

TABLA DE CONTENIDO

4	DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	11
4.3	PERMISO DE VERTIMIENTO	11
4.3.1	Generalidades del permiso de vertimiento	13
4.3.1.1	Caracterización de las actividades generadoras de las aguas residuales	13
4.3.1.1.1	Aguas residuales domésticas	14
4.3.1.1.2	Manejo de aguas residuales no domesticas o industriales	15
4.3.1.2	Caracterización del vertimiento	17
4.3.1.3	Composición típica de aguas residuales domésticas	18
4.3.1.4	Composición típica de aguas residuales no domesticas o industriales	19
4.3.1.5	Descripción de las alternativas de manejo de las aguas residuales generadas y los sistemas de tratamiento propuestos	25
4.3.1.5.1	Sistema de tratamiento de las Aguas residuales domésticas (ARD)	25
4.3.1.5.2	Aguas Residuales No Domésticas (industriales)	26
4.3.2	Vertimiento en cuerpos de agua	43
4.3.3	Vertimientos en suelo	43
4.3.3.1	Caracterización fisicoquímica del suelo – Descripción de las unidades de suelo	44
4.3.3.2	Determinación de las unidades cartográficas de suelo aptas para vertimiento	45
4.3.3.2.1	Descripción de las unidades de suelo de interés para realizar vertimiento de aguas residuales tratadas en suelo	46
4.3.3.3	Localización y caracterización fisicoquímica del área de disposición	57
4.3.3.3.1	Caracterización general de los suelos utilizados para el diseño del sistema de riego	66
4.3.3.4	Análisis de los elementos climáticos	67
4.3.3.4.1	Elementos climáticos para los diseños de los sistemas de riego y modelación de vertimiento y periodo de simulación utilizado	68
4.3.3.5	Avance del frente húmedo en el perfil del suelo	70
4.3.3.5.1	Cálculo de la velocidad de infiltración básica - Pruebas de percolación o infiltración	70
4.3.3.6	Variación del nivel freático	73
4.3.3.7	Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero asociado	74
4.3.3.8	Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 3930 Art. 42 (adoptado por el ARTÍCULO 2.2.3.3.5.2. del decreto 1076 del 2015)	74

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

4.3.3.8.1	Datos del solicitante del permiso de vertimiento	74
4.3.3.8.2	Poder debidamente otorgado al apoderado	74
4.3.3.8.3	Certificado de existencia y representación legal de la persona jurídica	74
4.3.3.8.4	Datos del predio, propiedad o inmueble utilizado para realizar el vertimiento	74
4.3.3.8.5	Costo del proyecto	75
4.3.3.8.6	Fuente de abastecimiento de agua	75
4.3.3.8.7	Características de las actividades que generan el vertimiento.	75
4.3.3.8.8	Plano donde se identifique origen, cantidad y localización georreferenciada de las descargas al cuerpo de agua o al suelo	75
4.3.3.8.9	Caudal de la descarga expresada en litros por segundo	76
4.3.3.8.10	Frecuencia de la descarga expresada en días por mes	77
4.3.3.8.11	Tiempo de la descarga expresada en horas por día	77
4.3.3.8.12	Tipo de flujo de la descarga indicando si es continuo o intermitente	77
4.3.3.8.13	Caracterización actual del vertimiento existente o estado final previsto para el vertimiento proyectado de conformidad con la norma de vertimientos vigente.	77
4.3.3.8.14	Ubicación, descripción de la operación del sistema, memorias técnicas y diseños de ingeniería conceptual y básica, planos de detalle del sistema de tratamiento y condiciones de eficiencia del sistema de tratamiento que se adoptará	78
4.3.3.8.15	Concepto sobre el uso del suelo expedido por la autoridad municipal competente.	78
4.3.3.8.16	Plan de gestión del riesgo para el manejo del vertimiento	78
4.3.3.9	Evaluación ambiental del vertimiento	78
4.3.3.9.1	Localización georreferenciada de proyecto, obra o actividad.	79
4.3.3.9.2	Memoria detallada del proyecto, obra o actividad que se pretenda realizar, con especificaciones de procesos y tecnologías que serán empleados en la gestión del vertimiento. - Información detallada sobre la naturaleza de los insumos, productos químicos, formas de energía empleados y los procesos químicos y físicos utilizados en el desarrollo del proyecto, obra o actividad que genera vertimientos.	79
4.3.3.9.3	Predicción y valoración de los impactos que puedan derivarse de los vertimientos generados por el proyecto, obra o actividad al suelo, considerando su vocación conforme a lo dispuesto en los instrumentos de ordenamiento territorial y los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.	79

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

4.3.3.9.4	Predicción a través de modelos de simulación de los impactos que cause el vertimiento en el cuerpo de agua y/o al suelo, en función de la capacidad de asimilación	82
4.3.3.9.5	Manejo de residuos asociados a la gestión del vertimiento.	159
4.3.3.9.6	Descripción y valoración de los impactos generados por el vertimiento y las medidas para prevenir, mitigar, corregir y compensar dichos impactos al cuerpo de agua o al suelo.	159
4.3.3.9.7	Posible incidencia del proyecto, obra o actividad en la calidad de la vida o en las condiciones económicas, sociales y culturales de los habitantes del sector o de la región en donde pretende desarrollarse, y medidas que se adoptarán para evitar o minimizar efectos negativos de orden sociocultural que puedan derivarse de la misma	160
4.3.3.10	Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 050 Art. 6	160
4.3.3.10.1	Línea base del suelo	160
4.3.3.10.2	Línea base del agua subterránea	160
4.3.3.10.3	Sistema de disposición de los vertimientos.	161
4.3.3.10.4	Área de disposición del vertimiento	162
4.3.3.10.5	Plan de monitoreo	162
4.3.3.10.6	Plan de cierre y abandono del área de disposición del vertimiento	162
4.3.4	Inyección y reinyección de agua	171
4.3.5	Evaporación mecánica	174
4.3.5.1	Objetivo	175
4.3.5.2	Descripción del proceso	175
4.3.5.3	Principios físicos involucrados en el proceso de evaporación mecánica	178
4.3.5.3.1	Sedimentación de las gotas a través del aire	178
4.3.5.3.2	Distancia de frenado de una gota	180
4.3.5.3.3	Proceso de evaporación de gotas en el aire	182
4.3.5.3.4	Disminución del diámetro de la gota en función del tiempo	182
4.3.5.3.5	Tiempo de vida de una gota durante el proceso de evaporación	185
4.3.5.3.6	Trayectoria de una gota de agua a la salida del sistema de aspersión mecánica	185
4.3.5.3.7	Interacción de las gotas generadas con la lluvia	186
4.3.5.4	Infraestructura requerida	187
4.3.5.5	Ubicación del sistema de evaporación mecánica	189

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

4.3.5.6	Programa de seguimiento y monitoreo	189
4.3.6	Entrega a terceros autorizados	190
4.3.7	Riego en vías	190

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.3-1	Tipos y clasificación de los residuos líquidos generados por etapas del Bloque CPO-5	13
Tabla 4.3-2	Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas	18
Tabla 4.3-3	Composición de aguas residuales no domésticas tratadas y sin tratamiento	20
Tabla 4.3-4	Sistema dewatering	27
Tabla 4.3-5	Insumos típicos requeridos para tratamiento de aguas	42
Tabla 4.3-6	Descripción del perfil modal de la Consociación AVC (Cal-Vert-AVC01 – S1)	48
Tabla 4.3-7	Descripción del perfil modal de la Consociación RVG (CAL-VERT-RVG05)	50
Tabla 4.3-8	Descripción del perfil modal de la Asociación PVB (CAL-VERT-PVB04)	52
Tabla 4.3-9	Descripción del perfil modal de la Consociación PVA (CAL-VERT-PVA03)	54
Tabla 4.3-10	Descripción del perfil modal de la Consociación LVJ (CAL-VERT-LVJ14)	56
Tabla 4.3-11	Unidades cartográficas de suelos solicitadas para realizar permisos de vertimiento y perfiles modal representativos caracterizados	58
Tabla 4.3-12	Resultados análisis de laboratorio de parámetros – Parte 1	59
Tabla 4.3-13	Resultados análisis de laboratorio de parámetros – Parte 2	63
Tabla 4.3-14	Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo AVC apta para realizar aspersión	66
Tabla 4.3-15	Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo RVG apta para realizar aspersión	66
Tabla 4.3-16	Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo PVB apta para realizar aspersión	66
Tabla 4.3-17	Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo PVA apta para realizar aspersión	67
Tabla 4.3-18	Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo LVJ apta para realizar aspersión	67
Tabla 4.3-19	Valores de precipitación y evapotranspiración	69
Tabla 4.3-20	Clasificación de la velocidad de infiltración básica	72

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Tabla 4.3-21	Resultados de las pruebas de infiltración en campo de los perfiles caracterizados de las unidades aptas para realizar vertimiento mediante campos de aspersión	72
Tabla 4.3-22	Datos del solicitante	74
Tabla 4.3-23	Caudal de vertimiento para cada unidad de suelo	76
Tabla 4.3-24	Frecuencia de descarga expresada en día por mes para cada unidad de suelo caracterizada	77
Tabla 4.3-25	Regulación de calidad del vertimiento	83
Tabla 4.3-26	Regulación de calidad del vertimiento 2	84
Tabla 4.3-27	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso	86
Tabla 4.3-28	Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla roja de 1.6 mm, Marca NAANDANJAIN	93
Tabla 4.3-29	Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla roja de 1.6 mm, Marca NAANDANJAIN	94
Tabla 4.3-30	Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla amarilla de 2.2 mm, Marca NAANDANJAIN	94
Tabla 4.3-31	Dimensionamiento de tuberías y área requerida para los ZODAR tipo por cada unidad cartográfica de suelo	96
Tabla 4.3-32	Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS AVC, RVG y PVB	96
Tabla 4.3-33	Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS PVA y LVJ	97
Tabla 4.3-34	Parámetros físicos asociados al flujo del agua del suelo	109
Tabla 4.3-35	Valores optimizados de los parámetros de flujo de agua en el suelo	110
Tabla 4.3-36	Concentraciones finales previstas para el límite inferior de los perfiles modales, tras un año de vertimiento de aguas residuales escenario de modelación 2	152
Tabla 4.3-37	Concentraciones finales previstas para el límite inferior de los perfiles modales, tras un año de vertimiento de aguas residuales escenario de modelación 3	153
Tabla 4.3-38	Evaluación índice de amenaza o potencial de contaminación, método de Foster e Hirata (1988)	157
Tabla 4.3-39	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos obtenida para el Bloque CPO-5	157
Tabla 4.3-40	Labores de desmantelamiento y abandono	165
Tabla 4.3-41	Infraestructuras predominantes del abandono y restauración en locaciones	167
Tabla 4.3-42	Elementos a desmantelar en estaciones de tratamiento de agua residual doméstica y no doméstica (industrial) y otra infraestructura	168

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Tabla 4.3-43	Usos actuales presentes en las unidades cartográficas de suelo aptas, de interés y solicitadas para realizar vertimiento dentro del Bloque CPO-5	171
Tabla 4.3-44	Solicitudes específicas para la actividad de Inyección / reinyección de agua asociada para disposición y recobro mejorado Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5	172
Tabla 4.3-45	Parámetros mínimos establecidos para vertimiento en la resolución 0631, decreto 1076	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.3-1	Principio físico del proceso de Ósmosis	28
Figura 4.3-2	Principio físico del proceso de Ósmosis Inversa	29
Figura 4.3-3	Proceso general de Ósmosis Inversa	29
Figura 4.3-4	Vista general del equipo de Ósmosis inversa	30
Figura 4.3-5	Vista lateral del equipo de Ósmosis inversa	31
Figura 4.3-6	Funcionamiento equipo de radiación ultravioleta	32
Figura 4.3-7	Efecto de la luz ultravioleta	33
Figura 4.3-8	Lámpara germicida de luz UV (acero Inoxidable)	34
Figura 4.3-9	Proceso típico de tratamiento agua de producción.	35
Figura 4.3-10	Tanque Desnatador o Skim Tank Vertical	36
Figura 4.3-11	Tanque Desnatador o Skim Tank Horizontal	37
Figura 4.3-12	Unidades de Filtración.	38
Figura 4.3-13	Tanque Decantador.	38
Figura 4.3-14	Diagrama Tanque Decantador.	39
Figura 4.3-15	Unidades de Flotación	39
Figura 4.3-16	Frac Tank para el almacenamiento de las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5	40
Figura 4.3-17	Muestra implementada y prueba de jarras a realizar a las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5	41
Figura 4.3-18	Tratamiento en 3 etapas a realizar a las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5	41
Figura 4.3-19	Unidades cartográficas para las que se solicita permiso de vertimiento en suelo en el Bloque CPO-5	46
Figura 4.3-20	Microcuencas obtenidas del análisis para el Bloque CPO-5	68

Figura 4.3-21	Distribución de las unidades cartográficas de suelo de interés y aptas para realizar vertimientos en suelo	76
Figura 4.3-22	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo AVC, la cual es de interés y apta para riego	98
Figura 4.3-23	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo RVG, la cual es de interés y apta para riego	99
Figura 4.3-24	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PVB, la cual es de interés y apta para riego	100
Figura 4.3-25	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PVA, la cual es de interés y apta para riego	101
Figura 4.3-26	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo LVJ, la cual es de interés y apta para riego	102
Figura 4.3-27	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-AVC01, Unidad de suelo AVC	112
Figura 4.3-28	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo AVC. Escenario 1	113
Figura 4.3-29	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo AVC. Escenarios 2 y 3:	114
Figura 4.3-30	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2	115
Figura 4.3-31	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2	115
Figura 4.3-32	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2	116
Figura 4.3-33	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2	117
Figura 4.3-34	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3	118
Figura 4.3-35	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3	118
Figura 4.3-36	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3	119
Figura 4.3-37	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3	119
Figura 4.3-38	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-RVG05, Unidad de suelo RVG	120
Figura 4.3-39	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RVG. Escenario 1	121
Figura 4.3-40	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RVG. Escenarios 2 y 3:	121
Figura 4.3-41	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2	122
Figura 4.3-42	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2	123
Figura 4.3-43	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2	124
Figura 4.3-44	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2	124

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Figura 4.3-45	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3	125
Figura 4.3-46	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3	126
Figura 4.3-47	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3	127
Figura 4.3-48	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3	127
Figura 4.3-49	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-PVA03, Unidad de suelo PVA	128
Figura 4.3-50	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVA. Escenario 1	128
Figura 4.3-51	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVA. Escenarios 2 y 3:	129
Figura 4.3-52	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2	130
Figura 4.3-53	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2	131
Figura 4.3-54	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2	132
Figura 4.3-55	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2	132
Figura 4.3-56	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3	133
Figura 4.3-57	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3	134
Figura 4.3-58	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3	134
Figura 4.3-59	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3	135
Figura 4.3-60	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-PVB04, Unidad de suelo PVB	136
Figura 4.3-61	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVB. Escenario 1	136
Figura 4.3-62	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVB. Escenarios 2 y 3:	137
Figura 4.3-63	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2	138
Figura 4.3-64	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2	139
Figura 4.3-65	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2	140
Figura 4.3-66	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2	140
Figura 4.3-67	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3	141
Figura 4.3-68	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3	142
Figura 4.3-69	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3	142
Figura 4.3-70	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3	143
Figura 4.3-71	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-LVJ14, Unidad de suelo LVJ	144

Figura 4.3-72	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo LVJ. Escenario 1	145
Figura 4.3-73	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo LVJ. Escenarios 2 y 3:	146
Figura 4.3-74	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2	147
Figura 4.3-75	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2	148
Figura 4.3-76	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2	148
Figura 4.3-77	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2	149
Figura 4.3-78	Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3	150
Figura 4.3-79	Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3	150
Figura 4.3-80	Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3	151
Figura 4.3-81	Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3	152
Figura 4.3-82	Clase de contaminante (A).	155
Figura 4.3-83	Intensidad de contaminante (B).	155
Figura 4.3-84	Modo de disposición de contaminante (C).	156
Figura 4.3-85	Tiempo de aplicación de la carga contaminante (D).	156
Figura 4.3-86	Relación vulnerabilidad del acuífero, amenaza por carga contaminante y riesgo de contaminación.	158
Figura 4.3-87	Plan de desmantelamiento y abandono	164
Figura 4.3-88	Diseños convencionales de evaporadores mecánicos	176
Figura 4.3-89	Capacidad de Evaporación Mecánica a 1 MMSCF de aire seco en función del déficit de humedad relativa	176
Figura 4.3-90	Distribución del tamaño de gota generado en la evaporación mecánica	178
Figura 4.3-91	Velocidad de sedimentación para una gota de agua en función de su tamaño	180
Figura 4.3-92	Distancia de frenado en función del tamaño de gota	181
Figura 4.3-93	Tasa de evaporación k para gotas moviéndose a su velocidad de sedimentación a través del aire	184
Figura 4.3-94	Tasa de evaporación k a distintas temperaturas ambiente con Δt constante (5°C)	184
Figura 4.3-95	Tiempo de vida y tiempo de vuelo de las gotas en función de su tamaño	186
Figura 4.3-96	Distribución promedio del tamaño de las gotas de lluvia	187
Figura 4.3-97	Evaporador mecánico en funcionamiento.	188

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Figura 4.3-98 Estación meteorológica en un área de proceso de evaporación mecánica 188

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 4.3-1	Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR	26
Fotografía 4.3-2	Tipo de relieve de Mesas y superficies onduladas en la Consociación AVC, en la vereda Remolino, jurisdicción del municipio de Puerto López - Meta	47
Fotografía 4.3-3	Tipo de relieve de terraza gravitacional nivel 5 en la Consociación RVG, en la vereda San Isidro, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta	50
Fotografía 4.3-4	Tipo de relieve de terrazas en la Asociación PVB, en el predio Moricherato, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta	52
Fotografía 4.3-5	Tipo de relieve de terraza en la Consociación PVA, en el predio Las Gaviotas, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta	54
Fotografía 4.3-6	Tipo de relieve de lomas y colinas asociadas glacis en la Consociación LVJ, en la vereda Alto de navaja, jurisdicción del municipio de Puerto López - Meta	56

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

4 DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES

4.3 PERMISO DE VERTIMIENTO

La Resolución No. 600 de 2012 (pág. 133) otorgó permiso de vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales generadas durante el desarrollo de las actividades exploratorias que comprende el proyecto, previamente tratadas, mediante los siguientes métodos:

- Vertimientos por aspersión en campos de aspersión:

Se autoriza el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales tratadas en campos de aspersión con un caudal máximo de 3 L/s, de manera intermitente y en cualquier época del año, en un área adecuada dentro de las cinco (5) hectáreas autorizadas para cada locación, lo que quiere decir que no se adecuarán áreas adicionales para los campos de infiltración.

- Riego en vías

Se autoriza el riego en vías de las aguas residuales tratadas (domésticas y/o industriales), durante cualquier época del año.

- Entrega a terceros

Se autoriza la entrega a terceros de las aguas asociadas de producción, que se generen durante las pruebas extensas de producción, que serán transportadas junto con el crudo que genere el proyecto CPO-5 a la estación recolectora, perteneciente a un tercero y que tenga la capacidad de separar, medir, recoger y tratar la producción de crudo, gas y agua, y con la cual la Empresa llegue a un acuerdo.

