ARRAY. School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, B. C. Canada MMRI/CMRET, University of Mississippi, Oxford MS USA. .

Gil Sánchez, J. C., & Rojas Parra, F. I. (2008). MÉTODOS UTILIZADOS EN LA RECUPERACIÓN DE GAS NATURAL EN FORMACIONES DE HIDRATOS DE LECHOS MARINOS. Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial de Santander, Tesis de Pregrado.

GIT. (01 de Mayo de 2012). Gruppo Geology & Information Technology. Recuperado el 01 de Mayo de 2012, de GIT Geology and Information Technology: <http://www.gitonline.eu/GIT2011.html>

Google\_Master. (27 de Diciembre de 2009). Ggoogle-Earth.es. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de Plataforma Petrolifera en Alta Resolución: <http://www.google-earth.es/foros.php?t=4228>

Griem , W., & Griem-Klee, S. (1999-2003). Ambiente sedimentario oceánico 4, Geología General. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Apuntes Geología General, <http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap05f.htm>

Guevara Córdoba, J. M. (2007). Dersarrollo de Modelos Batimétricos y Bentónicos en las ZEE del Pacifico Tropical Oriental de Costa Rica, Panamá y Colombia y ZEE del Caribe de Costa Rica y Panamá. San José, Costa Rica: The Nature Conservancy.

- Guzmán, R. (2011). Potential Resources of Unconventional Hydrocarbons in Colombia, ANH Unconventional Hydrocarbons Workshop. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 1-13.
- Haeger, S., & Bol, A. (2007). Introducción a las corrientes oceánicas. University. University Corporation for Atmospheric Research and NOAA/DOC, COMET program.
- Hance, J. J., & Wright, S. G. (2003). Offshore Technology Research Center. New Orleans, LA: OTRC Library Number: 8/03B121.
- Hellstrand, T. (1990). Drilling Shallow gas in the Norwegian Sector, . IADC, European Well Control Conference.
- Herbert/AP, G. (20 de Abril de 2010). sfgate. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de Offshore drilling bill passed by House: [http://www.sfgate.com/cgi-bin/object/article?f=/c/a/2011/05/12/MNMJ1JESLJ.DTL&object=%2Fc%2Fpictures%2F2011%2F04%2F20%2Fba-Gulf\\_Oil\\_Spil\\_0503346791.jpg](http://www.sfgate.com/cgi-bin/object/article?f=/c/a/2011/05/12/MNMJ1JESLJ.DTL&object=%2Fc%2Fpictures%2F2011%2F04%2F20%2Fba-Gulf_Oil_Spil_0503346791.jpg)
- Hokusai, K. (1830). La gran ola de Kanagawa. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de WIKIPEDIA La Enciclopedia Libre: : [http://es.wikipedia.org/wiki/La\\_gran\\_ola\\_de\\_Kanagawa](http://es.wikipedia.org/wiki/La_gran_ola_de_Kanagawa)
- Holand, P. (1997). OFFSHORE BLOWOUTS Causes and Control. Houston: Gulf Publishing Company.
- Holmes, R., Alexander, S., Ball, K., Bulat, J., Evans, R., MacBeth, C., y otros. (1997). The issues Surrounding a Shallow Gas Database in relation with Ofshore Hazards, OTH 504. Edinburgh: HSE Books, .
- HSE Hazardous Installations Directorate. (2006). Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations. Health and Safety Executive, Hazardous Installations Directorate, Aberdeen.
- HSE, & Oil and Gas Uk. (2009). Accident Statistics for Offshore Units on the UKCS 1990-2007. London and Aberdeen UK: PUBLISHED BY OIL & GAS UK.
- ICG. (01 de Mayo de 2012). International Center For Geohazards ICG. Recuperado el 01 de Mayo de 2012, de NorwegianCenter of excellence: <http://www.ngi.no/en/geohazards>.
- IMP. (10 de Octubre de 2011). Instituto Mexicano del Petróleo IMP.mx. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de PROGRAMA DE EXPLOTACIÓN