También autorizó los sistemas de tratamiento propuestos en el EIA para las aguas residuales domésticas e industriales: uso de baños portátiles, sistema de tanques sépticos para campamentos transitorios, planta de lodos activados tipo REDFOX, sistema de tratamiento de aguas residuales industriales – STARI, los fluidos resultantes de la exploración serán llevados en carro tanque a una estación recolectora donde se tratan las aguas de producción.

Mediante Radicado el 4120-E1-70724 del 18 de diciembre de 2014 la ANLA autorizó piloto de sistema de aspersión mediante evaporación mecánica.

Teniendo en cuenta lo anterior, para la presente modificación de licencia ambiental del Bloque CPO-5, se solicita mantener los métodos de vertimiento aprobados bajo la Resolución No. 600 de 2012. Por otro lado, se solicita modificar el numeral 3.1 relacionado con el vertimiento en campos de aspersión, de la siguiente manera:

- Se solicita permiso de vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas o industriales tratadas sobre el suelo, para 5 unidades de suelos AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ de las cuales: se solicita vertimiento en todo el año para las unidades AVC y PVB; y para época de bajas precipitaciones (comprendida entre los meses de noviembre a marzo) para las unidades RVG, PVA y LVJ.

- Se solicita un caudal máximo de disposición de 3 L/s por zona de disposición de aguas residuales (ZODAR), en áreas de 2,05 ha a 2,64 ha (dependiendo la unidad de suelo), tal como se describe en el numeral 4.3.4.2 del Capítulo 4.3.
El uso de estas Zonas dependerá de las necesidades de la operación y del desarrollo del Proyecto. En el respectivo PMA específico se detallarán las obras a realizar conforme las condiciones que presente cada área puntual, en el momento.

Finalmente, se solicita incorporar el tratamiento y la disposición final de las aguas residuales domésticas, industriales y de producción o formación mediante sistemas de evaporación (evaporación mediante tanques australianos y evaporación mecánica), al interior de las locaciones multipozo, en un caudal máximo de 6.000 BWPd, garantizando los siguientes parámetros: Temperatura mínima: 21.4°C, (3) Temperatura máxima: 33.2°C, (4) Humedad Relativa Mínima: 70% y (5) Humedad Relativa Máxima: 86%.

Según el Decreto 1076 de 2015, en su artículo 2.2.3.3.1.3, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), se considera vertimiento a toda descarga final de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido hacia un cuerpo de agua, un sistema de alcantarillado o el suelo. No obstante, estos vertimientos deben ser aprobados por la autoridad competente, dependiendo del proyecto, y cumplir con requisitos mínimos de calidad para minimizar los impactos y alteraciones en el medio receptor.

El proyecto para la modificación de la licencia ambiental a desarrollo para el Bloque CPO-5 no contempla la disposición de aguas residuales tratadas en cuerpos de agua superficiales; sin embargo, sí prevé la disposición en el suelo a través de Zonas de Disposición de Aguas Residuales (en adelante ZODAR) las cuales se realizarán mediante campos de aspersión, previo tratamiento, de aguas residuales domésticas y aguas residuales no domésticas (industriales). Las ZODAR estarán ubicadas dentro o contiguas de las locaciones y facilidades de producción del proyecto. Por lo tanto, este capítulo se centrará en describir todo lo relacionado con las aguas residuales, tanto domésticas, como no domésticas (industriales), así como las aguas asociadas a la producción, incluyendo su manejo, tratamiento y los procesos de optimización previstos para su disposición.

En el Bloque CPO-5 el manejo de agua se realizará bajo estos cuatro pilares operacionales, los cuales son:

- Minimización de la generación de las aguas residuales.
- Recuperación y recirculación.
- Tratamiento.
- Disposición responsable y transparente.

El tratamiento de las aguas residuales, tanto domésticas como no domésticas (industriales), así como de las aguas de producción, se llevará a cabo de manera que los parámetros fisicoquímicos del agua se ajusten a los valores o rangos que garanticen el cumplimiento de la normativa de vertimientos establecida en el Decreto 1076 de 2015, o en aquella que lo modifique, sustituya o derogue. En particular, el vertimiento de Agua Residual no Doméstica (ARnD) tratada deberá cumplir con los criterios establecidos en la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015, mientras que el vertimiento de Agua Residual Doméstica (ARD) deberá ajustarse a lo dispuesto en la Resolución 699 del 6 de julio de 2021. Todo esto con el fin de evitar alteraciones no deseadas en las concentraciones de agentes físicos, químicos y microbiológicos patógenos en el agua.

El presente permiso de vertimiento en suelo se solicita para el vertimiento de ARD y ARnD tratadas en zonas de disposición de aguas residuales (en adelante ZODAR) que varían de áreas desde los 2,05 ha hasta los 2,64 ha según la unidad de suelo para un caudal de 3 l/s en las unidades cartográficas de suelos AVC y PVB para todo el año y para las unidades cartográficas RVG, PVA y LVJ en época de bajas precipitaciones, o cuando los suelos presenten características de no saturación para realizar el vertimiento, se aclara que para el desarrollo del proyecto se contempla el establecimiento de ZODAR las cuales estarán ubicadas al interior de cada una de las locaciones y facilidades de producción, dependiendo de los diseños finales de estas y siguiendo lo establecido en la zonificación ambiental.

4.3.1 Generalidades del permiso de vertimiento

4.3.1.1 Caracterización de las actividades generadoras de las aguas residuales

Durante la ejecución del proyecto se generarán aguas residuales de tipo doméstico como las aguas negras y grises por las unidades sanitarias, los campamentos y el casino y de tipo no domestico o industrial generadas en la etapa constructiva, operativa y demás contempladas en las actividades transversales como por ejemplo las generadas por la preparación de lodos, en los talleres, procesos en los CPFs y facilidades, preparación de concretos, en las áreas de maquinarias y equipos, en las áreas de perforación de pozos, piscinas, entre otros. Para lo cual, se debe tener claridad del manejo, almacenamiento, disposición de estas, como se describe a lo largo del presente capitulo y en el **Capítulo 2**. A continuación, se presenta por tipo de AR y etapa el manejo que se realizara del agua residual generada durante la ejecución del proyecto:

Tabla 4.3-1 Tipos y clasificación de los residuos líquidos generados por etapas del Bloque CPO-5

Tipo de agua residual	Clasificación	Descripción	Etapas del proyecto
Agua Residual Doméstica	Aguas negras	Provenientes del funcionamiento de las unidades sanitarias.	Etapas de Actividades Transversales
	Aguas grises	Provenientes de unidades de lavado de cara, manos, lavaplatos, duchas, lavandería y menaje en las áreas donde se adelanten labores.	Etapas de construcción, adecuación y mantenimiento Etapas de operación Etapas de desmantelamiento y abandono
Agua Residual No Doméstica	Fluidos de Perforación	(Fase acuosa de lodos base agua, base aceite y/o sintéticos) generados durante el proceso de perforación	Etapas de operación

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

Tipo de agua residual	Clasificación	Descripción	Etapa del proyecto
		por los cambios y renovación de fluidos de perforación. Fluidos residuales generados durante el proceso de completamiento que puede ser lodo de perforación diseñado para esta operación, salmuera, o cualquier fluido libre de sólidos que proporcione el peso necesario para controlar el pozo durante las operaciones de completamiento.	
	Agua residual de la prueba hidrostática	Agua que resulta luego de finalizada la prueba hidrostática durante la construcción y/o mantenimiento de líneas de flujo, tanques y demás facilidades mecánicas.	Etapa de construcción, adecuación y mantenimiento
	Aguas lluvias con grasas, aceites y/o hidrocarburos	Aguas lluvias que caen o pasan por el área de operación de la locación o facilidad, son recolectadas en cunetas perimetrales a los equipos y descargadas en un skimmer.	Etapa de Actividades Transversales Etapa de construcción, adecuación y mantenimiento Etapa de operación Etapa de desmantelamiento y abandono
Otros Residuos Líquidos	Aceites y lubricantes usados	Lubricantes desechados en las labores de mantenimiento en maquinaria y equipos, así como fugas de combustible de los equipos, grasas y aceites recuperados en las trampas de grasas, skimmer, entre otros.	
Aguas de producción		Aguas provenientes de la formación asociada a la exploración y explotación de hidrocarburos. Estas aguas son recibidas y separadas de los hidrocarburos en las facilidades de producción y enviadas al sistema de tratamiento para su posterior reinyección e inyección. Estas aguas provienen de las formaciones geológicas donde se encuentran los depósitos de petróleo o gas, y su extracción es una consecuencia natural de los procesos de producción.	Etapa de operación

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.1.1.1 Aguas residuales domésticas

➤ *Etapa de construcción, adecuación y mantenimiento:*

Durante esta etapa, en los diferentes frentes de obra se instalarán baños portátiles cuyo mantenimiento y disposición de residuos los realizará el contratista encargado de estos.

En caso de instalarse campamentos transitorios se requerirá la adecuación de unidades sanitarias, de aseo y de casino donde se generarán aguas residuales domésticas, estos residuos serán recolectados por un sistema de tanques sépticos que permitirán el almacenamiento y pretratamiento de las aguas. Para esto se requerirá de una trampa de grasas a la salida del casino para retener grasas y aceites, así como sólidos de gran tamaño, de tal manera que no interfiera con el mantenimiento del tanque séptico.

Para los sólidos obtenidos de las trampas de grasas se tiene previsto la disposición por un tercero autorizado que cuente con los permisos ambientales vigentes para su operación.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

➤ *Subetapa de Perforación:*

El tratamiento para las aguas negras y grises se realizará con sistemas independientes. El tratamiento de las aguas residuales domésticas (negras) se maneja con una planta de tratamiento compacto tipo Red Fox o similar. Después del tratamiento en la planta se conducirán las aguas hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales.

Las aguas grises que se generan de las duchas, lavamanos, lavandería y casino se conducirán a través de un sistema de tuberías independientes hasta una trampa de grasas, donde se retendrán los sólidos, residuos de alimentos y las grasas, esta deberá contar con la suficiente capacidad de almacenamiento para recoger el volumen de aguas grises.

Los sólidos derivados de la trampa serán dispuestos por medio de una empresa que cuente con los permisos ambientales vigentes. Desde la trampa de grasas, las aguas grises serán enviadas hasta el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas donde se mezclarán con estas últimas, para su posterior disposición por cualquiera de las alternativas planteadas para el vertimiento de los residuos líquidos tratados, previo cumplimiento con la normatividad.

➤ *Subetapa de pruebas de producción y operación de facilidades:*

El tratamiento de las aguas residuales domésticas durante la etapa de pruebas de producción y producción será el mismo previsto durante la etapa de perforación, utilizando una planta de lodos activados de igual o menor capacidad.

➤ *Etapa de desmantelamiento y abandono:*

Al igual que en la fase de construcción se instalarán baños portátiles cuyo mantenimiento y disposición de residuos los realizará el contratista encargado de los mismos.

En cualquier situación que se presente en la cual no sea posible el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas por las actividades realizadas en el Bloque CPO-5, se hará la entrega y disposición final de estas con terceros autorizados que cuenten con la respectiva licencia ambiental.

4.3.1.1.2 Manejo de aguas residuales no domesticas o industriales

➤ *Etapa de construcción, adecuación y mantenimiento:*

Durante la etapa de obras civiles no se generarán aguas residuales industriales; sin embargo, se prevé la generación de residuos líquidos aceitosos, procedentes del mantenimiento periódico de equipos, como las plantas de generación de energía y la maquinaria pesada (retroexcavadora, moto niveladora, vibrocompactador, volquetas y carro tanques). Estos residuos serán almacenados en canecas metálicas en un área impermeabilizada que cuente con sistemas para manejo y retención de derrames (drenajes) y evacuados por la compañía contratista de obras civiles o un proveedor autorizado que cuente con los permisos ambientales respectivos.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

Prueba Hidrostática de las líneas de flujo: El agua empleada para la prueba hidrostática no requerirá el uso de ningún tipo de sustancia ni aditivo; sin embargo, antes de realizar la disposición final se realizarán monitoreos fisicoquímicos con el fin de determinar su calidad y que se cumplan los parámetros establecidos por la Resolución 0631 del 2015. El agua utilizada en las pruebas hidrostáticas se dispondrá en dos formas:

- Riego en vías destapadas en época seca, para lo cual se usarán carrotanques con sistema de flautas que recorrerán dichas vías disponiendo de forma controlada las aguas.
- Incorporación al sistema de manejo de aguas industriales de las Facilidades de Producción y posterior disposición en la zona de riego de ésta.

➤ *Subetapa de Perforación*

Las aguas generadas durante las actividades del lavado de tuberías, equipos, motores y herramientas y aguas lluvias en contacto con equipos aceitados y enlodados, serán conducidas a través de un sistema de cunetas perimetrales construidas para recolectar las aguas lluvias y aguas de lavado contaminadas por fugas puntuales de aceites o químicos hacia un desarenador-skimmer, ubicado en la plataforma de cada pozo, donde se realizará la retención de grasas y aceites.

Las aguas generadas en la unidad de dewatering (tratamiento realizado al lodo descartado del sistema activo) serán conducidas al sistema de tratamiento de aguas residuales industriales para su tratamiento y posterior disposición, previa verificación de parámetros, cumpliendo lo estipulado en los Artículos 2.2.3.3.9.14 y 2.2.3.3.9.16 del Decreto 1076 de 2015 o la norma que lo modifique o sustituya. La fracción sólida proveniente del proceso se conducirá a las celdas de cortes.

Para el tratamiento óptimo de las aguas industriales se debe adecuar un área para instalación de tanques o de piscinas para su tratamiento, las cuales son recubiertas por geomembrana para garantizar la impermeabilidad del fondo y las paredes.

En los tanques donde llegarán las aguas industriales de perforación se realizará el tratamiento mediante procesos fisicoquímicos (coagulación, floculación, desinfección y/o aireación).

Como alternativa de ahorro para reducir el consumo en la captación y generación de aguas residuales industriales, se contempla la posibilidad de realizar una recirculación del lodo de perforación, hasta que sea necesario descartarlo del sistema.

El almacenaje de los residuos líquidos aceitosos deberá responder a lo planteado en el capítulo III del Decreto 4741 de 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos.

Si hay efluentes residuales que desborden la capacidad de tratamiento y que no cumplan con los parámetros regulatorios, estos serán almacenados en tanques o Frac Tanks para su envío y disposición en centros de acopio y tratamiento licenciados (Apoyo ambiental secundario).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

➤ *Subetapa de pruebas de producción y operación de facilidades:*

Aguas Aceitosas: Para el manejo de las aguas aceitosas se dispondrá de un separador API en las facilidades de producción. Los fluidos recolectados serán incorporados al proceso bombeándolos hacia la entrada del sistema de separación.

Aguas de producción: El agua asociada a la producción de crudo será separada en las instalaciones de procesamiento con el fin de realizar el tratamiento autorizado para su posterior disposición o reuso bajo lo establecido por la licencia ambiental del campo. Al momento en que el tratamiento y recirculación del agua de producción no pueda realizarse debido a la calidad del agua, esta será entregada a un tercero especializado para su disposición final.

Residuos líquidos aceitosos: Los líquidos aceitosos producto de actividades de derrames accidentales, desfogue de válvulas, mantenimiento de maquinaria y/o equipos, serán recolectadas en canecas de 55 galones debidamente marcadas con el líquido almacenado y se deben almacenar en un sitio seguro que cuente con piso impermeabilizado, encerrado y techado y un sistema de cunetas perimetrales, para luego ser enviadas al Skimmer o separador API, en las facilidades de producción e integrarlas al proceso.

Los residuos líquidos aceitosos podrán ser entregados para su tratamiento y disposición a una empresa especializada y/o serán devueltos a los proveedores, en el caso de que éstos tengan establecidos programas de manejo para el tratamiento y disposición final de estos residuos. Se llevará un registro de los volúmenes generados, almacenados, transportados, tratados y dispuestos.

Aguas aceitosas o contaminadas: Cuando se observen aguas contaminadas con hidrocarburos, estas serán recolectadas y enviadas al sistema de tratamiento o piscinas de tratamiento de aguas residuales industriales.

Los residuos líquidos aceitosos generados por el mantenimiento de maquinaria y equipos (aceites usados), así como los materiales peligrosos, se almacenarán en un sitio seguro que cuente con piso impermeabilizado y sistema de cunetas perimetrales, conectadas al sistema de tratamiento de aguas industriales.

4.3.1.2 Caracterización del vertimiento

Los efluentes contarán con características aptas para disponer según la normatividad. Para la disposición final a través de alguna de las alternativas planteadas para el proyecto, las concentraciones estimadas no excederán la normativa vigente de vertimientos ni causarán alteración de los criterios de calidad definidos en los artículos 2.2.3.3.9.3, 2.2.3.3.9.4 y 2.2.3.3.9.13 del Decreto 1076 de 2015.

En el caso específico de la entrega del agua a terceros para la disposición final del vertimiento, las características fisicoquímicas del líquido será en las condiciones o especificaciones que se

acuerde con la empresa que cuente con los permisos ambientales o con la operación de los campos aledaños que la reciba.

4.3.1.3 Composición típica de aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son las producidas a partir de actividades tales como: preparación de alimentos, limpieza, aseo personal, lavado de ropa y servicios sanitarios. Se dividen en aguas negras y grises como se mencionó anteriormente; las aguas grises provienen de la cocina y ducha; y las aguas negras provienen de los servicios sanitarios. Las aguas residuales industriales proveniente de lavado de equipos, pruebas de producción, precipitaciones pluviométricas, aceites y productos químicos derramados, lodos base agua y cortes base agua. En la **Tabla 4.3-2** se citan las características de calidad para las aguas residuales domésticas típicas, para las aguas residuales domésticas, los cuales corresponden a valores teóricos, ya que no se cuenta con monitoreo de estas.

Tabla 4.3-2 Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas

Variable	Unidades	Concentración		
		Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales	mg/L	1200	720	350
Sólidos disueltos totales	mg/L	850	500	250
Sólidos suspendidos totales	mg/L	350	220	100
Sólidos sedimentables	mg/L	20	10	5
Carbono orgánico total	mg/L	290	160	80
DBO	mg/L	400	220	110
DQO	mg/L	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/L	85	40	20
Nitrógeno orgánico	mg/L	35	15	8
Amoniaco libre	mg/L	50	25	12
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total	mg/L	15	8	4
Fósforo orgánico	mg/L	5	3	1
Fósforo inorgánico	mg/L	10	5	3
Cloruros	mg/L	100	50	30
Sulfatos	mg/L	50	30	20
Alcalinidad	mg/L	200	100	50
Grasas	mg/L	150	100	50
Coliformes totales	NMP/100 mL	107 – 109	107 – 108	106 – 107
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	mg/L	>400	100 – 400	<100

Fuente: Metcalf & Eddy (1988)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

4.3.1.4 Composición típica de aguas residuales no domésticas o industriales

Las aguas residuales no domésticas (industriales) son las asociadas a procesos de perforación (fluidos de perforación y completamiento) y aguas aceitosas generadas en las actividades a ejecutar en el proyecto recogidas del Skimmer y drenaje de Catchtank (agua lluvia). En la **Tabla 4.3-3** se presentan un ejemplo de las características esperadas de las aguas residuales no domésticas (industriales) en la etapa de perforación generadas por el proyecto del Bloque CPO-5. Sin embargo, es importante destacar que la calidad fisicoquímica del agua residual solo podrá determinarse con precisión una vez que el proyecto entre en operación.

Tabla 4.3-3 Composición de aguas residuales no domésticas tratadas y sin tratamiento

Reporte de Resultados									
Ítem	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	AGUA TRATADA	AGUA SIN TRATAR	Res.631 Art.11
							MnD398452	MnD398453	
1	2023-10-23	Acidez Total*	SM 2310 B	SM 2310 B, Volumetría	5.00	mg CaCO ₃ /L	23,3 +/- 1,79	<5,00	Análisis y Reporte
2	2023-10-22	Alcalinidad total*	SM 2320 B Ed.23 2017	SM 2320 B Ed.23 2017, Volumetría	6.040	mg CaCO ₃ /L	186 +/- 2,43	1497 +/- 19,6	Análisis y reporte
3	2023-10-25	Arsénico Total*	EPA 7062, SM 3114 C	EPA 7062, SM 3114 C, Digestión- AA - Generación de hidruros	0.00250	mg As/L	<0,00250	<0,00250	0.1
4	2023-11-04	Bario Total*	SM 3030 E, SM 3111 D	SM 3030 E, SM 3111 D, Digestión-AA - Llama Oxido Nitros -Acetileno	0.500	mg Ba/L	<0,500	2,96 +/- 0,291	Análisis y Reporte
5	2023-10-26	Cadmio Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.0100	mg Cd/L	<0,0100	<0,0100	0.1
6	2023-11-04	Cianuro Total*	ASTM D7511-12	ASTM D7511-12, Flujo Segmentado	0.0100	mg CN-/L	<0,0100	<0,0100	1.00
7	2023-10-27	Cloruros*	SM 4500 Cl-B Ed.23 2017	SM 4500 Cl-B Ed.23 2017, Método Argentometrico	9.9	mg Cl-/L	347 +/- 8,39	624 +/- 15,1	1200
8	2023-10-26	Cobre Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.100	mg Cu/L	<0,100	<0,100	1
9	2023-10-23	Color Real *	ISO 7887-2011 Método B	ISO 7887-2011 Método B, Colorimetría (436 nm,525 nm,620nm)	N.A	a(436nm)m-1	0,8 +/- 0,0262	87,9 +/- 2,88	Análisis y Reporte
9	2023-10-23	Color Real *	ISO 7887-2011 Método B	ISO 7887-2011 Método B, Colorimetría (436 nm,525 nm,620nm)	N.A	a(525nm)m-1	0,25 +/- 0,00820	37,5 +/- 1,23	Análisis y Reporte
9	2023-10-23	Color Real *	ISO 7887-2011 Método B	ISO 7887-2011 Método B, Colorimetría (436 nm,525 nm,620nm)	N.A	a(620nm)m-1	0,095 +/- 0,00312	18,4 +/- 0,604	Análisis y Reporte
10	Compuestos Orgánicos Volátiles (BTEX)*								
10.1	2023-10-26	Benceno*	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003, HeadSpace -CG/FID	0.0100	mg/L	<0,01	<0,01	Análisis y Reporte
10.2	2023-10-26	Tolueno*	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003, HeadSpace -CG/FID	0.0100	mg/L	<0,01	<0,01	Análisis y Reporte
10.3	2023-10-26	Etilbenceno*	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003, HeadSpace -CG/FID	0.0100	mg/L	<0,01	<0,01	Análisis y Reporte

Reporte de Resultados									
Ítem	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	AGUA TRATADA	AGUA SIN TRATAR	Res.631 Art.11
							MnD398452	MnD398453	
10.4	2023-10-26	o-xileno*	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003, HeadSpace -CG/FID	0.0100	mg/L	<0,01	<0,01	Análisis y Reporte
10.5	2023-10-26	m+p-xileno*	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003	EPA 5021A:2014 / EPA 8015D:2003, HeadSpace -CG/FID	0.0200	mg/L	<0,02	<0,02	Análisis y Reporte
11	2023-10-28	Cromo Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.100	mg Cr/L	<0,100	<0,100	0.5
12	2023-10-22 - 2023-10-27	DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)*	SM 5210 B, ASTM D 888-12 METODO C	SM 5210 B, ASTM D 888-12 METODO C, Incubación 5 días y Luminiscencia	2.00	mg O2/L	18,2 +/- 1,67	2112 +/- 194	200
13	2023-10-30	DQO*	SM 5220D	SM 5220D, Reflujo cerrado y Colorimétrico	5.00	mg O2/L	23,0 +/- 1,97	4906 +/- 419	400
14	2023-10-28	Dureza Cálrica*	SM 3500 Ca-B Ed.23 2017	SM 3500 Ca-B Ed.23 2017, Volumétrico con EDTA	5.00	mg CaCO3/L	340 +/- 4,14	689 +/- 8,41	Análisis y Reporte
15	2023-10-28	Dureza Total*	SM 2340C	SM 2340C, Volumétrico con EDTA	5.00	mg CaCO3/L	362 +/- 24,0	752 +/- 49,8	Análisis y Reporte
16	2023-11-04	Fenoles*	SM 5530 B,D	SM 5530 B,D, Destilación - Fotométrico Directo	0.100	mg Fenol /L	<0,100	0,145 +/- 0,00413	0.20
17	2023-10-27	Fluoruros*	SM 4500 F- B,C	SM 4500 F- B,C, Electrometría	0.1	mg F-/L	<0,1	1,41 +/- 0,0268	Análisis y Reporte
18	2023-10-23	Fósforo Reactivo Disuelto (Ortofosfato)*	SM 4500-P-E 2017	SM 4500-P-E 2017, Colorimetría	0.0700	mg/L P-PO4	<0,0700	0,673 +/- 0,0308	Análisis y Reporte
19	2023-10-31	Fósforo total*	SM 4500-PB-E	SM 4500-PB-E, Digestión -colorimetría con Acido Ascórbico	0.0700	mg P/L	0,966 +/- 0,0720	1,80 +/- 0,134	Análisis y Reporte
20	2023-10-30	Grasas y Aceites*	NTC 3362:2005-06-29, Numeral 4, Método C	NTC 3362:2005-06-29, Numeral 4, Método C, Espectrofotometría Infrarrojo	0.200	mg/L	0,739 +/- 0,0414	15,0 +/- 0,841	15.00
21	2023-10-25	Halógenos Adsorbibles enlazados Orgánicamente* (AOX)	ISO 9562	ISO 9562, SPE-Pirólisis Micro coulombimetrica	0.050	mg/L	0,33 +/- 0,0103	0,34 +/- 0,0107	Análisis y Reporte
22	HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos)*								
22.1	2023-10-30	Naftaleno*	EPA 3510 C / EPA 8100	EPA 3510 C / EPA 8100, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5



CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Reporte de Resultados									
Ítem	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	AGUA TRATADA	AGUA SIN TRATAR	Res.631 Art.11
							MnD398452	MnD398453	
22.2	2023-10-30	Acenafteno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.3	2023-10-30	Acenaftileno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.4	2023-10-30	Antraceno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.5	2023-10-30	Benzo (a)antraceno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.6	2023-10-30	Benzo (a)pireno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.7	2023-10-30	Benzo (b)fluoranteno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.8	2023-10-30	Benzo (g,h,i)perileno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.9	2023-10-30	Criseno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.10	2023-10-30	Dibenzo(a,h)antraceno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.11	2023-10-30	Fluoranteno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.12	2023-10-30	Fluoreno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.13	2023-10-30	Indenol (1,2,3-cd)pireno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.14	2023-10-30	Fenantreno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte

Reporte de Resultados									
Ítem	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	AGUA TRATADA	AGUA SIN TRATAR	Res.631 Art.11
							MnD398452	MnD398453	
22.15	2023-10-30	Pireno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
22.16	2023-10-30	Benzo(k) fluoranteno*	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986	EPA 3510C 1996/EPA 8100 1986, Extracción líquido-líquido, CG/FID	0.002	mg/L	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte
23	2023-10-30	Hidrocarburos *	NTC 3362:2005-06-29, Numeral 7, Método F.	NTC 3362:2005-06-29, Numeral 7, Método F., Espectrofotometría Infrarrojo	0.2	mg/L	0,337 +/- 0,0189	3,25 +/- 0,182	10.00
24	2023-10-30	Hierro Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.200	mg Fe/L	1,51 +/- 0,0959	1,76 +/- 0,112	3
25	2023-10-26	Mercurio Total*	SM 3112 B Ed.23 2017	SM 3112 B Ed.23 2017, AA - Vapor Frío	0.00100	mg Hg/L	<0,00100	<0,00100	0.01
26	2023-10-27	Niquel Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.200	mg Ni/L	<0,200	<0,200	0.5
27	2023-10-22	Nitratos*	SM 4500 NO3 D Ed.23 2017	SM 4500 NO3 D Ed.23 2017, Ion Selectivo	1.00	mg N-NO3/L	<1,00	<1,00	Análisis y Reporte
28	2023-10-22	Nitritos*	SM 4500 NO2 B Ed.23 2017	SM 4500 NO2 B Ed.23 2017, Colorimetría	0.00608	mg N-NO2/L	<0,00608	<0,00608	-
29	2023-10-30	Nitrógeno Amoniacal*	SM 4500 NH3 B,C	SM 4500 NH3 B,C, Volumetría	1.00	mg/L NH3-N	62,3 +/- 6,23	68,5 +/- 6,85	Análisis y Reporte
30	2023-10-31	NITRÓGENO TOTAL	Cálculo	Cálculo, Cálculo	3.00	mg N/L	70.1	74.2	-
31	2023-10-30	Nitrógeno total Kjeldahl*	Semi-micro Kjeldahl SM 4500-Norg C, SM 4500 NH3 B,C	Semi-micro Kjeldahl SM 4500-Norg C, SM 4500 NH3 B,C, Digestión - kjeldhal	3.00	mg N/L	69,7 +/- 5,16	73,9 +/- 5,47	10
32	2023-10-21	pH* In situ	SM 4500 H+ B	SM 4500 H+ B, Potenciometría	N.A	Unidades de pH	6,93 +/- 0,0693	5,46 +/- 0,0546	6-9
33	2023-10-30	Plata Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.0500	mg Ag/L	<0,0500	<0,0500	Análisis y Reporte
34	2023-10-27	Plomo Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.100	mg Pb/L	<0,100	<0,100	0.2
35	2023-10-31	Selenio Total*	EPA 7742 1994, SM 3114 C 2017	EPA 7742 1994, SM 3114 C 2017, Digestión- AA - Generación de hidruros	0.00250	mg /L	<0,00250	<0,00250	0.2



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5



CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Reporte de Resultados									
Ítem	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	AGUA TRATADA	AGUA SIN TRATAR	Res.631 Art.11
							MnD398452	MnD398453	
36	2023-10-21	Sólidos sedimentables* (In situ)	SM 2540 F	SM 2540 F, Cono Imhoff - Volumétrico	0.100	mL/L	6,00 +/- 0,259	0,800 +/- 0,0345	1.0
37	2023-10-24	Sólidos Suspendidos Totales*	SM 2540D	SM 2540D, Gravimetría Secado 103-105°C	10.0	mg/L	45,0 +/- 3,91	314 +/- 27,3	50.0
38	2023-10-28	Sulfatos*	SM 4500 SO4 E	SM 4500 SO4 E, Turbidimetría	5.0	mg SO4/L	34,8 +/- 1,27	246 +/- 8,97	300.0
39	2023-10-28	Sulfuros*	SM 4500 S2 CF	SM 4500 S2 CF, Yodométrico	1.00	mg S2-/L	<1,00	10,2 +/- 0,780	1.0
40	2023-10-23	Surfactantes: Aniónicos como SAAM*	SM 5540C	SM 5540C, Extracción líquido-líquido, Colorimetría	0.500	mg SAAM /L...	1,13 +/- 0,0401	<0,500	Análisis y Reporte
41	2023-10-21	Temperatura muestra (In situ)*	SM 2550 B 2017	SM 2550 B 2017, Termométrico	N.A	°C	32,5 +/- 0,2503	35,0 +/- 0,2695	-
42	2023-10-25	Vanadio Total*	EPA 3020A, EPA 7010	EPA 3020A, EPA 7010, Digestión - AA - Horno de Grafito (Electrotérmico)	0.0100	mg V/L	<0,0100	<0,0100	1.0
43	2023-10-28	Zinc Total*	SM 3030 E, SM 3111 B	SM 3030 E, SM 3111 B, Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	0.0500	mg Zn/L	<0,0500	<0,0500	3.0

Fuente: HALLIBURTON POZO HALCON 1X, 2023. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

4.3.1.5 Descripción de las alternativas de manejo de las aguas residuales generadas y los sistemas de tratamiento propuestos

A continuación, se presenta en mayor detalle la descripción del sistema de tratamiento a implementar por tipo de agua generada:

4.3.1.5.1 Sistema de tratamiento de las Aguas residuales domésticas (ARD)

Las aguas residuales domésticas en los frentes de obra se generan principalmente por los baños portátiles que se empleen y cuyos residuos líquidos serán manejados a través de terceros autorizados para esto.

Para el tratamiento de las aguas negras se utilizará una planta de lodos activados o sistemas modulares según el volumen de aguas a tratar. Una vez tratadas, serán integradas a los tanques de almacenamiento de aguas industriales para posteriormente ser utilizadas en los procesos industriales de perforación o en su defecto, ser dispuestas mediante terceros autorizados.

El equipo para el tratamiento de las aguas residuales domésticas tipo, está conformado por: un compartimento para el pretratamiento, en el cual se realiza el tratamiento de sólidos grandes, la separación de grasas y posteriormente el bombeo hacia la unidad de tratamiento biológico.

Posee otro compartimento para el Tratamiento Primario donde se busca la biodegradación de la materia orgánica a través de un proceso aerobio desarrollado por bacterias que se cultivan del mismo afluente que llega a la planta.

Tiene un tercer compartimento para el Tratamiento Secundario, donde el agua residual se trasladará por dos tanques de aireación para la remoción de nutrientes, el filtrado y la floculación.

Por último, está dotado de un compartimento para el Tratamiento Avanzado, en el cual se realizará la desinfección mediante el uso de cloro y se tratarán los lodos generados en el sistema.

Para las aguas grises generadas durante el desarrollo del proyecto se hará uso de una trampa de grasas, con el fin de removerlas y disponerlas adecuadamente. Al finalizar este proceso, las aguas grises se integrarán a las aguas negras tratadas y de ahí se enviarán al sistema de tratamiento de agua residual industrial.



Fotografía 4.3-1 Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.1.5.2 Aguas Residuales No Domésticas (industriales)

Para el tratamiento de las aguas residuales no domesticas (ARnD) se plantea realizar el tratamiento por medio de los siguientes sistemas:

➤ *Etapas de construcción, adecuación y mantenimiento*

✓ *Aguas residuales de las pruebas hidrostáticas*

El agua resultante de las pruebas hidrostáticas se podrá almacenar en piscinas o tanques para su recirculación en pruebas hidrostáticas posteriores como medida de uso y/o ahorro eficiente del agua. También podrá realizarse la entrega a terceros autorizados para tratamiento y disposición final.

➤ *Etapas de Operación*

✓ *Unidad de dewatering*

En este sistema se trata el lodo cuando ya no puede usarse en el sistema activo. Dentro del mismo, se llevan a cabo dos procesos simultáneos: un proceso químico en el que se adicionan químicos (polímeros y coagulantes) que tienen la función de agrupar las partes sólidas presentes en el lodo circundante y un proceso de separación mecánico en el que la corriente de lodo se hace circular por medio de una serie de unidades de tratamiento (centrífugas decantadoras, tanques de recolección, mezcladores estáticos, entre otros), cuya función es separar la fracción líquida (agua) de los lodos que ingresan al sistema. Los equipos requeridos para el proceso de dewatering son descritos en la **Tabla 4.3-4.**

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Tabla 4.3-4 Sistema dewatering

Equipo	Características / funciones
Centrífuga decantadora	Generalmente son de dos tipos: un tipo LGS para la eliminación de sólidos de baja gravedad y una HGS para la remoción de sólidos de alta gravedad; se utilizan para la separación de las fases líquido-sólido, generando la Fuerza G necesaria para manejar el sistema, pues a muy bajas velocidades no se logra una adecuada separación de sólidos y a altas velocidades rompe los flóculos. La capacidad de procesamiento de dichas bombas es de aproximadamente: 150 a 250 GPM de lodo.
Tanque de recolección de lodo	Posee generalmente 60 barriles de capacidad y se ubica en el cuarto compartimento del tanque de dewatering. Cuenta con un sistema de agitación para evitar la sedimentación de los sólidos y asegurar una mezcla homogénea. Incluye una bomba centrífuga de hasta 15 HP.
Tanque de polímero	Tanques para mezcla de los polímeros con agua fresca. La unidad de dewatering cuenta normalmente con dos (2) tanques de aproximadamente 25 barriles cada uno, equipados con un agitador eléctrico tipo aspas. Cada tanque posee un embudo para mezcla de polímero que permite asegurar una máxima eficiencia en la mezcla.
Bombas de alimentación	Su función es alimentar de lodo la centrífuga de dewatering, desde el tanque de lodo hasta el mezclador estático. Es una bomba de desplazamiento positivo NE-50 o PDP-50. Posee un disco de velocidad variable para facilitar una tasa óptima de alimentación de la centrífuga.
Tanque de dilución de agua	Tiene una capacidad de hasta 60 barriles y es el tercer compartimento del sistema de dewatering. Inicialmente se llena con agua fresca proveniente de los puntos de captación autorizados y después el agua procesada anteriormente se recircula para el tratamiento.
Tanque de coagulación	Tanque de fibra de vidrio con capacidades que oscilan entre 1,000 y 2.000 litros utilizado para todos los coagulantes (ácido acético, cal) excepto ácido clorhídrico. Si se utiliza ácido acético, este se bombea directamente desde canecas de aproximadamente 55 galones.
Bomba de coagulante	Bomba de partes de teflón (para ofrecer mayor resistencia al ácido); bombea el coagulante desde el tanque de almacenamiento o desde la caneca de ácido. Cuenta con un regulador de aire para controlar la tasa de bombeo.
Mezclador estático	Es un manifold de mezcla con desviadores de flujo en su interior para un mejor mezclado de los diferentes componentes del dewatering. El lodo es mezclado aquí con agua de dilución. La mezcla diluida es coagulada y luego mezclada con el polímero floculante; esta mezcla combinada viaja a través de los desviadores de flujo en el mezclador estático que le suministra energía al sistema contribuyendo a la formación de flóculos y a la separación del agua.
Tanque de agua limpia	Este tanque se utiliza para recibir el agua que no es reutilizada para dilución. Desde este tanque es tomada para su reutilización en el lavado del equipo, enfriamiento de bombas o preparación de lodo o para su disposición final, conduciéndola por medio de carrotanques.

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

Una vez terminado el tratamiento, los sólidos generados en el proceso de dewatering caen en un catch tank, mientras que el líquido (agua) es reciclado al sistema activo para preparar lodo nuevo o enviado al sistema de tratamiento de agua industrial del equipo de perforación. Los sólidos o cortes de perforación serán manejados como se describe en el **numeral 4.8 Residuos sólidos del Capítulo 4**.