- ISO 13702. (1999). Petroleum and natural gas industries — Control and mitigation of fires and explosions on offshore production installations—Requirements and guidelines.
- Ito, Y., & Obana, K. (2011). Near-field observation of slow earthquakes in a subduction zone. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 1-4.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 245-296.
- Jostad, H. P. (2012). NGI- norwegian geotechnical institute. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de BIFURC-finite element program for geomechanical analysis: <http://www.ngi.no/en/Contentboxes-and-structures/Reference-Projects/Reference-projects/BIFURC/>
- Kellogg, L. H., Bawden, G. W., Bernardin, T., Billen, M., Cowgill, E., Hamann, B., y otros. (2008). Interactive Visualization to Advance Earthquake Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, 621-633.
- Kennett, J. P. (2002). Methane Hydrate Issues and Opportunities Including Assessment of Uncertainty of the Impact of Methane Hydrate on Global Climate Change. Reporte, Methane Hydrate Advisory Committee.
- Khalaf, F., Cairo, U., & Shennawy, H. M. (1979). Drilling of Gulf of Suez Evaporates, SPE-7749. Society of Petroleum Engineers, 1-6.
- Kvalstad, T. J., Gauer, P., Kayina, A. M., & Bryn, P. (2002). SLOPE STABILITY AT ORMEN LANGE. Society of Underwater Technology, 233-250.
- Kvalstad, T. J. (2007). OTC 18545 What is the Current " Best Practice " in Offshore Geohazard Investigations ? A State-of-the-Art Review. Offshore Technology Conference, 1-14.
- Kvalstad, T. J. (2009). OGP Geohazards from seafloor instability and mass flow. *International Association of Oil & Gas Producers*, 40.
- Kvalstad, T. J., Andresen, L., Forsberg, C. F., Berg, K., & Bryn, P. (2005). The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics. *Marine and Petroleum Geology*, 299-310.

- Kvalstad, T. J., Nadim, F., Kaynia, A. M., Mokkelbost, K. H., & Bryn, P. (2005). Soil conditions and slope stability in the Ormen Lange area. *Marine and Petroleum Geology*, 299-310.
- Kvitrud, A., Ersdal, G., & Leonhardsen, R. L. (2001). On the Risk of Structural failure on Norwegian Offshore Installations Severe incidents 1990-99. Norwegian Petroleum Directorate (NPD)(Paper No. 2001-IL-14 First), 1-6.
- Leyte, F., Díaz Barriga Arceo, J., Garibay Febles, V., & Palacios González, E. (2010). Movimientos, Catálogo de Movimientos del Suelo en el Fondo Marino. *Revista de la Industria Petrolera*, 10.
- Lindholm, C., Roth, M., Bungum, H., & Faleide, j. H. (2005). Probabilistic and deterministic seismic hazard results and influence of the sedimentary Møre Basin, NE Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 149-160.
- López, C., & Ojeda Y, G. (Diciembre de 2006). HEAT FLOW IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN FROM THE BOTTOM SIMULATING REFLECTOR (BSR). *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, Instituto Colombiano del Petróleo*, 29-39.
- Løvholt, F., Harbitz, C. B., & Haugen, K. B. (2005). A parametric study of tsunamis generated by submarine slides in the Ormen Lange/Storegga area off western Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 219-231.
- Low, B. K. (2003). *Practical Probabilistic Slope Stability Analysis Análisis Probabilístico y Práctico de Estabilidad de Taludes*. Verlag Gluckauf GmbH Essen, 2777-2784.
- MARN. (2012 de Abril de 29). Ministerio de Media Ambiente y Recursos Naturales El Salvador (MARN ). Recuperado el 01 de Mayo de 2012, de Oceanografía Mareas 2012 : <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/pronostico/mareas+2012/>
- MARTIN, W. H. (1989). *New MMS Drilling Regulations*. Society of Petroleum Engineers SPE, International Association of Drilling Contractors IADC, 1-8.
- Masarnau, J., & Colotto, M. E. (2002). *LA FIABILIDAD HUMANA EN LA GESTIÓN INTEGRADA DEL PROCESO OPERATIVO DE PLATAFORMAS OFFSHORE*. Catalunya, España: Departamento de proyectos de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya.

- Mora Rios, A., Olivares, A., Aguilera, L., Gaitan, R., Cristian, A., & Rodriguez, S. (2011). OFFSHORE MAGAZINE. Recuperado el 5 de mayo de 2012, de Using seismic-while-drilling technology to reduce uncertainty: [http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-71/issue-1/geology-\\_\\_geophysics/using-seismic-while-drilling-technology-to-reduce-uncertainty.html](http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-71/issue-1/geology-__geophysics/using-seismic-while-drilling-technology-to-reduce-uncertainty.html)
- Moratto, L., Orlecka-Sikora, B., Suhadolc, P., Papaioannou, C., & Papazachos, C. B. (2007). A deterministic seismic hazard analysis for shallow earthquakes in Greece. *Tectonophysics*, 66-82.
- Morgan, J. K., Silver, E., Camerlenghi, A., Dugan, B., Kirby, S., Shipp, C., y otros. (7 de March de 2009). Addressing Geohazards Through Ocean Drilling. *Scientific Drilling*, 15-30.
- Nadim, F., Biscontin, G., & Kaynia, A. M. (2007). OTC 18911 Seismic Triggering of Submarine Slides. *Offshore Technology Conference*, 1-8.
- Nadim, F., Kronic, D., & Jeanjean, P. (2003). OTC 15203 Probabilistic Slope Stability Analyses of the Sigsbee Escarpment. *Offshore Technology Conference*, 1-8.
- Nadim, F., Kvalstad, T. J., & Guttormsen, T. (2005). Quantification of risks associated with seabed instability at Ormen Lange. *Marine and Petroleum Geology*, 311-318.
- Nautic Expo. (2012). Nautic Expo, El Salón Virtual del Nautismo y del Sector Marítimo. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de ROV (Remotely Operated Vehicles), Mini-ROV: <http://www.nauticexpo.es/cat/barcos-utilitarios/rov-remotely-operated-vehicles-mini-rov-PA-951.html>
- NELT. (2011). Energy Resource Potential of Methane Hydrate, An introduction to the science and energy potential of a unique resource. the ENERGY lab, NELT, 1-24.
- NGI. (July de 1991). AMPLE-A computer program for analysis of amplification of earthquakes, Report No. 525285-6. Norwe-Geotechnical Institute.
- NGI. (2005, December 8). Offshore geohazards Summary Report Research institution-based strategic project 2002 - 2005 (Vols. NGI-Report 20021023-2). (NGI, Ed.) OSLO, NORWAY.

- NGI-BASIN. (2001). Ormen Lange Slope Stability Assessment, BASIN A program for one-dimensional large-strain consolidation of nonhomogeneous multi-layered sedimentation. NGI report 993016-12.
- NGI-OffshoreGeohazards. (2005). Offshore geohazards Summary Report Research institution-based strategic project 2002 - 2005. Norwegian Geotechnical Institute, 27.
- NOAA, ITIC, & SHO. (2011). Tsunami, Las Grandes Olas. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- NOAA/HMRAD. (1992). OIL SPILL case histories 1967-1991, SUMMARIES of SIGNIFICANT USA and INTERNATIONAL SPILLS. Seattle, Washington: NOAA/HMRAD Hazardous Materials Response and Assessment Division.
- NORSOK. (2001). Z-013, Risk and emergency preparedness analysis. NORSOK STANDAR, 1-126.
- NTHMP. (2011). National Tsunami Hazard Mitigation Program (NTHMP). National Media Tsunami Guidebook Updated, 1-48.
- Orange, D. L., Angell, M. M., Brand, J., Buddin, T., Williams, M., Hart, W., y otros. (2003). Geological and Shallow Salt Tectonic Setting of the Mad Dog and Atlantis Fields : Relationship Between Salt , Faults , and Seafloor Geomorphology, OTC 15157. Offshore Technology Conference, 1-16.
- Ordoñez, G. A. (2001). SHAKE2000 A computer Program for the Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, User Manual. SHAKE.
- OTO. (1994). Offshore accident and incident statistics report 1993. Hazard Analysis and Mitigation Unit of HSE. Offshore Technology Report OTO(OTO 94 010), 62.
- OTO. (1995). OFFSHORE ACCIDENT AND INCIDENT STATISTICS REPORT 1994. OFSHORE TECHNOLOGY REPORT, Health and Safety Executive, 1-29.
- Oumer, S., Taufiqurrachman, H., Perruchot, M. P., & Yunus, F. (2010). IADC / SPE 134957 Well Design Specificities for Shallow Gas Production of Tunu Field. International Association of Drilling Contractors and Society of Petroleum Engineers, 1-10.