✓ Ósmosis inversa

Teniendo en cuenta las actividades de tratamiento de aguas licenciadas, ONGC VL presenta esta opción para la desmineralización de aguas residuales domésticas y no domésticas dentro de las

que se encuentran: aguas de producción para su reutilización en diversas actividades o vertimientos autorizados por la licencia ambiental.

La osmosis es el paso espontáneo de un líquido de una solución diluida a una solución más concentrada a través de una membrana semipermeable ideales que permite el paso del solvente (agua), pero no los sólidos disueltos (solutos). (**Figura 4.3-1**) La transferencia del agua de un lado de la membrana para el otro continúa hasta que la cabeza o la presión (P) es lo suficientemente grande como para impedir cualquier transferencia neta del disolvente (agua) a la solución más concentrada. En el equilibrio, la cantidad de agua que pasa en ambas direcciones es igual, y la presión (P) se define como la presión osmótica de la solución con la concentración de sólidos disueltos en particular.

Si el pistón se coloca en el lado de la solución más concentrada de una membrana semipermeable y una presión, P, se aplica a la solución, las siguientes condiciones se pueden realizar: (1) P es menor que la osmótica presión de la solución y el solvente todavía fluye espontáneamente hacia la solución más concentrada, (2) P es igual a la presión osmótica de la solución y los flujos de disolvente a la misma velocidad en ambas direcciones, es decir, un cambio neto en los niveles de agua, (3) P es mayor que la presión osmótica de la solución y los flujos de disolvente de la solución más concentrada a la "pura" solvente lado de la membrana. Condición (3) se muestra en la **Figura 4.3-2**, representa el fenómeno de la ósmosis inversa.

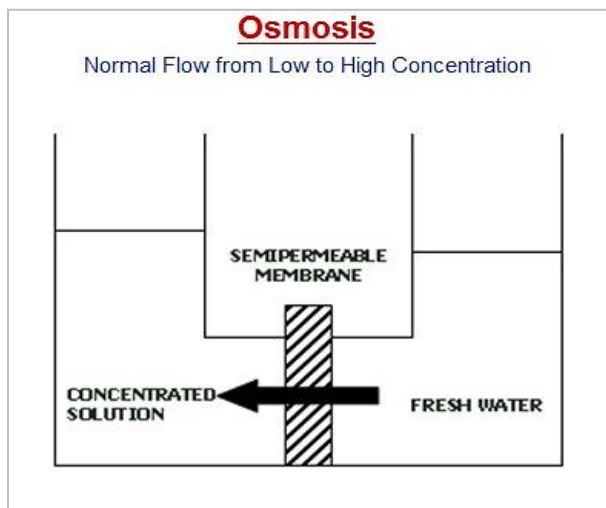


Figura 4.3-1 Principio físico del proceso de Ósmosis

Fuente: ONGC VL, 2024

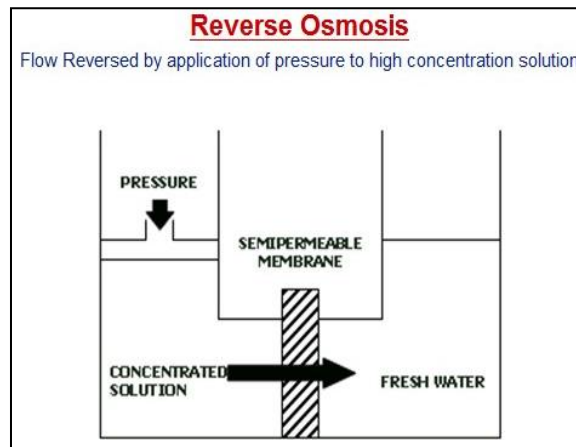


Figura 4.3-2 Principio físico del proceso de Ósmosis Inversa

Fuente: ONGC VL, 2024

La ósmosis inversa (RO) es un proceso de separación por membranas en el que los flujos de agua de alimentación a lo largo de la superficie de la membrana bajo presión **Figura 4.3-3**. El agua purificada penetra la membrana y se recoge, mientras que el agua concentrada, que contiene material disuelto y no disuelto que no fluye a través de la membrana, se dispone de manera adecuada en un área certificada cumpliendo con los requerimientos de ONGC VL.

- El agua fluye de una columna con un bajo contenido de sólidos disueltos a una columna con una elevada concentración de sólidos disueltos.
- La presión osmótica es la aplicada para evitar que el agua siga fluyendo a través de la membrana y de esta forma crear un equilibrio.
- Para poder alcanzar una presión superior a la presión osmótica, el agua debe fluir en sentido contrario. El agua fluye de la columna con un alto contenido en sólidos disueltos a la columna con bajo contenido en sólidos disueltos.

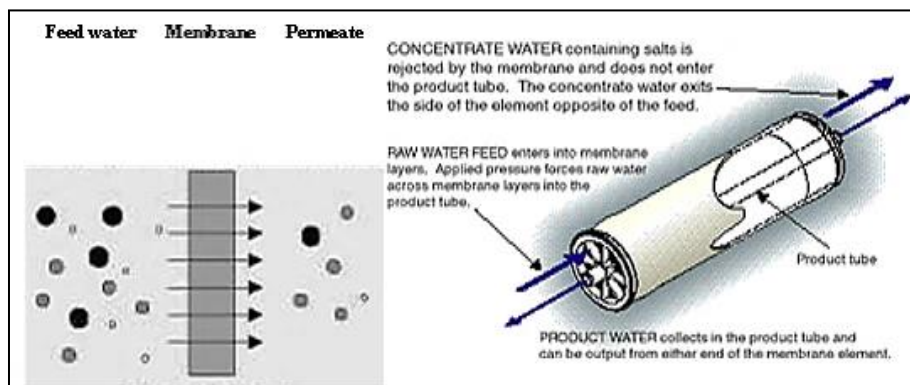


Figura 4.3-3 Proceso general de Ósmosis Inversa

Fuente: ONGC VL, 2024

La presión osmótica de una solución aumenta con la concentración de una solución. Una regla de oro, que es a base de cloruro de sodio, es que el aumento de la presión osmótica es aproximadamente 0.01 psi por cada miligramo / litro. Esta aproximación funciona bien para la mayoría de las aguas naturales. Sin embargo, de alto peso molecular orgánicos producen una presión mucho más baja osmótica. Por ejemplo, la sacarosa da aproximadamente 0,001 psi por cada miligramo/litro.

Existen varios métodos para medir la presión osmótica, la cual se puede calcular a partir de la depresión de la presión de vapor de una solución, por la depresión del punto de congelación, y por el equivalente a la ecuación de los gases ley ideal.

El procedimiento que se utiliza para medir la presión osmótica de una solución es medir el flujo de agua a través de un módulo en condiciones de funcionar a presiones varias. Si una parcela de flujo de agua frente a la presión se extrapola a cero el flujo de agua, la intersección es la presión osmótica. Esto le da a la presión osmótica efectiva, incluyendo la polarización de concentración. Se debe tener cuidado para mantener la recuperación ya sea constante o corregir la variación en la concentración.

Para los procesos de Ósmosis Inversa a llevar a cabo en el Bloque CPO-5 se proyecta la implementación de los siguientes equipos:

Planta de osmosis inversa Serie K que utiliza filtros de 8"x40" de diámetro; elementos de larga membrana de ósmosis inversa. Membrana de recipientes a presión, contienen múltiples membranas de ósmosis inversa y están montados en posición horizontal como se muestra en la **Figura 4.3-4**.



Figura 4.3-4 Vista general del equipo de Ósmosis inversa

Fuente: ONGC VL, 2024

El equipo (**Figura 4.3-5**) incluye los siguientes componentes y condiciones:

- De alta resistencia con recubrimiento en polvo marco.
- SS componentes de alta presión, bomba de SS.
- Operación controlada por microprocesador.
- Membranas ultradelgadas (Thin Film Composite).
- FRP recipientes a presión.
- Motor del a válvula de alimentación.
- Bombas centrífugas de acero inoxidable.
- Cierre de alimentación automático.
- 2 Medidores de alimentación a presión.
- 2 Medidores de presión del sistema.



Figura 4.3-5 Vista lateral del equipo de Ósmosis inversa

Fuente: ONGC VL, 2024

El equipo (**Figura 4.3-5**) incluye los siguientes componentes:

- Planta de ósmosis de capacidad 1000 bpd
- Dos tanques escuadra de 400 bbls
- Laboratorio
- Generador (300 Kw y respectivo tanque Diesel).
- Ingeniero supervisor
- Dos técnicos

La planta de osmosis inversa está en capacidad de cumplir con el decreto 1584/94 y demás decretos que deroguen este. Por lo anterior, el agua generada por la planta de osmosis se puede reutilizar durante el tiempo de operación del proyecto como agua industrial, ya sea en la misma estación o en preparación de fluidos.

✓ *Luz ultravioleta*

Los sistemas de tratamiento y desinfección de Agua mediante luz Ultravioleta (UV), garantizan la eliminación de entre el 99,9% y el 99,99 de agentes patógenos. Para este grado de efectividad casi absoluta mediante este procedimiento físico, es totalmente imprescindible que los procesos previos del agua eliminen de forma casi total cualquier turbiedad de esta, ya que la Luz Ultravioleta debe poder atravesar perfectamente el flujo de agua a tratar.

Esta técnica se basa en la "radiación" o "iluminación" del flujo de agua con una o más lámparas de silicio cuarzo, con unas longitudes de onda de 200 a 300 nanómetros. Por lo tanto, el agua fluye sin detenerse por el interior de los purificadores, que contienen estas lámparas. (ver **Figura 4.3-6**).

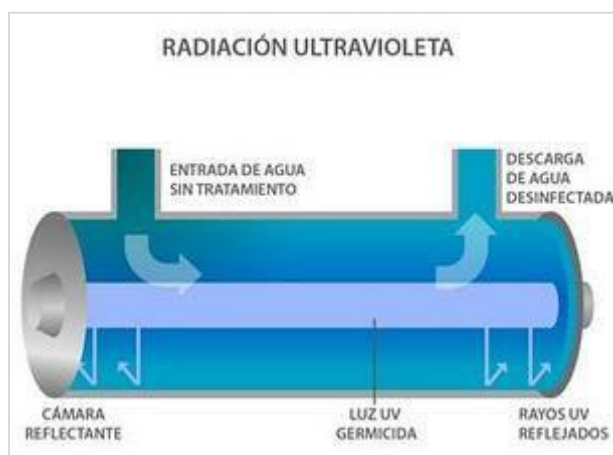


Figura 4.3-6 Funcionamiento equipo de radiación ultravioleta

Fuente: ONGC VL, 2024

La luz UV no cambia las propiedades del agua o aire, es decir, no altera químicamente la estructura del fluido a tratado. Al contrario de las técnicas de desinfección química, que implican el manejo de sustancias peligrosas y reacciones que dan como resultado subproductos no deseados, la luz UV ofrece un proceso de desinfección limpio, seguro, efectivo y comprobado a través de varias décadas de aplicaciones exitosas.

Algunas de las características de este método son:

- Desinfección instantánea y eficiente
- Segura

- Limpia
- Ambientalmente adecuada

De todos los métodos de desinfección actual, la luz ultravioleta (UV) es el más eficiente, económico y seguro. Más aún, su acción germicida se realiza en segundos o en fracciones de éstos, además es ambientalmente el método más adecuado, utilizado mundialmente a lo largo de varias décadas. La luz UV se produce naturalmente dentro del espectro electromagnético de las radiaciones solares en el rango comprendido entre 200 y 300 nanómetros (nm) conocido como UV-C, el cual resulta letal para los microorganismos.

Su funcionamiento consiste en la generación artificial de la luz UV se realiza a través de un emisor (lámpara) de cuarzo puro, el cual contiene un gas inerte que es el encargado de proveer la descarga inicial, y conforme se incrementa la energía eléctrica, el calor producido por el emisor también aumenta junto con la presión interna del gas, lo cual genera la excitación de electrones que se desplazan a través de las diferentes líneas de longitud de onda, produciendo la luz UV. Una descarga de presión baja produce un espectro a 185 y 253.7 nm. Los emisores de luz UV de presión media producen radiación multionda, es decir, diferentes longitudes de onda de diversa intensidad a través del espectro UV-C (200-300 nm).

El ADN, o ácido desoxirribonucleico, es responsable de dirigir las actividades dentro de todas las células vivas. Todas las células deben tener ADN intacto para funcionar correctamente. Su estructura es muy similar a una escalera que se ha torcido de ambos extremos dando como resultado un aspecto espiral. (**Figura 4.3-7**).

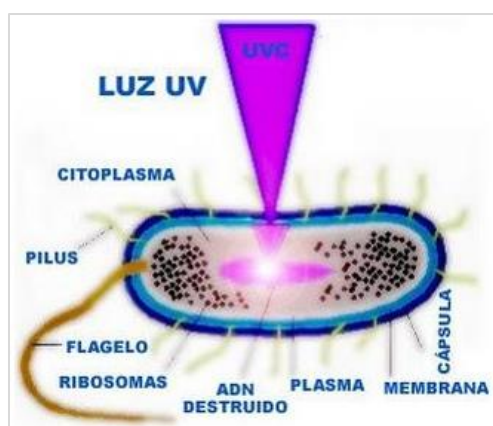


Figura 4.3-7 Efecto de la luz ultravioleta

Fuente: ONGC VL, 2024

Cuando los microorganismos son expuestos a una dosis adecuada de radiación ultravioleta a 253.7 nm de longitud de onda (UV-C), el ADN (Ácido Desoxirribonucleico) de las células absorben los fotones UV causando una reacción fotoquímica irreversible, la cual inactiva y destruye las células.

Es muy importante conocer que la efectividad de los Purificadores Ultravioleta depende de que cada molécula de agua reciba una dosis mínima de Luz Ultravioleta. Esta dosis será definida en función del uso que se le dé al agua tratada. Por lo tanto, jamás debe usarse un equipo de purificación para flujos o volúmenes de agua superiores a las indicadas por el fabricante. Es importante, así mismo, seguir las indicaciones del fabricante para la comprobación de su correcto funcionamiento, y los plazos para la sustitución de las lámparas, que garantizan su efectividad.

El diseño de un esterilizador ultravioleta tiene su base sobre como la dosis se entrega. Las lámparas individuales emiten una cantidad específica de energía ultravioleta y el flujo es un factor determinante por lo que no debe ser sobredimensionado. El tamaño de la cámara de reactor es también de importancia extrema dado que la intensidad disminuye por el cuadrado de la distancia después la lámpara.

La selección de la balastra debe coincidir con la corriente activa correcta de la lámpara dado que una pérdida en intensidad ocurrirá si la lámpara no es operada en el rendimiento correcto. Las balastras de estado sólido ofrecen las ventajas de temperaturas más frescas, requerimientos menores de espacio y menos peso, todo con la entrega uniforme de energía. (Ver **Figura 4.3-8**)



Figura 4.3-8 Lámpara germicida de luz UV (acero Inoxidable)

Fuente: ONGC VL, 2024

Los cartuchos de cuarzo resguardan el agua de la corriente de la lámpara, ofrecen temperaturas más uniformes y permiten una transmisión más alta de la energía. La variedad de aspectos opcionales que pueden proveerse en los esterilizadores, incluye: dispositivos que controlan UV y miden el rendimiento real en 253.7 nm, controlando dispositivos que pararán la corriente de agua en caso de la falla del sistema, dispositivos de control de flujo para limitar adecuadamente la corriente de agua en las unidades, alarmas visuales y audibles (ambas locales y remotas) para advertir de fallas de lámpara, dispositivos para controlar temperaturas excedentes en la cámara de reactor, y cronómetro para controlar el tiempo de operación de lámparas UV.

✓ *Agua de producción*

Los requerimientos para el tratamiento del agua de producción dependerán de su origen, composición y método elegido para su disposición, cumpliendo con los límites máximos establecidos dentro de los requerimientos técnicos y ambientales descritos en el permiso de inyección. El proceso de tratamiento convencional del agua de producción que se describe a continuación estará proyectado para un manejo de hasta 20.000 bwpd y en la **Figura 4.3-9** se presenta el esquema de proceso típico.

La planta para tratamiento e inyección de las aguas de producción (PIA) quedará ubicada al interior de una de las facilidades centrales de producción autorizadas para el proyecto. El diseño y ubicación definitiva del sistema de tratamiento será presentado en el PMA específico a presentar para la fase de construcción y operación de la facilidad.

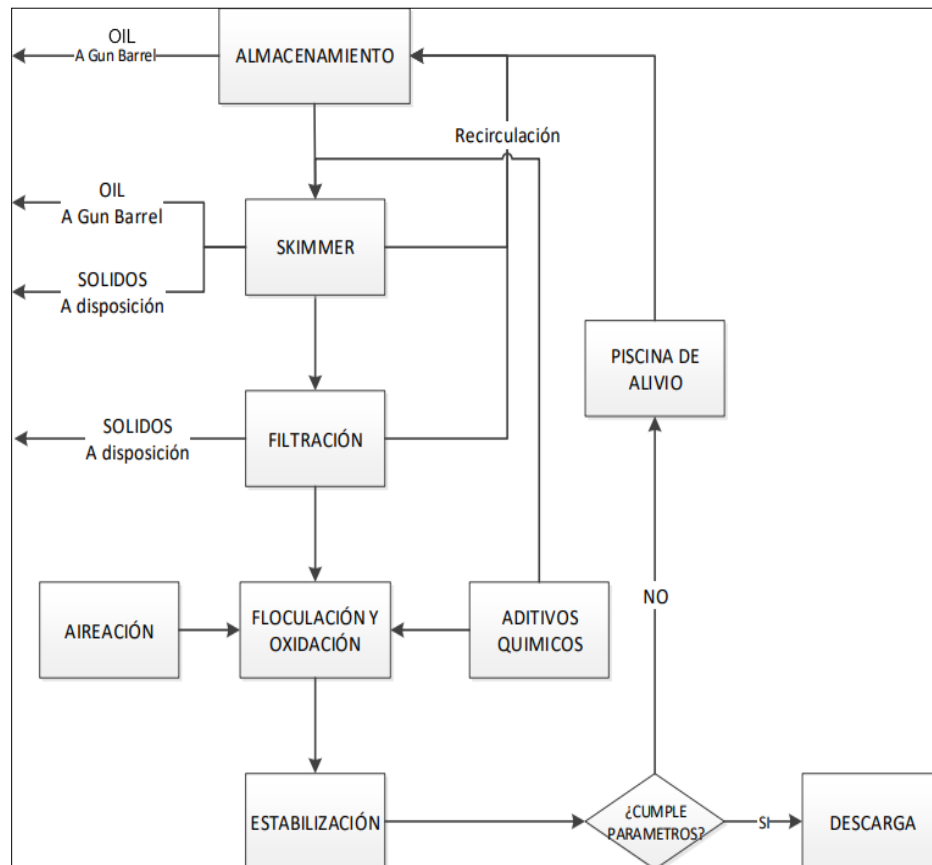


Figura 4.3-9 Proceso típico de tratamiento agua de producción.

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

El agua generada durante la fase de separación se recolecta en un cabezal que facilita su transferencia al desnatador (skimmer), el cual tiene la función de eliminar los restos de aceite que puedan estar presentes en el agua. El aceite recuperado se envía a un Gun Barrel, para poder

recuperar mayor cantidad de crudo. Posteriormente, el agua procedente del desnatador es direccionada hacia los tanques de almacenamiento de agua y/o el sistema de tratamiento.