- Patc-cornell, M. E. (1993). Learning from the Piper Alpha Accident : A Postmortem Analysis of Technical and Organizational Factors. Society for Risk Analysis.
- Persson, A. O. (2005). The Coriolis Effect : Four centuries of conflict between common sense and mathematics , Part I : A history to 1885. Norrköping, Sweden: History of Meteorology.
- Radu, A. M. (22 de Noviembre de 2009). WIKIPEDIA La Enciclopedia Libre. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de Volcán de Iodo: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RO\\_BZ\\_Berca\\_Mud\\_Volcanoes\\_4.JPG?uselang=es](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RO_BZ_Berca_Mud_Volcanoes_4.JPG?uselang=es)
- Ramirez, J. T. (2006). Ciencias de la tierra CORRIENTES OCEÁNICAS (Vol. 1). (R. d. matemáticas, Ed.) segunda.
- Randolph, M. F., Gaudin, C., Gourvenec, S. M., White, D. J., Boylan, N., & Cassidy, M. J. (2011). Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments. Ocean Engineering, 818–834.
- Reed, D. (2004). SHALLOW GEOHAZARDS AND THE IMPACT ON SHALLOW DRILLING WELL CONTROL. INTREPID Energy North Sea Limited, 1-37.
- Reuters. (13 de Abril de 2011). infoBae.com America. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de Otra plataforma petrolera se hunde en México: <http://america.infobae.com/notas/22932-Otra-plataforma-petrolera-se-hunde-en-Mexico>
- Rutledge, A. K., & Leonard, D. S. (2001). Role of Multibeam Sonar in Oil and Gas Exploration and Development, OTC 12956. Offshore Technology Conference, 1-12.
- Saeki, T., Fujii, T., Inamori, T., Kobayashi, T., Hayashi, M., Nagakubo, S., y otros. (2008). OTC 19311 Extraction of Methane Hydrate Concentrated Zone for Resource Assessment in the Eastern Nankai Trough , Japan. Offshore Technology Conference, 1-8.
- Sandberg, S. k. (2008). Technique Improves Subsalt Imaging. THE AMERICAN OIL & GAS REPORTER, 1-3.
- Sassen, R., Milkov, A. v., & Defreitas, D. A. (2002). Gas Venting and Gas Hydrate Stability in the Northwestern Gulf of Mexico Slope : Significance to Sediment Deformation. Offshore Technology Conference, 1-6.

- Sassen, R., Roberts, H. H., Jung, W., & Lutken, C. B. (2006, May 1-4). The Mississippi Canyon 118 Gas Hydrate Site : A Complex Natural System,. Offshore Technology Conference, 1-6.
- Sheahan, T. C., & DeGroot, D. J. (2009). Seabed Sediment Pore Pressure : Genesis , Measurement and Implications for Design / Analysis. Oslo, Norway: ICG, NGI.
- Siever, P. &. (15 de Febrero de 2007). NORTHWESTERN UNIVERSITY. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de SEISMIC REFLECTION: <http://www.earth.northwestern.edu/people/seth/107/Seismology/seismicreflection.htm>
- SIOSEARCH. (25 de Marzo de 2010). Rapid Response Survey of the Earthquake Zone off the Coast of Chile. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de SIOSEARCH- Scripps Institution of Oceanography's of the earthquake and Rupture offshore Chile: <http://www.siosearch.org/>
- Sistema Nacional de Protección Civil. (6 de Noviembre de 2010). Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de [http://www.pa-digital.com.pa/periodico/edicion-actual/hoy-interna.php?story\\_id=982321](http://www.pa-digital.com.pa/periodico/edicion-actual/hoy-interna.php?story_id=982321)
- Slides. (2004). 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes Sample Problems.
- Sloan Jr , E. D. (2003). Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. En Center for Hydrate Research, NATURE, VOL 426 (págs. 353-359). Golden, Colorado: Nature Publishing Group.
- Sloan, E. D., & Koh, C. A. (2008). Clathrate Hydrates of Natural Gases. Boca Raton, London and New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Stauffer, K. E., Ahmed, A., Kuzela, R. C., & Smith, M. A. (1999). Revised MMS Regulations on Shallow Geohazards in the Gulf of Mexico. Offshore Technology Conference, 1-3.
- Stephen, N. (2005). SCOTTISH ROAD NETWORK LANDSLIDES STUDY.
- Stephen, N. (2011). Tsunami. Natural Disasters.
- Strout, J. M., & Tjelta, T. I. (2007). Excess Pore Pressure Measurement and Monitoring for Offshore Instability Problems. Offshore Technology Conference(OTC 18706), 1-10.