El agua que sale del desnatado pasa por un filtro de cascarilla de nuez para retirar impurezas suspendidas. El efluente del filtrado pasa a tanques de floculación y oxidación, que, con la ayuda de aditivos químicos y aireación, sumado a un tiempo de residencia suficiente, debe poderse depositar en un tanque de estabilización para su disposición final, bien sea mediante inyección/reinyección en pozos inyectoros o en planta externa. . Los sólidos generados, debido a su contenido aceitoso, podrán ser entregados a un tercero para disposición o tratados in situ y dispuestos en la ZODME según lo descrito en la ficha Manejo de residuos sólidos y especiales. Los equipos típicos requeridos para tratamiento de agua de producción se describen a continuación:

- Tanque desnatador (Skimmer)

Equipo de separación primaria. Estas unidades, que pueden ser a presión o atmosféricas, son diseñadas para proporcionar un alto tiempo de retención durante el cual pueda ocurrir la coalescencia y separación gravitacional. Los desnatadores pueden ser horizontales o verticales. En los verticales las gotas de aceite deben ascender en sentido contrario al flujo de agua que es descendente; algunos desnatadores verticales poseen propagadores en la entrada y colectores en la salida para ayudar a la distribución de flujo uniforme (Ver **Figura 4.3-10** y **Figura 4.3-11**).

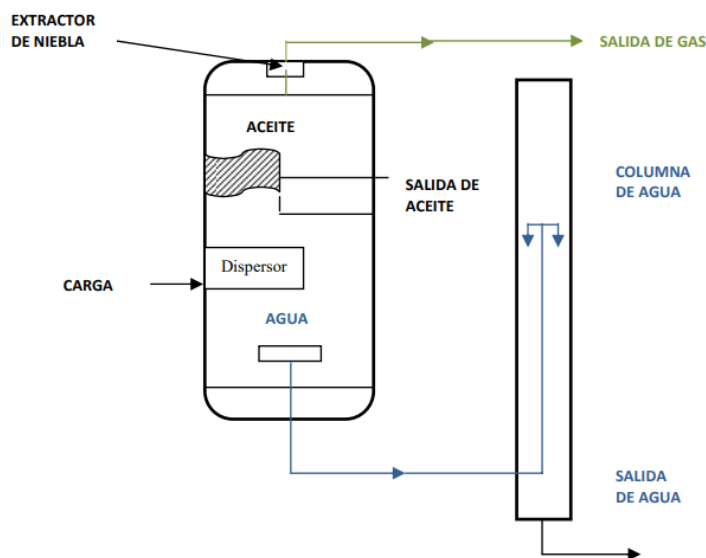


Figura 4.3-10 Tanque Desnatador o Skim Tank Vertical

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

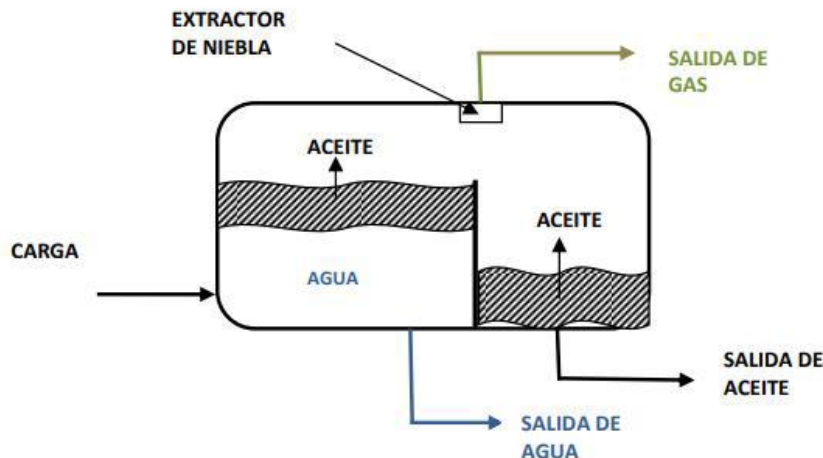


Figura 4.3-11 Tanque Desnatador o Skim Tank Horizontal

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Unidades de Filtración

El sistema de tratamiento tiene como finalidad la optimización de la calidad del agua, para que sea lo más compatible con las formaciones a la que va a ser inyectada o dispuesta. Estas consisten en tanques cerrados y a presión, que se usan para filtrar sólidos y aceites contenidos en el agua. El fluido una vez ha sido filtrado fluye a la descarga de agua limpia. El flujo continúa de esta forma hasta que el lecho filtrante debe ser regenerado. Los filtros se utilizan para eliminar los sólidos en suspensión y los hidrocarburos insolubles del agua de producción.

Las unidades más comunes corresponden a filtros de cáscara de nuez (Ver **Figura 4.3-12**), fabricados para el tratamiento de altos volúmenes de agua producida con sólidos en suspensión e hidrocarburos. Estas unidades son capaces de remover aceites y grasa en concentraciones desde cuarenta a sesenta partes por millón (40 - 60 ppm) hasta menos de tres partes por millón (3 ppm). Las propiedades de la cáscara de nuez y el método de retrolavado empleado, tienen la gran ventaja que no requieren la aplicación de aditivos químicos para facilitar la filtración.



Figura 4.3-12 Unidades de Filtración.

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Decantador

Tanque de fondo cónico con capacidad suficiente para mantener de dos a cuatro horas la totalidad del fluido descargado por el filtro en la etapa de retrolavado. Sirve para clarificar las aguas provenientes del retrolavado de las unidades de filtración, que luego se recircularán al sistema para ser tratadas en los equipos de tratamiento de aguas. (Ver **Figura 4.3-13** y **Figura 4.3-14**).



Figura 4.3-13 Tanque Decantador.

Fuente: Imagen digital – Página web Synertech Water Resources. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

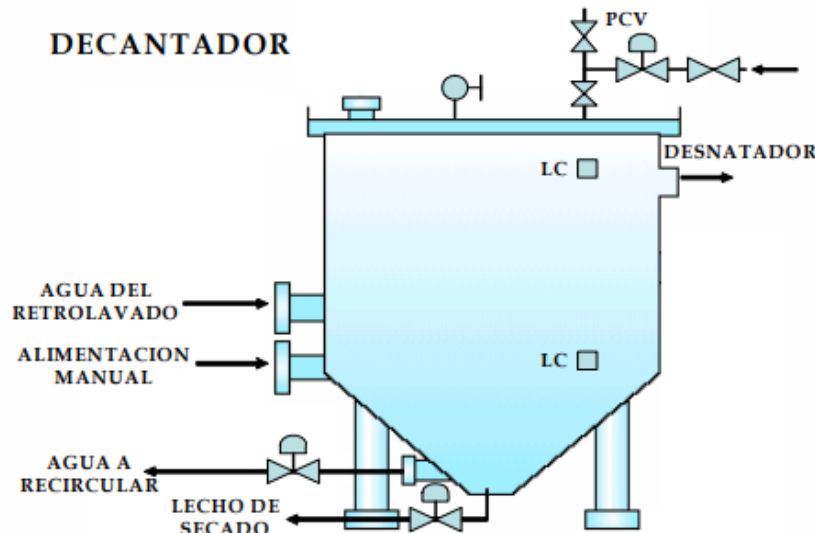


Figura 4.3-14 Diagrama Tanque Decantador.

Fuente: Imagen digital – Libro Applied Water Technology. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Unidades de Flotación

Las unidades de flotación emplean un proceso en el cual pequeñas burbujas de gas son generadas y dispersadas en el agua, donde hacen contacto con las gotas de aceite y partículas sólidas (Ver **Figura 4.3-15**). Las burbujas de gas incrementan la diferencia de densidades y ayudan a las gotas de aceite a ascender rápidamente a superficie para su posterior recolección. Coagulantes o desemulsificantes son típicamente agregados para optimizar el funcionamiento del equipo.

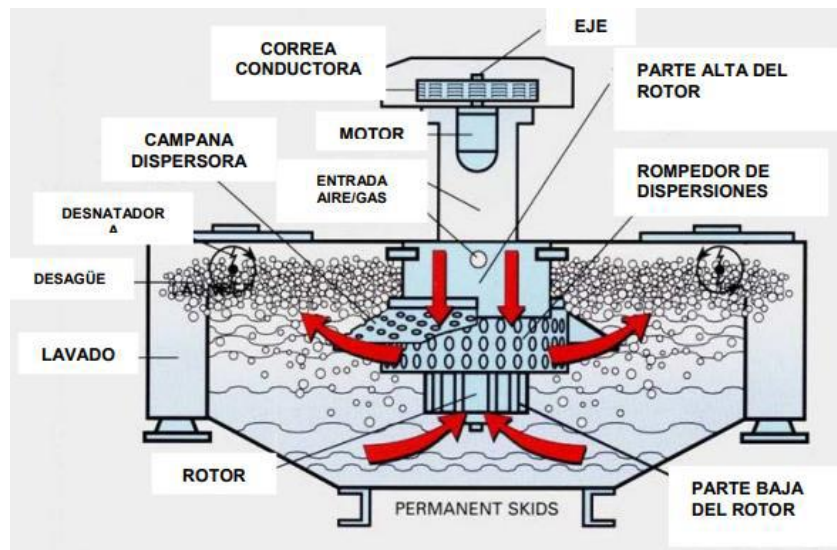


Figura 4.3-15 Unidades de Flotación

Fuente: Imagen digital – Artículo Removal Of Total Suspended Solids And Oil And Grease Using Flotation Unit Lau Onn Sein.
Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Tanques de floculación

Tanques empleados para la formación de flóculos mediante la agitación suave de suspensiones líquidas, con o sin la ayuda de productos químicos.

- Tanques de inyección

Tanques empleados como cabeza de presión para las bombas de inyección. En este punto del proceso el agua de inyección ya se debe encontrar bajo parámetros regulatorios para su disposición, por lo que se hace necesario tomar este punto del proceso como muestreo para análisis y aseguramiento de la eficiencia del proceso de tratamiento del agua a inyectar.

✓ *Información de tratamiento complementario*

De manera complementaria a la información expuesta anteriormente, para lograr el objetivo del tratamiento de las aguas residuales tanto domesticas como no domesticas el cual es lograr la reutilización segura y eficiente del proceso de perforación, mediante un proceso de clarificación que elimina sólidos suspendidos e impurezas, garantizando el cumplimiento de parámetros ambientales, se realizan 3 pasos los cuales se exponen a continuación:

- Gestión y caracterización del agua residual en campo

Se realiza la recolección de todas las ARD, ARI y agua lluvia y se va almacenando en Frac tanks para su posterior tratamiento.



Figura 4.3-16 Frac Tank para el almacenamiento de las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

Posterior al almacenamiento se realiza una caracterización de las aguas previa al tratamiento, en la cual se toma una muestra representativa del agua almacenada en el Fract Tank y se realiza análisis fisicoquímico previo en laboratorio de campo, midiendo entre otros parámetros el pH, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad y cloruros; y posteriormente se realiza prueba de jarras antes del tratamiento de agua para definir concentraciones y floculantes (catiónico o aniónico) a usar, tal como se observa a continuación:



Figura 4.3-17 Muestra implementada y prueba de jarras a realizar a las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Tratamiento físico químico en 3 etapas

Posterior a la toma de muestra realizada en el paso anterior, se ejecuta un tratamiento físico químico que consta de 3 pasos los cuales son: acondicionamiento de pH con Cal hidratada; luego coagulación; y finalmente floculación para que se produzca la sedimentación de los flocs y caracterización final del agua tal como se muestra a continuación:



Figura 4.3-18 Tratamiento en 3 etapas a realizar a las ARD y ARnD para las actividades desarrolladas en el Bloque CPO-5

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

- **Etapas 1 - Ajuste de pH:** Con este se logra optimizar las condiciones químicas del agua, mejorar la eficiencia del coagulante y floculante y finalmente permite una reacción controlada y estable.
- **Etapas 2 – Coagulación (Policloruro de Aluminio – PAC):** En esta etapa se neutraliza las cargas eléctricas de las partículas finas. Además, facilita la desestabilización de sólidos suspendidos. En esta etapa se utilizan productos de uso común lo que trae bajo riesgo HSE con su manipulación con un manejo seguro.

- **Etapa 3 - Floculación (polímeros catiónicos y aniónicos):** Finalmente en esta etapa se aglomera las partículas desestabilizadas, las cuales forman flóculos de mayor tamaño y de fácil separación usando químicos ampliamente usados en tratamiento de aguas.

- Operación del sistema y disposición ambientalmente segura

En este paso final se realiza la preparación y mezcla de los químicos a utilizar en la unidad de tratamiento con dosificación mediante embudos y líneas presurizadas, en donde se realiza una mezcla hidráulica por efecto de presión la solución homogénea preparada anteriormente, todo lo anterior mediante un sistema de bombeo para la recirculación y homogenización de la mezcla.

Posterior a la mezcla de los químicos se realiza la separación y destino final del agua clarificada la cual estará en condiciones óptimas libre de sólidos suspendidos, la cual será almacenada nuevamente en un Frac Tank en donde se le realizará un análisis de laboratorio final con la medición de parámetros como pH, conductividad, turbidez, SST, cloruros y sulfatos, para posteriormente ser dispuesta mediante vertimiento o entrega a terceros autorizados. El floc resultante el cual contiene altos contenidos de materia orgánica e impurezas, es separado y retirado del Catch Tank y posteriormente procesado en centrifugas decantadoras y mezclado con cortes para tratamiento y disposición final.

- Insumos para tratamiento de aguas

Otros insumos corresponden a los requeridos para el tratamiento de las aguas captadas para uso doméstico, así como de las aguas residuales no domésticas (industriales) y domésticas; con el fin de obtener parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos dentro de los límites establecidos por la normatividad ambiental y de salud vigentes. Sus funciones están enfocadas a las coagulación, floculación, clarificación y desinfección (Ver **Tabla 4.3-5**).

Tabla 4.3-5 Insumos típicos requeridos para tratamiento de aguas

Insumos	Compuesto principal	Función
Diesel	Aceite Combustible	Suministro Planta Generadora Eléctrica
Policloruro de Aluminio	Cloruro Básico de Aluminio	Coagulante
Sulfato de Aluminio	Sulfato de Aluminio	Coagulante
Polímero Catiónico	Poliacrilamida Catiónica - Polímeros	Floculante
Polímero no Iónico	Poliacrilamida no iónica - Polímeros	Floculante
Cal Hidratada	Hidróxido de Calcio	Regula pH, neutralizador de acidez
Ácido Acético	Ácido Acético	Regulación pH, neutralizador de basicidad
Hipoclorito de Calcio	Hipoclorito de Calcio	Desinfectante y clarificador
Polímero Catiónico	Poliacrilamida Catiónica	Coagulante – Floculante
Lavado Acido	Ácido metano sulfónico	Lavado Membranas – Osmosis
Lavado Alcalino	Hidróxido de Sodio	Lavado Membranas – Osmosis
Antiincrustante	Etilen diamino tetraacetato de sodio	Desincrustante Membranas
Biocida	5-Cloro 2-metil 4-isotiazolin 3-ona	Neutralización microorganismos y bacterias

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Insumos	Compuesto principal	Función
Polímero bajo peso molecular	Polímero	Floculante
Alumbre	Sulfato de aluminio	Coagulante y Clarificador
Polímeros	Polímeros	Floculante y Coagulante
Polímeros orgánicos de bajo o alto peso molecular	Polímeros	Coagulación, ajuste de pH
Hipoclorito de Sodio	Hipoclorito de Sodio	Clarificador y Desinfectante
Hipoclorito de Calcio	Hipoclorito de Calcio	Clarificador y Desinfectante
Cal Hidratada	Hidróxido de Calcio	Ajuste de pH (neutralizar la acidez)
Soda Caustica	Hidróxido de Sodio	Ajuste de pH (neutraliza la acidez), regenerar el intercambio iónico
Ácido acético	Ácido Acético	Ajuste de pH
Hidroxiclورو de aluminio	Hidroxiclورو de aluminio	Coagulante para altas turbiedades, efectivo en un amplio rango de pH, remueve color

Fuente: Tomado de Procedimientos internos Halliburton, 2025. Modificado por GessiG S.A.S., 2026

4.3.2 Vertimiento en cuerpos de agua

El presente numeral no se desarrolla debido a que este permiso no será objeto de solicitud para el Estudio de Impacto Ambiental del Bloque CPO-5.

4.3.3 Vertimientos en suelo

En este numeral se presenta el desarrollo del componente que se utilizó para realizar la solicitud del permiso de vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas o industriales tratadas sobre el suelo, generadas por las actividades del proyecto de desarrollo para el Bloque CPO - 5 cumpliendo con los lineamientos establecidos en los términos de referencia para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental para Proyectos de Explotación de Hidrocarburos (MAVDT, en adelante, Min Ambiente, 2010), Decreto 3930 del 2010, Decreto 1076 del 2015 y Decreto 050 del 2018; con el fin de obtener autorización para realizar vertimiento en suelos. La presente solicitud de permiso de vertimiento se solicita para 5 unidades de suelos AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ de las cuales: se solicita vertimiento en todo el año para las unidades AVC y PVB y para época de bajas precipitaciones (comprendida entre los meses de noviembre a marzo) para las unidades RVG, PVA y LVJ.

Es así como se evalúa la capacidad de asimilación de los suelos (por unidad cartográfica de suelos) para las zonas de disposición de aguas residuales (en adelante ZODAR) mediante la disposición de un caudal de 3 l/s por ZODAR, en áreas de 2,05 ha a 2,64 ha (dependiendo la unidad de suelo) y se realiza la descripción de los suelos con fines de vertimiento (áreas de disposición) con los respectivos: perfiles modales (caracterización fisicoquímica del área de disposición), diseños de los sistemas de riego tipo para las unidades de suelo aptas para vertimientos de aguas residuales tratadas, y la evaluación del riesgo por contaminación de acuíferos con el método cuantitativo (Modelo HYDRUS 1D) y los resultados de la vulnerabilidad de los acuíferos asociados a las

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

unidades cartográficas de suelo objeto de la presente solicitud de permiso de vertimiento. Adicionalmente, en este numeral se presentan los resultados de las predicciones cuantitativas y valoraciones de los impactos potenciales en la calidad de agua de los acuíferos, debido a las actividades de vertimiento a suelo de aguas residuales no domésticas, y evaluados con el software HYDRUS 1D (Simunek, Van Genuchten, & Sejna, 1998) los cuales serán comparados con la normatividad ambiental vigente como se explica en los numerales siguientes.

4.3.3.1 Caracterización fisicoquímica del suelo – Descripción de las unidades de suelo

La unidad cartográfica de suelo es uno de los parámetros más importantes para definir la ubicación de las ZODAR, de igual forma el diseño de estas y establecer el régimen de operación, el cual debe estar alineado a las propiedades físicas de cada unidad cartográfica de suelo. Se aclara que la presente solicitud de permiso de vertimiento se realiza por unidad cartográfica de suelo, pues aún no se han determinado las zonas específicas donde se pretenden implementar las ZODAR para el proyecto y se aclara que posteriormente en los PMA específicos se presentaran exactamente las áreas en donde se pretenden construir las ZODAR dentro del Bloque CPO-5.

Para la caracterización de las unidades cartográficas de suelo del proyecto, se debe aclarar que se realizaron dos (2) levantamientos de información agrológica diferentes: el primero se utilizó para caracterizar la totalidad de las unidades cartográficas de suelos del área de influencia del proyecto con el fin de realizar la línea base expuesta en el **Numeral 3.2.3 Suelos y usos de las tierras** del presente estudio, además, con este levantamiento de información se pudieron evaluar de forma general las propiedades de los suelos y clasificar que unidades de suelo tienen características óptimas para realizar la actividad de vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas tratadas; el segundo levantamiento de información, en el cual solo se caracterizaron las unidades cartográficas aptas y de interés para solicitar el permiso de vertimiento en suelo y en el cual se tomaron todos los parámetros solicitados por el Decreto 050 del 2018 mediante el apoyo del laboratorio CHEMICAL LABORATORY S.A.S. con acreditación IDEAM resolución N° 1042 del 26 de septiembre del 2024, los resultados de esta campaña de levantamiento de información se presenta en el **Anexo 3.2-3b_Res_analisis**.

Con base en este segundo levantamiento de información se realizaron diseños de riego tipo para cada unidad cartográfica de suelo de interés y apta para realizar esta actividad, utilizando el concepto de perfil modal por unidad de suelo, entendiendo este, como el perfil que tiene en general la mayoría de las características fisicoquímicas de la unidad y por consiguiente es el que mejor la representa. De acuerdo con el perfil modal por unidad de suelo, las necesidades de vertimiento (entendido éstas como el caudal y el volumen total a verter) y con la aptitud del suelo para recibir estas recargas hídricas, sin que ellas generen un riesgo considerable de la contaminación del acuífero asociado, anegamientos o escorrentía superficial que reflejen procesos erosivos.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

4.3.3.2 Determinación de las unidades cartográficas de suelo aptas para vertimiento

Para la determinación de las unidades cartográficas con potencial para la realización de la actividad de vertimiento de aguas tratadas al suelo, se partió de la información recopilada en el primer levantamiento de información agrologica realizada en el presente estudio con la caracterización para cada una de las unidades cartográficas de suelo - UCS presentes en el Área de Influencia Bloque CPO-5, que en total fueron 14 UCS.

Teniendo como base esta información, se procedió a identificar todas aquellas unidades que presentaban características no propicias para el establecimiento de las ZODAR, descartando las áreas que presentaban pendientes superiores al 12% y características de las unidades al presentar susceptibilidad a la inundación; estos dos aspectos con el fin de evitar la generación de impactos por procesos erosivos, al realizar disposición de agua superficialmente en zonas de ladera y para evitar anegación del agua dispuesta, la cual potencialmente escurra y active procesos o contamine cuerpos de agua relativamente cercanos.

Se solicitará el permiso de vertimiento a suelo, únicamente en las unidades que se encuentran dentro del polígono del Bloque CPO-5 y no en las unidades de suelo que se caracterizaron dentro del AIFB, pues la construcción de obras puntuales (plataformas y facilidades para el manejo de fluidos de pruebas de producción, incluyendo las ZODAR), se realizarán al interior del Bloque CPO-5.

Se aclara que además de estos criterios, para el presente análisis se descartaron todas aquellas áreas que poseían coberturas boscosas, con el fin de evitar afectación de coberturas sensibles, ni realizar aprovechamiento por la implementación de las ZODAR. Además, se destaca que en la zonificación de manejo se contemplaran las restricciones relacionadas a rondas de protección hídrica y de rondas de protección a la infraestructura social.

Como resultado de la aplicación de estos criterios de selección de áreas aptas para vertimiento a suelo, se identificaron cinco (5) unidades cartográficas de suelo aptas para realizar la actividad, las cuales corresponden a: AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ.

Se aclara que se realiza la solicitud del permiso de vertimiento para cada una de las unidades cartográficas, pero al momento de la elección del lugar final para la implementación de las ZODAR, se tienen que cumplir a cabalidad con lo establecido en la zonificación de manejo del presente estudio, el cual compila todas las restricciones ambientales para la implementación de cualquier infraestructura del proyecto.

El levantamiento de información para satisfacer los requerimientos planteados por el Decreto 050 del 2018 "Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo sostenible en relación con los Consejos Ambientales del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones" se realizó en los puntos presentados a continuación:

4.3.3.2.1 Descripción de las unidades de suelo de interés para realizar vertimiento de aguas residuales tratadas en suelo

A continuación, se describen las unidades cartográficas de suelo aptas que se solicitan para vertimiento de aguas residuales tratadas.

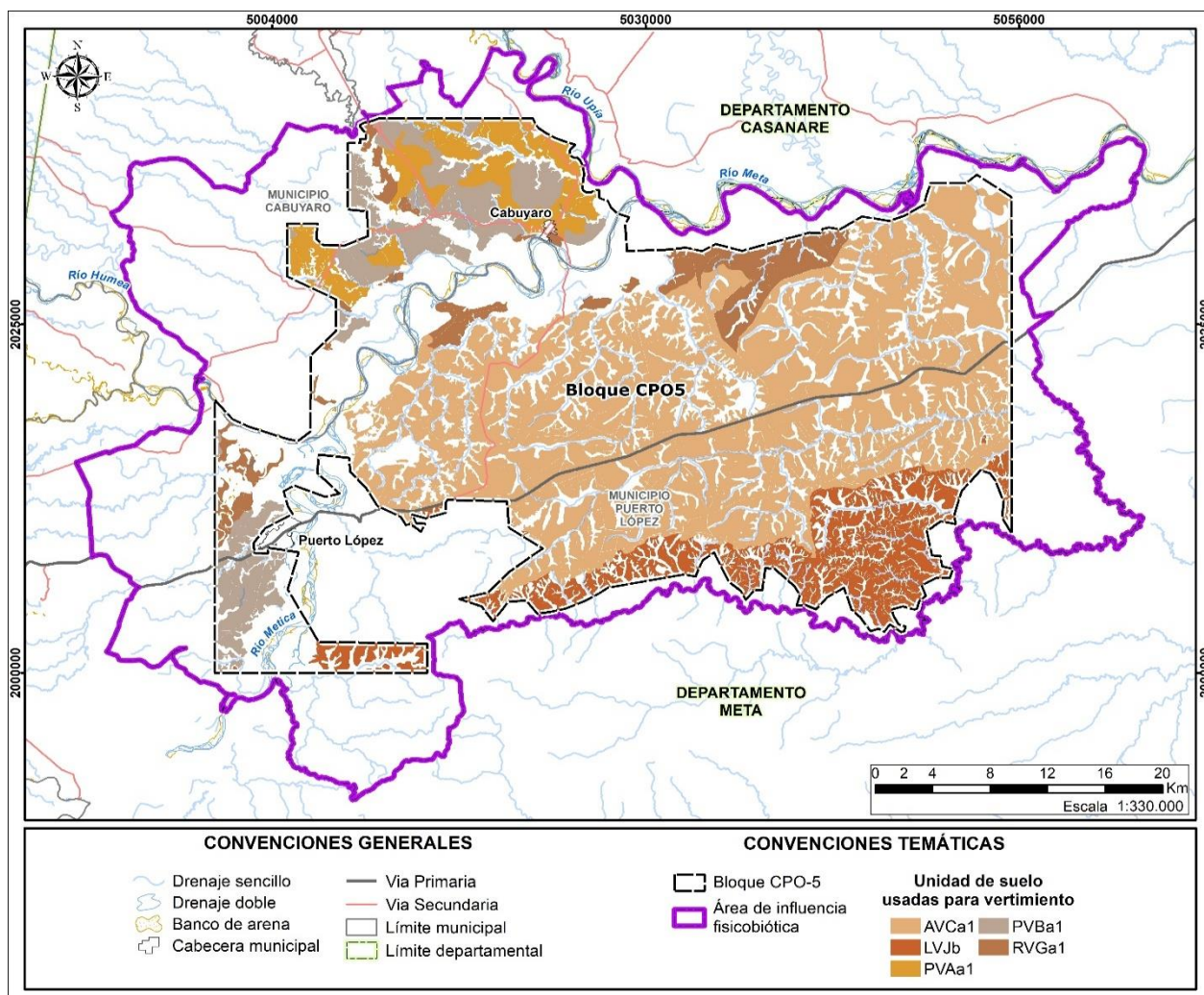


Figura 4.3-19 Unidades cartográficas para las que se solicita permiso de vertimiento en suelo en el Bloque CPO-5

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

- *Consociación AVC Typic Hapludox, Familia Franco areno arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-AVC01 y S1.*

Esta unidad de suelos se ubica en paisajes de altiplanicie estructural, ocupando mesas y superficies onduladas, con relieve general plano a ligeramente ondulado y pendientes menores del 7%, donde se presentan procesos de erosión ligera asociados al escurrimiento difuso.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

El material parental está constituido por arcillas. Los suelos en su mayoría son profundos a moderadamente profundos, de texturas finas a medias, bien a moderadamente drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, de fertilidad baja y con alta saturación de aluminio.

Son suelos que presentan severas limitaciones para la agricultura, debido principalmente a su bajo contenido nutricional y a la alta saturación de aluminio. En sectores convexos se observan fenómenos de escurrimiento superficial difuso.

La unidad está integrada en un 100% por los suelos Typic Hapludox.

Se encontró la siguiente fase por pendiente y erosión:

✓ *AVCa1: relieve ligeramente plano, pendiente 0–3%.*

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal CAL-VERT-AVC01 y S1¹, donde se evidenciaron suelos superficiales, bien drenados, de textura franco areno arcillosa, pertenecientes a la familia franco areno arcillosa, mezclada. Presentan reacción muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad baja y alta saturación de aluminio, bajo régimen de temperatura isohipertérmico y régimen de humedad údico.



Fotografía 4.3-2 Tipo de relieve de Mesas y superficies onduladas en la Consociación AVC, en la vereda Remolino, jurisdicción del municipio de Puerto López - Meta

FECHA: 25-10-2025
 Coordenadas: E: 5041202,79- N: 2015843,68
 Fuente: GessiG S.A.S., 2026

¹ La unidad de suelo AVC se caracterizó principalmente con los resultados de laboratorio de su respectivo perfil, identificado como CAL-CAR-AVC-01. Para esta unidad, esta información se complementó con un monitoreo adicional (S1 para AVC), el cual fue realizado exactamente en el mismo punto, pero en una campaña de muestreo distinta, con el fin de completar el conjunto de parámetros analíticos exigidos en la normatividad ambiental. De S1 se incorporan los parámetros: pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, densidad real, carbono orgánico, materia orgánica, C.I.C., potasio, calcio, magnesio y sodio intercambiables, fósforo disponible, aluminio intercambiable, humedad, nitrógeno total, saturación de bases, grasas y aceites, hidrocarburos totales, hierro, manganeso, zinc, molibdeno, textura, mercurio, arsénico, bario, selenio, cadmio, cromo, estroncio, plomo y porosidad total.

Tabla 4.3-6 Descripción del perfil modal de la Consociación AVC (Cal-Vert-AVC01 – S1)

	Ap (0 - 14 cm) Color en húmedo pardo rojizo (5YR 5/4), sin moteados; textura arcillo-arenosa en campo y franco arcillo arenosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces frecuentes, finas, vivas; macroorganismos no hay; fragmentos gruesos 15 %, tipo cascajo, forma irregular, alteración mediana. Límite plano. Penetrómetro: 1,5 MPa.
	Bw (14 - 40 cm) Color en húmedo pardo amarillento intenso (7,5YR 5/8), sin moteados; textura arcillosa en campo y franco arcillo arenosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces no hay; macroorganismos frecuentes; fragmentos gruesos 60 %, tipo cascajo, forma irregular, alteración mediana. Límite plano. Penetrómetro: 1,75 MPa.
	Cr (40 -100 cm) Color en húmedo rojo claro (2,5YR 6/6), sin moteados; textura arcillosa en campo y y franco arcillo arenosa en laboratorio; estructura granular, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado muy pegajosa y plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces no hay; macroorganismos no hay; fragmentos gruesos 10 %, tipo cascajo, forma irregular, alteración mediana. Penetrómetro: 2,0 MPa.

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la Consociación AVC Perfil Modal: Cal-Vert-AVC01 y S1 (Ver **Anexo 3.2-3b_Res_analisis**); Desde el punto de vista químico, la unidad AVC presenta una reacción ácida a muy fuertemente ácida a lo largo del perfil, con valores de pH de 4,55 en el horizonte superficial, 5,13 en el horizonte intermedio y 4,98 en profundidad. La conductividad eléctrica es baja (0,02–0,03 dS/m) y se clasifica como normal, sin indicios de salinidad. La capacidad de intercambio catiónico es media en superficie y baja en los horizontes subsuperficiales, condición que, junto con los bajos contenidos de bases intercambiables, sustenta una fertilidad química general baja para la unidad.

La saturación de bases es baja en el horizonte superficial y alta en los horizontes subsuperficiales; sin embargo, los contenidos absolutos de calcio, magnesio y potasio se clasifican como bajos en todo el perfil. El sodio intercambiable se clasifica como medio, con saturación de sodio alta, aunque sin alcanzar valores que indiquen sodicidad. La saturación de aluminio es elevada en superficie, alcanzando niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos, y disminuye en profundidad, donde se clasifica como limitante para cultivos

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

susceptibles y moderadamente tolerantes. En coherencia, la relación $(Ca+Mg+K)/Al$ indica necesidad de encalar en el horizonte superficial, mientras que en los horizontes subsuperficiales no se requiere corrección inmediata de la acidez. Las relaciones Ca/Mg , Mg/K y Ca/K se mantienen en rangos ideales o aceptables, sin desbalances catiónicos críticos.

En cuanto a nutrientes, los contenidos de carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible son bajos en todo el perfil, reforzando la clasificación de fertilidad baja. Respecto a contaminantes, las grasas y aceites e hidrocarburos totales se reportan por debajo del límite de cuantificación. Los metales pesados evaluados, incluidos arsénico (2,69–3,06 mg/kg) y plomo (hasta 11,87 mg/kg), presentan concentraciones bajas. De acuerdo con la comparación frente a los límites máximos permisibles establecidos en la norma Louisiana-29B (Department of Natural Resources, 2010), no se identifican condiciones de contaminación del suelo asociadas a metales pesados, grasas y aceites ni hidrocarburos en esta unidad.

- *Consociación RVG Oxic Dystrudepts, Familia Franco arcillosa fina, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-RVG05.*

Esta unidad se localiza en terrazas agradacionales de nivel 3, con relieve ligeramente plano a ondulado y pendientes menores del 3%. El material parental está constituido por depósitos mixtos aluviales. Los suelos son profundos a moderadamente profundos, de texturas medias a finas, bien a imperfectamente drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, de fertilidad baja a moderada y susceptibles a encharcamientos.

Las limitaciones se asocian principalmente a la acidez y a condiciones temporales de exceso de humedad. La unidad está integrada en un 100% por suelos Oxic Dystrudepts.

Se encontró la siguiente fase por pendiente:

- ✓ *RVGa1: relieve ligeramente plano, pendiente 0–3%.*

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal CAL-VERT-RVG05, donde se evidenciaron suelos profundos superficiales, de textura franco-arcillosa fina, bien drenados, pertenecientes a la familia franco-arcillosa fina, mezclada. Presentan reacción muy fuerte a fuertemente ácida y fertilidad baja, bajo régimen de temperatura isohipertérmico y humedad údico.



Fotografía 4.3-3 Tipo de relieve de terraza gravitacional nivel 5 en la Consociación RVG, en la vereda San Isidro, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta

FECHA: 20-10-2025
Coordenadas: E: 5002774,52- N: 2019744,87
Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-7 Descripción del perfil modal de la Consociación RVG (CAL-VERT-RVG05)

	Ap (0 - 14 cm)	Color en húmedo pardo rojizo (5YR 5/4), sin moteados; textura arcillosa en campo y franca arcillosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y plástica; poros pocos, muy finos, imped; sin grietas; raíces pocas, finas, vivas; macroorganismos poca actividad. Límite plano. Penetrómetro: 1,5 MPa.
	Bw (14 - 99 cm)	Color en húmedo pardo rojizo intenso (5YR 5/6), sin moteados; textura arcillosa en campo y franco arcillo limosa en laboratorio; estructura blocosa, clase gruesa, grado fuerte; consistencia en húmedo muy firme, en mojado pegajosa y plástica; poros pocos, muy finos, imped; sin grietas; raíces no hay; macroorganismos poca actividad. Penetrómetro: 1,5 MPa.

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la consociación RVG Perfil Modal: CAL-VERT-RVG05 (Ver **Anexo 3.2-3b_Res_analisis**); Desde el punto de vista químico, la unidad CAL-VERT-RVG presenta una reacción muy fuertemente ácida a fuertemente ácida a lo largo del perfil, con valores de pH de 4,55 en el horizonte superficial y 5,07 en el horizonte subsuperficial. La conductividad eléctrica es baja (0,08 dS/m), clasificándose como normal, sin evidencias de salinidad. La capacidad de intercambio catiónico es baja en ambos

horizontes, asociada a contenidos reducidos de materia orgánica. En coherencia con estos resultados, la fertilidad química se clasifica como baja, sustentada por los bajos valores de bases intercambiables y saturación de bases.

La saturación de bases varía de baja en superficie (32,9%) a media en profundidad (47,1 %); no obstante, los contenidos absolutos de calcio se clasifican como bajos en todo el perfil, mientras que el magnesio y potasio pasa de bajo a medio en profundidad. El sodio intercambiable se clasifica como medio, con saturación de sodio alta; sin embargo, los valores de PSI (1,50–2,42 %) y RAS (1,89–2,53) indican que no existen condiciones de sodicidad que comprometan la estructura del suelo. La saturación de aluminio es elevada en el horizonte superficial (31,7 %), generando limitaciones para cultivos tolerantes, y disminuye en profundidad (18,3 %), donde actúa como limitante para cultivos susceptibles. La relación $(Ca+Mg+K)/Al$ es adecuada en ambos horizontes, indicando que no se requiere encalamiento inmediato, aunque la acidez sigue siendo una restricción química relevante.

En cuanto a nutrientes y materia orgánica, el suelo presenta contenidos bajos de carbono orgánico y materia orgánica, con nitrógeno total bajo en superficie y medio en profundidad, y fósforo disponible medio en el horizonte superficial y bajo en profundidad. Respecto a contaminantes, las grasas y aceites e hidrocarburos totales se reportan por debajo del límite de cuantificación, mientras que los metales pesados evaluados presentan concentraciones bajas; el plomo alcanza 21,4 mg/kg en el horizonte subsuperficial. De acuerdo con la comparación frente a los límites máximos permisibles establecidos en la norma Louisiana-29B (Department of Natural Resources, 2010), no se identifican condiciones de contaminación del suelo por metales pesados, grasas y aceites ni hidrocarburos en esta unidad.

- *Asociación PVB Oxíc Dystrudepts – Plinthic Petraquepts, Familias Franca, Mixtas, Isohipertérmicas; Perfil modal: CAL-VERT-PVB04.*

Esta unidad ocupa posiciones de banco en terrazas del piedemonte mixto, con relieve plano con pendientes menores del 3%, afectadas por encharcamientos eventuales. El material parental corresponde a sedimentos finos aluviales sobre depósitos de cantos y gravas. Los suelos son profundos a superficiales, de texturas medias a finas, bien a imperfectamente drenados, fuerte a muy fuertemente ácidos, de fertilidad baja y con presencia de plintita.