- Subhashis, M., & DUTta, N. C. (2002). Shallow water flow prediction using prestack waveform inversion of conventional 3D seismic data and rock modeling. THE LEADING EDGE, SLB, 675-680.
- Sultan, N. (2007). Excess Pore Pressure and Slope Failures Resulting From Gas-Hydrates Dissociation and Dissolution. Offshore Technology Conference, 1-9.
- Sultan, N., & Leynaud, D. (2010). 3-D slope stability analysis: A probability approach applied to the nice slope (SE France). Marine Geology, 89-106.
- The University of Texas at Austin. (2005). Offshore Well Construction (First ed.). Texas. EEUU: THE UNIVERSITY OF TEXAS CONTINUING EDUCATION PETROLEUM EXTENSION SERVICE.
- Thomas, S., Hooper, J., & Clare, M. (2010). Constraining Geohazards to the Past : Impact Assessment of Submarine Mass Movements on Seabed Developments. Fugro GeoConsulting Limited, 387-398.
- Thurston, D. (2009). Geo-Hazards Information Review, Reduction of Risk for Offshore Drilling Operations, Artic Technology Workshop. Minerals Management Service (MMS), 1-19.
- Tomer, B. (2001). SCNG BEGINS FISCAL YEAR 2002 WITH SIGNIFICANT NEW HYDRATE RESEARCH AND DEVELOPMENT PROJECTS. Fire in the Ice, THE NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY METHANE HYDRATE NEWSLETTER, 1-8.
- Universidad de la República Oriental del Uruguay. (01 de Mayo de 2012). Unidad de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Física. Recuperado el 01 de Mayo de 2012, de Facultad de Ciencias: [http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/oceanografia/teorico\\_oceanografia/cap2.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/oceanografia/teorico_oceanografia/cap2.pdf)
- Uriarte, A. (2007). Corrientes oceánicas y circulación termohalina, Historia. En A. Uriarte, Historia del Clima de la Tierra.
- USGS. (7 de Enero de 2011). US Geological Survey, Science for changing world. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Multimedia Gallery Home, XBT: <http://gallery.usgs.gov/tags/XBT>

- USGS. (s.f.). Gulf of Maine Mapping Initiative (GOMMI) , Mapping techniques. Recuperado el 2 de Mayo de 2012, de U.S. Geological Survey: <http://www.gulfofmaine.org/gommi/mappingtechniques.php>
- USGS Pacific Sea-Floor Mapping Project. (1 de Diciembre de 2000). NASA Visible Earth. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de BATHYMETRY OF THE LOS ANGELES MARGIN, USGS Pacific Seafloor Mapping Project: <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55316>
- USGS-Woods Hole Science Center. (28 de Marzo de 2012). Geological Survey, Science for changing world. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Swath Bathymetry Data Interpretation, Bathymetry systems: [http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sfmapping/bathy\\_interp.htm](http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sfmapping/bathy_interp.htm)
- Van Rossom, J. (Diciembre de 2007). Research\*eu, Revista del Espacio Europeo de la Investigación. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de Investigación & Innovación: Grandes Fondos Marinos, Numero especial: [http://ec.europa.eu/research/research-eu/sea/article\\_mer10\\_es.html](http://ec.europa.eu/research/research-eu/sea/article_mer10_es.html)
- Veritas, D. N. (2001). Marine risk assessment ( HSE BOOKS ed., Vol. 2001/063). London, U K: OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT, HSE.
- Veritas, D. N. (2002). Marine risk assessment. London: HSE BOOKS.
- Virgilio. (1993). Huracanes, Tornados y Similares. Sistema Nacional de Protección Civil.
- Wang, S., Zheng, H., Chunguang, L., & Ge, X. (2011). A finite element implementation of strain-softening rock mass. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 67-76.
- Wangen, M. (1993). A finite element formulation in Lagrangian coordinates for heat and fluid flow in compacting sedimentary basins. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 705-733.
- Wardlaw, S., & Salisbury, R. (2010). Effective Assessment of Top Hole Drilling Hazards for Deep Water Wells Using 3D Seismic Data. Fugro GeoConsulting, 1-38.
- Washington. (18 de Junio de 2010). Where is the Oil Spill? Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Largest environmental disaster in U.S., and possibly world history: <http://www.globalresearch.ca/PrintArticle.php?articleId=19813>

- WHOI. (21 de Abril de 2006). Ocean Explorer, NOAA. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Autonomous Benthic Explorer (ABE): <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/abe/abe.html>
- Yu, L., & Batlle, F. (2011). A hybrid method for quasi-three-dimensional slope stability analysis in a municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 2484-2496.
- Zakeri, A. (2008). A Potentially Devastating Offshore Geohazard – Submarine Debris Flow Impact on Pipelines. *EXPLORATION & PRODUCTION – OIL & GAS REVIEW – OTC EDITION*, 118-121.