Las limitaciones principales están relacionadas con la acidez elevada, la presencia de plintita y el drenaje imperfecto en sectores bajos.

La unidad está integrada por Oxíc Dystrudepts (75%) y Plinthic Petraquepts (25%).

Se encontró la siguiente fase por pendiente y erosión:

- ✓ *PVBa1: relieve ligeramente plano, pendiente 0–3%, erosión ligera.*

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal CAL-VERT-PVB04, donde se identificaron suelos superficiales, de texturas medias a finas, bien drenados, correspondientes a familias francas, mezcladas. Presentan reacción extremadamente ácida, fertilidad muy baja y presencia de plintita, bajo régimen de temperatura isohipertérmico y humedad údico.



Fotografía 4.3-4 Tipo de relieve de terrazas en la Asociación PVB, en el predio Moricherato, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta

FECHA: 17-10-2025
Coordenadas: E: 5000665,17 - N: 2030461,25
Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-8 Descripción del perfil modal de la Asociación PVB (CAL-VERT-PVB04)

	A (0 - 8 cm)	Color en húmedo pardo rojizo muy oscuro (5YR 4/2); sin moteados. Textura franca limosa en campo y franca en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado débil. Consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y plástica. Poros frecuentes, finos, localización imped. Sin fragmentos gruesos. Raíces frecuentes, finas, vivas. Macroorganismos poca actividad. Límite plano
	Bw (8-37 cm)	Color en húmedo pardo amarillento (7,5YR 5/4); sin moteados. Textura franco arcillosa en campo y franca en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado débil. Consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y plástica. Poros pocos, muy finos, localización imped. Fragmentos gruesos 10 % cascajo, forma irregular, alteración sin alteración. Raíces pocas, finas, vivas. Macroorganismos no hay. Límite plano
	C (37-99 cm)	Color en húmedo pardo rojizo intenso (5YR 6/8); sin moteados. Textura arcillosa y en campo y franca arcillosa en laboratorio; estructura granular, clase fina, grado débil. Consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica. Poros pocos, muy finos, localización imped. Fragmentos gruesos 10 % cascajo, forma irregular, alteración sin alteración. Raíces pocas, finas, vivas. Macroorganismos no hay. Límite plano

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la asociación PVB Perfil Modal: CAL-VERT-PVB04 (Ver **Anexo 3.2-3b_Res_analisis**); Desde el punto de vista químico,

la unidad CAL-VERT-PVB presenta una reacción extremadamente ácida en todo el perfil, con valores de pH entre 4,00 y 4,30. La conductividad eléctrica es baja y homogénea (0,08–0,09 dS/m), clasificándose como normal, sin evidencias de salinidad. La capacidad de intercambio catiónico es baja, con valores entre 4,86 y 7,30 meq/100 g, y los contenidos de bases intercambiables son reducidos, lo que se traduce en una fertilidad química muy baja, coherente con la evaluación integrada del perfil.

La saturación de bases es muy baja en todos los horizontes (4,09–9,19 %), con calcio, magnesio y potasio clasificados como bajos. Los valores de PSI y RAS son cercanos a cero, descartando procesos de sodicidad. La saturación de aluminio es extremadamente alta en todo el perfil (84,66–91,27 %), alcanzando niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos. En concordancia, la relación (Ca+Mg+K)/Al indica necesidad de encalar en todos los horizontes. Las relaciones Ca/Mg y Mg/K evidencian deficiencia de calcio y magnesio, con desbalances catiónicos que limitan severamente la disponibilidad nutricional.

En cuanto a nutrientes, los contenidos de carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible se clasifican como bajos a muy bajos, con disminución progresiva con la profundidad, reforzando la condición de fertilidad muy baja. Respecto a contaminantes, las grasas y aceites e hidrocarburos totales se reportan por debajo del límite de cuantificación. Los metales pesados evaluados (arsénico, cadmio, cromo y plomo) presentan concentraciones inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la norma Louisiana-29B (Department of Natural Resources, 2010), por lo que no se identifica contaminación del suelo asociada a estos parámetros en esta unidad.

- *Consociación PVA Typic Hapludox, Familia Franco arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-PVA03.*

Esta unidad se localiza en paisajes de piedemonte mixto, sobre terrazas con relieve plano con pendientes menores del 3%. El material parental está constituido por sedimentos finos aluviales que recubren depósitos de cantos y gravas medianamente alterados. Los suelos son profundos, de texturas moderadamente finas a finas, bien drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, de fertilidad baja y con alta saturación de aluminio.

Las limitaciones principales están asociadas a la fuerte acidez y a la baja disponibilidad de nutrientes.

La unidad está integrada en un 100% por suelos Typic Hapludox.

Se encontró la siguiente fase por pendiente:

- ✓ *PVAa1: relieve ligeramente plano, pendiente 0–3%.*

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal CAL-VERT-PVA03, donde se evidenciaron suelos superficiales, bien drenados, de textura franco-arcillosa, pertenecientes a la familia franco-arcillosa, mezclada. Presentan reacción extremadamente ácida, fertilidad muy baja y alta saturación de aluminio, bajo régimen de temperatura isohipertérmico y régimen de humedad údico.



Fotografía 4.3-5 Tipo de relieve de terraza en la Consociación PVA, en el predio Las Gaviotas, jurisdicción del municipio de Cabuyaro - Meta

FECHA: 19-10-2025
 Coordenadas: E: 5001127,76- N: 2027457,16
 Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-9 Descripción del perfil modal de la Consociación PVA (CAL-VERT-PVA03)

	Ap (00-34 cm)	Color en húmedo pardo rojizo oscuro (5YR 5/3), sin moteados; textura arcillo-limosa en campo y franca en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces frecuentes, finas, vivas; macroorganismos poca actividad. Límite plano
	Bw (34-70 cm)	Color en húmedo pardo amarillento (10YR 5/6), sin moteados; textura arcillosa en campo y franco arcillosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces pocas, finas, vivas; macroorganismos poca actividad. Límite plano.
	C (70-99 cm)	Color en húmedo pardo rojizo intenso (5YR 6/8), moteados rojo oscuro (2,5YR 5/8) aproximadamente 2%; textura arcillosa en campo y franco arcillosa en laboratorio; estructura granular, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; poros pocos, muy finos, imped; sin grietas; raíces no hay; macroorganismos no hay.

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la consociación PVA Perfil Modal: CAL-VERT-PVA03 (Ver **Anexo 3.2-3b_Res_analisis**); Desde el punto de vista químico,

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

la unidad CAL-VERT-PVA presenta una reacción extremadamente ácida en todo el perfil, con valores de pH entre 4,19 y 4,35. La conductividad eléctrica es baja y uniforme (0,08 dS/m), clasificándose como normal. La capacidad de intercambio catiónico es baja, y los contenidos de bases intercambiables son muy reducidos, lo que se refleja en una fertilidad química muy baja para toda la unidad.

La saturación de bases es baja en todos los horizontes, con calcio, magnesio y potasio clasificados como bajos. El sodio intercambiable se clasifica como medio, con valores de PSI y RAS bajos a moderados, sin evidencias de sodicidad. La saturación de aluminio es extremadamente alta en todo el perfil (80–86 %), alcanzando niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos. En coherencia con lo anterior, la relación $(Ca+Mg+K)/Al$ indica necesidad de encalar en todos los horizontes. Las relaciones Ca/Mg y Mg/K evidencian deficiencia marcada de magnesio y desequilibrios catiónicos que afectan la disponibilidad nutricional.

En cuanto a nutrientes, el suelo presenta contenidos muy bajos de carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible, con disminución progresiva con la profundidad, lo que limita severamente su capacidad productiva. Respecto a contaminantes, las grasas y aceites e hidrocarburos totales se reportan por debajo del límite de cuantificación, y los metales pesados evaluados presentan concentraciones inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la norma Louisiana-29B, por lo que no se identifica contaminación del suelo asociada a estos parámetros en la unidad CAL-VERT-PVA.

- *Consociación LVJ Typic Dystrudepts, Familia Franco areno arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-LVJ14.*

Esta unidad se localiza en paisajes de lomerío fluvio-gravitacional, ocupando laderas y faldas con relieve ondulado y pendientes entre 3 y 7%. El material parental está constituido por arcillas y conglomerados. Los suelos son profundos, de texturas moderadamente finas a finas, bien drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, de fertilidad baja y con alta saturación de aluminio.

Las principales limitaciones están relacionadas con la acidez elevada y la baja fertilidad.

La unidad está integrada en un 100% por Typic Dystrudepts.

Se encontró la siguiente fase por pendiente:

- ✓ *LVJb: relieve ondulado, pendiente 3–7%.*

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal CAL-VERT-LVJ14, donde se identificaron suelos moderadamente profundos, bien drenados, de textura franco areno arcillosa, pertenecientes a la familia franco areno arcillosa, mezclada. Presentan reacción muy fuertemente ácida, fertilidad muy baja y alta saturación de aluminio, bajo régimen de temperatura isohipertérmico.



Fotografía 4.3-6 Tipo de relieve de lomas y colinas asociadas glacis en la Consociación LVJ, en la vereda Alto de navaja, jurisdicción del municipio de Puerto López - Meta

FECHA: 26-10-2025
Coordenadas: E: 5013299,67 - N: 2001931,50
Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-10 Descripción del perfil modal de la Consociación LVJ (CAL-VERT-LVJ14)

	Ap (0 - 12 cm)	Color en húmedo pardo rojizo oscuro (5YR 4/4), sin moteados; textura arenosa-franca en campo y franco areno arcillosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces frecuentes, finas, vivas; macroorganismos no hay. Límite plano. Penetrómetro: 1,5 MPa.
	Bw (12-44 cm)	Color en húmedo pardo amarillento intenso (5YR 5/8), sin moteados; textura arenosa-franca en campo Franco areno arcillosa en laboratorio; estructura blocosa, clase media, grado moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces pocas, finas, vivas; macroorganismos no hay. Límite plano. Penetrómetro: 1,25 MPa.
	C (44-84 cm)	Color en húmedo rojo intenso (2,5YR 5/8), sin moteados; textura arenosa franca en campo y franco areno arcillosa en laboratorio; estructura granular, clase fina, grado débil; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; poros pocos, finos, imped; sin grietas; raíces no hay; macroorganismos no hay. Límite plano. Penetrómetro: 1,25 MPa.
	D (84-99 cm)	Color en húmedo pardo amarillento oscuro (5YR 6/8), sin moteados; textura arenosa en campo y franco arenosa en laboratorio; estructura granular, clase fina, grado débil; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; poros pocos, finos, imped; fragmentos gruesos 40 %, tipo cascajo, forma irregular, alteración mediana; raíces no hay; macroorganismos no hay. Penetrómetro: 1,25 MPa.

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la consociación LVJ Perfil Modal: CAL-CAR1-RVA - (Ver **Anexo 3.2-3.1_Res_analisis**); Desde el punto de vista químico, la unidad CAL-VERT-LVJ-14 presenta una reacción muy fuertemente ácida a lo largo de todo el perfil, con valores de pH relativamente homogéneos entre 4,67 y 4,77. La conductividad eléctrica es baja y constante (0,08 dS/m), clasificándose como normal, sin indicios de salinidad. La capacidad de intercambio catiónico es baja en todos los horizontes, disminuyendo progresivamente con la profundidad (4,50 a 1,85 meq/100 g), lo cual, junto con los bajos contenidos de bases intercambiables, sustenta una fertilidad química muy baja.

La saturación de bases es baja en todo el perfil (8,64–18,60 %), con calcio, magnesio y potasio clasificados como bajos en todos los horizontes. El sodio intercambiable se clasifica como medio, con saturación de sodio alta, aunque los valores de PSI y RAS son cercanos a cero, descartando procesos de sodicidad estructural. La saturación de aluminio es elevada en todo el perfil (53,05–68,19 %), alcanzando niveles limitantes a tóxicos para la mayoría de los cultivos, especialmente en los horizontes subsuperficiales. En concordancia, la relación (Ca+Mg+K)/Al indica necesidad de encalar en todos los horizontes. Las relaciones Ca/Mg y Mg/K evidencian deficiencia recurrente de magnesio y desbalances catiónicos que restringen la eficiencia nutricional del suelo.

En cuanto a materia orgánica y nutrientes, los contenidos de carbono orgánico y materia orgánica se clasifican como bajos en todo el perfil, con una ligera disminución con la profundidad; el nitrógeno total y el fósforo disponible también se clasifican como bajos, reforzando la condición de fertilidad muy baja. Respecto a contaminantes, las grasas y aceites e hidrocarburos totales se reportan por debajo del límite de cuantificación analítica. Los metales pesados evaluados, incluyendo arsénico, cadmio, cromo y plomo, presentan concentraciones inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la norma Louisiana-29B (Department of Natural Resources, 2010), por lo que no se identifica contaminación del suelo asociada a estos parámetros en la unidad CAL-VERT-LVJ-14.

4.3.3.3 Localización y caracterización fisicoquímica del área de disposición

La caracterización fisicoquímica de las unidades cartográficas de suelo aptas y de interés para la implementación de áreas para vertimiento de aguas residuales tratadas por medio de riego por aspersión se realizó por medio de calcatas siguiendo lo estipulado por la normatividad ambiental vigente referido al literal A del numeral 1 del Art. 6 del Decreto 050 del 2018 en cuanto a la caracterización físico, química y biológica las cuales se presentan en la **Tabla 4.3-12**. Este estudio permite establecer características tales como composición, estructura y humedad, que indican el potencial del suelo para realizar vertimientos. Como se explicó anteriormente, se realizó una salida de campo para muestrear las unidades cartográficas solicitadas para el vertimiento en suelo. En la **Tabla 4.3-11** se relacionan las unidades cartográficas de suelo y los respectivos perfiles modales que las representan, de los cuales se sustrajo la información para realizar los análisis, diseños y modelaciones en torno a las ZODAR en el presente capítulo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Tabla 4.3-11 Unidades cartográficas de suelos solicitadas para realizar permisos de vertimiento y perfiles modal representativos caracterizados

Tipo de observación	Observación	Coordenadas origen único nacional	
		Este	Norte
Calicata	CAL-VERT-AVC-01 – S1	5041202,79	2015843,68
Calicata	CAL-VERT-RVG-05	5002774,53	2019744,87
Calicata	CAL-VERT-PVB-04	5000665,17	2030461,25
Calicata	CAL-VERT-PVA-03	5001127,76	2027457,16
Calicata	CAL-VERT-LVJ-14	5013299,67	2001931,50

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

A continuación, se consignan los resultados de la calidad del suelo en los perfiles modal de las unidades cartográficas donde se localizarán los posibles ZODAR seleccionados para el vertimiento mediante riego por aspersión al suelo, los resultados de los análisis de laboratorio y su respectiva acreditación se presentan en el **Anexo 4.3-1f_Resultados_lab**. En la **Tabla 4.3-12** y **Tabla 4.3-13** se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las unidades cartográficas objetivo. Los resultados de las pruebas de infiltración se presentan posteriormente en este capítulo en el **Numeral 4.3.3.5.1**.

Tabla 4.3-12 Resultados análisis de laboratorio de parámetros – Parte 1

Parámetros	Unidades	CAL-CAR-AVC-01 0-14 cm	CAL-CAR-AVC-01 14-40 cm	CAL-CAR-AVC-01 40-99 cm	CAL-VERT-RVG-05 0-14 cm	CAL-VERT-RVG-05 14-99 cm	CAL-VERT-PVA-03 0-34 cm	CAL-VERT-PVA-03 34-70 cm	CAL-VERT-PVA-03 70-99 cm
Aluminio Intercambiable*	cmol(+)/kg	0,65	0,1	0,11	0,966	0,711	1,92	2,18	2,24
Arsénico Total*	mg/kg ss	2,69	2,95	3,06	2,94	4,50	1,47	1,31	1,43
Bario Total*	mg Ba/kg ss	8	8	14	<100	<100	<100	<100	<100
Bases Cambiables (Calcio)*	cmol(+)/kg	0,17	0,16	0,2	1,25	1,14	0,240	0,162	0,176
Bases Cambiables (Magnesio)*	cmol(+)/kg	0,08	0,08	0,08	0,464	1,45	0,0228	0,0414	0,0417
Bases Cambiables (Potasio)*	cmol(+)/kg	0,02	0,02	0,02	0,159	0,221	0,0650	0,0490	0,0520
Bases Cambiables (Sodio)*	cmol(+)/kg	0,04	0,06	0,04	0,208	0,368	0,124	0,106	0,179
Bases Totales	cmol(+)/kg	1,23	0,378	0,355	2,08	3,17	0,452	0,358	0,448
Cadmio Total *	mg/kg ss	<10	<10	<10	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500
Capacidad de Intercambio Catiónico*	cmol(+)/kg	15,04	6,62	7,42	6,33	6,74	6,51	6,92	4,72
Carbono Orgánico Total*	%	0,86	0,46	0,21	0,842	0,177	0,994	0,447	0,253
Coliformes Termotolerantes (Fecales)*	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	1,62	1,16	86,2	2,07	1,03
Coliformes Totales*	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	195	11,5	169	7,57	4,23
Compactación*	lbf/pie3	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Conductividad Hidráulica*	cm/h	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	0,572	0,507	1,59	0,983	0,628
Conductividad*	µS/cm	30	20	30	<84,0	<84,0	<84,0	<84,0	<84,0
Consistencia-Índice de Plasticidad*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Consistencia-Límite Líquido*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Consistencia-Límite Plástico*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Cromo Total*	mg/kg ss	<50	<50	<50	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0
Densidad Aparente*	g/cm³	1,15	1,11	1,06	1,42	1,45	1,36	1,49	1,41
Densidad Real*	g/cm³	2,27	2,5	2,27	2,40	2,48	2,41	2,39	2,46
Enumeración de Bacterias Amonificantes	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	2200	3400	3300	160000	92000
Enumeración de Bacterias Denitrificantes (Suelos)	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	200	680	1400	<150	<150
Enumeración de Bacterias Nitrificantes	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	<150	<150	400	<150	<150

Parámetros	Unidades	CAL-CAR-AVC-01 0-14 cm	CAL-CAR-AVC-01 14-40 cm	CAL-CAR-AVC-01 40-99 cm	CAL-VERT-RVG-05 0-14 cm	CAL-VERT-RVG-05 14-99 cm	CAL-VERT-PVA-03 0-34 cm	CAL-VERT-PVA-03 34-70 cm	CAL-VERT-PVA-03 70-99 cm
Evaluación de poblaciones de Fauna del Suelo, incluye determinación taxonómica a orden	IND	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Fósforo Disponible*	mg/kg ss	2,26	2	2	28,6	3,21	0,0733	0,0734	0,0741
Fracción ligera de la materia orgánica***	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	0,260	0,330	0,340	0,210	0,190
Grasas y Aceites*	%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Hidrocarburos*	%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Hierro Total*	mg/kg ss	2500	2800	3200	36387	10197	26578	23730	23899
Humedad*	%	11,06	7,52	5,77	21,0	20,3	19,0	16,7	15,9
Infiltración*	cm/h	Ver Anexo	-	-	Ver Anexo	-	Ver Anexo	-	-
Macroporosidad	%	14,3	10,4	11,5	9,28	10,0	6,64	8,66	9,82
Materia Orgánica*	%	1,48	0,79	0,37	1,45	0,305	1,71	0,770	0,436
Mercurio Total*	mg/kg ss	<0,005	<0,005	<0,005	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200
Microporosidad	%	35,9	37,6	34,8	31,6	31,6	37,0	28,9	32,7
Nitrógeno Potencialmente Mineralizable	mg/kg	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	<7,00	10,2	7,42	<7,00	<7,00
Nitrógeno Total	%	0,09	0,04	0,04	0,0712	0,176	0,0842	0,0411	0,0202
Permeabilidad	cm/h	-	-	-	0,541	0,457	1,37	0,861	0,562
pH*	Unidades de pH	-	-	-	4,55	5,07	4,35	4,26	4,19
Plasticidad Límite Líquido*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plasticidad-Índice de Plasticidad*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plasticidad-Límite Plástico*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plomo Total*	mg/kg ss	<10	10,42	11,87	<20,0	21,4	<20,0	<20,0	<20,0
Porcentaje de saturación de Ca	%	1,13	2,42	2,7	19,7	16,9	3,69	2,34	3,74
Porcentaje de saturación de Mg	%	0,53	1,21	1,08	7,32	21,5	0,350	0,599	0,885
Porcentaje de saturación de Potasio	%	0,13	0,3	0,27	2,52	3,28	0,995	0,707	1,09
Porcentaje de saturación de Sodio	%	0,27	0,91	0,54	3,28	5,46	1,91	1,53	1,89
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)*	%	0,27	0,91	0,54	1,50	2,42	3,51	2,76	4,20

Parámetros	Unidades	CAL-CAR-AVC-01 0-14 cm	CAL-CAR-AVC-01 14-40 cm	CAL-CAR-AVC-01 40-99 cm	CAL-VERT-RVG-05 0-14 cm	CAL-VERT-RVG-05 14-99 cm	CAL-VERT-PVA-03 0-34 cm	CAL-VERT-PVA-03 34-70 cm	CAL-VERT-PVA-03 70-99 cm
Potencial Óxido Reducción*	Med 1 mV	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	382	378,1	240,8	254,3	327,9
Potencial Óxido Reducción*	Med 2 mV	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	381,5	372,4	241,5	244,2	327,9
Potencial Óxido Reducción*	Med 3 mV	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	380	375,6	242,5	230,8	328,5
Potencial Óxido Reducción*	Promedio mV	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	381	375	242	243	328
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)*	Sin Und	0,11	0,17	0,11	1,89	2,53	3,32	2,78	3,83
Recuento de Actinomicetos	UFC/g	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	164000	196000	118000	106000	116000
Recuento de Bacterias Celulolíticas	UFC/g	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	116000	140000	158000	188000	100000
Recuento de Bacterias Fijadoras de Nitrógeno	UFC/g	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	90000	96000	86000	96000	89000
Recuento de Bacterias Oxidantes de Amonio	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	2200	3400	3300	160000	92000
Recuento de Bacterias Oxidantes de Nitrito	NMP/g ss	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	<150	<150	400	<150	<150
Recuento de Bacterias Solubilizadoras de fosfatos	UFC/g	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	430000	590000	410000	460000	430000
Recuento de Hongos	UFC/g	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	179000	174000	136000	129000	130000
Respiración Bacial	mg/CO2	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	0,0160	0,0140	0,0170	0,0190	0,0220
Retención de Humedad (Capacidad de Campos) ***	%	25,6	28,6	27,3	29,3	32,3	27,4	27,4	26,5
Retención de Humedad (Sat)***	%	35,9	36,5	36,3	37,9	42,7	35,3	35,6	34,5
Retención de Humedad Punto Marchitez***	%	13,9	15,4	14,7	15,8	19,4	14,6	13,8	14,3
Salinidad	NA	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Salmonella**	NMP/4g	-	-	-	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100
Saturación de Aluminio*	%	67,71	23,81	24,44	31,7	18,3	81,0	85,9	83,4
Saturación de Bases*	%	20,61	68,58	64,35	32,9	47,1	6,94	5,18	9,50
Selenio Total*	mg/kg ss	1,63	1,41	0,92	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5



CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Parámetros	Unidades	CAL-CAR-AVC-01 0-14 cm	CAL-CAR-AVC-01 14-40 cm	CAL-CAR-AVC-01 40-99 cm	CAL-VERT-RVG-05 0-14 cm	CAL-VERT-RVG-05 14-99 cm	CAL-VERT-PVA-03 0-34 cm	CAL-VERT-PVA-03 34-70 cm	CAL-VERT-PVA-03 70-99 cm
Textura Arena*	%	51	45	49	20,76	18,75	37,18	31,17	28,62
Textura Limo*	%	27	25	19	45,47	45,49	37,52	37,59	37,49
Textura Arcilla*	%	22	30	32	33,77	35,76	25,3	31,24	33,89
Textura*	Clase Textural	Franco areno arcillosa	Franco areno arcillosa	Franco areno arcillosa	Franco Arcilloso	Franco Arcillo Limoso	Franco	Franco Arcilloso	Franco Arcilloso

*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados mediante Resolución 1042 de 2024 del IDEAM

***: Análisis realizados por laboratorio subcontratado no acreditado

Sin asterisco: parámetro no acreditado

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-13 Resultados análisis de laboratorio de parámetros – Parte 2

Parámetros	Unidades	CAL-VERT-PVB-04 0-8 cm	CAL-VERT-PVB-04 8-37 cm	CAL-VERT-PVB-04 37-99 cm	CAL-VERT-LVJ-14 0-12 cm	CAL-VERT-LVJ-14 12-44 cm	CAL-VERT-LVJ-14 44-84 cm	CAL-VERT-LVJ-14 84-99 cm
Aluminio Intercambiable*	cmol(+)/kg	2,57	2,47	3,13	0,811	0,762	0,509	0,712
Arsénico Total*	mg/kg ss	1,33	1,65	1,39	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Bario Total*	mg Ba/kg ss	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Bases Cambiables (Calcio)*	cmol(+)/kg	0,193	0,253	0,109	0,412	0,187	0,126	0,193
Bases Cambiables (Magnesio)*	cmol(+)/kg	0,137	0,122	0,0920	0,0618	0,0191	0,0417	0,0416
Bases Cambiables (Potasio)*	cmol(+)/kg	0,060	0,062	0,096	0,060	0,038	0,013	0,022
Bases Cambiables (Sodio)*	cmol(+)/kg	0,00676	0,0105	0,00240	0,184	0,113	0,0857	0,0858
Bases Totales	cmol(+)/kg	0,397	0,447	0,299	0,717	0,357	0,0857	0,108
Cadmio Total *	mg/kg ss	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500	<0,0500
Capacidad de Intercambio Catiónico*	cmol(+)/kg	6,08	4,86	7,30	4,50	3,69	3,08	1,85
Carbono Orgánico Total*	%	0,765	0,582	0,239	0,959	0,599	<0,0650	<0,0650
Coliformes Termotolerantes (Fecales)*	NMP/g ss	36,5	2,13	3,21	4,33	3,20	2,05	<1,00
Coliformes Totales*	NMP/g ss	4939	10,6	102	252	63,2	42,7	11,3
Compactación*	lbf/pie3	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Conductividad Hidráulica*	cm/h	3,18	2,75	0,226	1,21	1,18	1,39	4,34
Conductividad*	μS/cm	86,5	<84,0	<84,0	<84,0	<84,0	<84,0	<84,0
Consistencia-Índice de Plasticidad*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Consistencia-Límite Líquido*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Consistencia-Límite Plástico*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Cromo Total*	mg/kg ss	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0
Densidad Aparente*	g/cm ³	1,45	1,42	1,46	1,78	1,70	1,60	1,47
Densidad Real*	g/cm ³	2,41	2,47	2,49	2,42	2,45	2,43	2,47
Enumeración de Bacterias Amonificantes	NMP/g ss	<150	20000	20000	<150	40000	40000	18000
Enumeración de Bacterias Denitrificantes (Suelos)	NMP/g ss	<150	20000	<150	<150	610000	610000	370000
Enumeración de Bacterias Nitrificantes	NMP/g ss	<150	40000	61000	<150	68000	120000	140000
Evaluación de poblaciones de Fauna del Suelo, incluye	IND	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo

Parámetros	Unidades	CAL-VERT-PVB-04 0-8 cm	CAL-VERT-PVB-04 8-37 cm	CAL-VERT-PVB-04 37-99 cm	CAL-VERT-LVJ-14 0-12 cm	CAL-VERT-LVJ-14 12-44 cm	CAL-VERT-LVJ-14 44-84 cm	CAL-VERT-LVJ-14 84-99 cm
determinación taxonómica a orden								
Fósforo Disponible*	mg/kg ss	0,719	7,82	6,15	2,81	0,724	0,467	0,726
Fracción ligera de la materia orgánica***	%	0,280	0,260	0,330	0,0800	0,0600	<0,0500	<0,0500
Grasas y Aceites*	%	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Hidrocarburos*	%	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Hierro Total*	mg/kg ss	22848	26921	24771	7503	8086	8321	8854
Humedad*	%	20,0	18,9	18,2	17,0	14,2	9,75	6,89
Infiltración*	cm/h	Ver Anexo	-	-	Ver Anexo	-	-	-
Macroporosidad	%	9,22	9,92	9,55	13,6	16,1	9,77	7,68
Materia Orgánica*	%	1,32	1,00	0,412	1,65	1,03	<0,112	<0,112
Mercurio Total*	mg/kg ss	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200
Microporosidad	%	30,7	32,6	31,8	25,2	17,5	24,4	27,1
Nitrógeno Potencialmente Mineralizable	mg/kg	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00
Nitrógeno Total	%	0,0615	0,0493	0,0222	0,0511	0,0429	0,0513	0,0401
Permeabilidad	cm/h	2,95	2,59	0,200	1,05	0,948	1,16	4,02
pH*	Unidades de pH	4,00	4,05	4,30	4,75	4,77	4,71	4,67
Plasticidad Límite Líquido*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plasticidad-Índice de Plasticidad*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plasticidad-Límite Plástico*	%	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Plomo Total*	mg/kg ss	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0
Porcentaje de saturación de Ca	%	3,17	4,16	1,79	9,16	5,07	4,09	10,5
Porcentaje de saturación de Mg	%	2,25	2,00	1,51	1,37	0,518	1,35	2,25
Porcentaje de saturación de Potasio	%	0,987	1,02	1,58	1,32	1,03	0,422	1,21
Porcentaje de saturación de Sodio	%	0,111	0,215	0,0329	4,09	3,06	2,78	4,65
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)*	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Potencial Óxido Reducción*	Med 1 mV	272,3	274,6	299	381,2	364,2	368,5	378,4
Potencial Óxido Reducción*	Med 2 mV	284,2	282,7	298,4	380,4	365,8	362,5	379,5
Potencial Óxido Reducción*	Med 3 mV	301,5	285,1	297,5	382,4	364	357,4	380,6
Potencial Óxido Reducción*	Promedio mV	286	281	298	381	365	363	380
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)*	Sin Und	0,156	0,272	0,398	0,209	0,231	0,153	0,157



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5



CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES

Parámetros	Unidades	CAL-VERT-PVB-04 0-8 cm	CAL-VERT-PVB-04 8-37 cm	CAL-VERT-PVB-04 37-99 cm	CAL-VERT-LVJ-14 0-12 cm	CAL-VERT-LVJ-14 12-44 cm	CAL-VERT-LVJ-14 44-84 cm	CAL-VERT-LVJ-14 84-99 cm
Recuento de Actinomicetos	UFC/g	108000	104000	114000	135200	89600	69600	66600
Recuento de Bacterias Celulolíticas	UFC/g	550000	600000	740000	110300	77800	61200	58200
Recuento de Bacterias Fijadoras de Nitrógeno	UFC/g	101000	110000	106000	109200	87600	71200	65200
Recuento de Bacterias Oxidantes de Amonio	NMP/g ss	<150	20000	20000	<150	40000	20000	61000
Recuento de Bacterias Oxidantes de Nitrito	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150
Recuento de Bacterias Solubilizadoras de fosfatos	UFC/g	360000	300000	380000	198200	120600	107200	99700
Recuento de Hongos	UFC/g	112000	118000	120000	158700	98200	79600	77600
Respiración Bacial	mg/CO2	0,0150	0,0180	0,0210	0,0230	0,0220	0,0200	0,0180
Retención de Humedad (Capacidad deCampos) ***	%	29,5	30,2	27,3	20,8	13,7	9,06	8,09
Retención de Humedad (Sat)***	%	38,3	39,4	35,4	31,9	26,3	12,7	10,4
Retención de Humedad Punto Marchitez***	%	15,9	15,4	14,7	11,2	7,42	4,90	3,47
Salinidad	NA	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Salmonella**	NMP/4g	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100
Saturación de Aluminio*	%	86,6	84,7	91,3	53,1	68,1	65,7	67,5
Saturación de Bases*	%	6,53	9,19	4,09	16,0	9,68	8,64	18,6
Selenio Total*	mg/kg ss	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Textura Arena*	%	33,08	33,03	27,03	57,16	57,66	65,59	67,62
Textura Limo*	%	40,14	40,17	36,29	17,52	15,37	12,96	17,32
Textura Arcilla*	%	26,78	26,8	36,68	25,32	26,97	21,45	15,06
Textura*	Clase Textural	Franco	Franco	Franco Arcilloso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arenoso

*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados mediante Resolución 1042 de 2024 del IDEAM

***: Análisis realizados por laboratorio subcontratado no acreditado

Sin asterisco: parámetro no acreditado

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.3.1 Caracterización general de los suelos utilizados para el diseño del sistema de riego

De la **Tabla 4.3-14** a la **Tabla 4.3-18**, se presentan algunos parámetros hidrofísicos de los perfiles caracterizados correspondientes a las unidades de suelo de interés para vertimiento, como son: la textura, densidad aparente, la humedad del suelo en capacidad de campo y humedad del suelo en punto de marchitez permanente, que fueron determinadas en laboratorio y la infiltración básica (**Anexo 4.3-1f_Resultados_lab** y **4.3-1c_Prueba_infil**) del suelo a partir de los resultados obtenidos de la prueba de infiltración realizada en terreno. A continuación, se presentan los muestreos realizados por unidad de suelo y el promedio realizado para los diseños de los sistemas de riego.

Tabla 4.3-14 Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo AVC apta para realizar aspersión

Unidad de suelo / muestra	CAL-CAR-AVC-01 0/14 cm	CAL-CAR-AVC-01 14/40 cm	Parámetros de diseño (promedio)
Textura Horizonte	FAAr	FA	FA
Capacidad de campo [%]	25,6	28,6	27,2
Punto de marchitez permanente [%]	13,9	15,4	14,70
Densidad Aparente [g/cm ³]	1,15	1,11	1,13
Infiltración básica [mm/h]	0,9915		0,9915

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-15 Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo RVG apta para realizar aspersión

Unidad de suelo / muestra	CAL-VERT-RVG 0/14 cm	CAL-VERT-RVG 14/99 cm	Parámetros de diseño (promedio)
Textura Horizonte	FAR	FARL	FARL
Capacidad de campo [%]	29,3	32,3	30,9
Punto de marchitez permanente [%]	15,8	19,4	17,72
Densidad Aparente [g/cm ³]	1,42	1,45	1,436
Infiltración básica [mm/h]	0	39,56*	19,58

*Dato medido en época de bajas precipitaciones tal como se detalla en el numeral 4.3.3.5.1

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-16 Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo PVB apta para realizar aspersión

Unidad de suelo / muestra	CAL-VERT-PVB 0/8 cm	CAL-VERT-PVB 08/37 cm	Parámetros de diseño (promedio)
Textura Horizonte	F	F	F
Capacidad de campo [%]	29,5	30,2	30,01

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Unidad de suelo / muestra	CAL-VERT-PVB 0/8 cm	CAL-VERT-PVB 08/37 cm	Parámetros de diseño (promedio)
Punto de marchitez permanente [%]	15,9	15,4	15,53
Densidad Aparente [g/cm ³]	1,45	1,42	1,428
Infiltración básica [mm/h]	1,63		1,63

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-17 Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo PVA apta para realizar aspersión

Unidad de suelo / muestra	CAL-VERT PVA 0/34 cm		Parámetros de diseño (promedio)
Textura Horizonte	F		F
Capacidad de campo [%]	27,4		27,4
Punto de marchitez permanente [%]	14,6		14,6
Densidad Aparente [g/cm ³]	1,36		1,36
Infiltración básica [mm/h]	0,024	84,39	42,315

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-18 Parámetros hidro físicos de la unidad de suelo LVJ apta para realizar aspersión

Unidad de suelo / muestra	CAL-VERT-LVJ 0/12 cm	CAL-VERT-LVJ 12/44 cm	Parámetros de diseño (promedio)
Textura Horizonte	FAAr	FAAr	FAAr
Capacidad de campo [%]	20,8	13,7	16,54
Punto de marchitez permanente [%]	11,2	7,42	8,932
Densidad Aparente [g/cm ³]	1,78	1,7	1,732
Infiltración básica [mm/h]	0,057	36,16	18,11

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.4 Análisis de los elementos climáticos

Un análisis de los elementos climáticos basado en información existente podría afectar la disposición de aguas residuales, por lo cual se utilizaron como variable de entrada en el diseño de los sistemas de riego los parámetros de evapotranspiración potencial media multianual y se utilizaron las variables de precipitación diaria media multianual en la realización de la modelación del movimiento de los solutos contenidos en las aguas residuales a verter en los suelos, tal como se detalla a continuación.

A partir de esto y con el fin de determinar los valores promedio de estas dos variables para incluir en la modelación de solutos en el suelo, se realizó un análisis ponderado de las microcuencas dentro del Bloque CPO-5, lo que generó un porcentaje de cobertura de cada microcuenca a partir del cual se extrajeron los valores ponderados de precipitación y evapotranspiración. En la **Tabla 4.3-19** se presentan los valores anuales determinados para cada microcuenca y el ponderado final, mientras que en el **Anexo 4.3-1b_Series_clima**, se presentan los valores diarios promedios multianuales para cada microcuenca y el resultado final.

Tabla 4.3-19 Valores de precipitación y evaporanspiración

Microcuenca	Porcentaje Ponderado	Precipitación promedio anual (mm)	Evapotranspiración promedio anual (mm)
Caño El Paso	0,00%	2.393,99	1.742,55
Caño La Lilbana	1,46%	2.612,82	1.738,50
Caño Güio	0,29%	2.769,45	1.749,94
Caño San Pablo	0,64%	1.927,84	1.747,28
Caño Banderas	1,86%	2.286,67	1.749,03
Caño Ipapa	2,46%	2.610,80	1.744,28
Caño El Aceite	3,38%	2.614,44	1.745,40
Caño Navajitas	1,16%	2.261,64	1.739,45
Caño Barbascos	3,17%	2.636,85	1.738,96
Caño El Totumal	1,19%	2.713,74	1.751,38
Caño Venturosa	1,16%	2.424,86	1.747,51
Caño Cajón	2,84%	2.661,66	1.752,17
Caño Piedra Candela	4,51%	2.643,20	1.743,78
Caño Guayauriba	0,35%	2.519,97	1.747,53
Caño La Victoria	5,50%	2.660,17	1.745,77
Caño Yarico	0,84%	2.889,67	1.746,70
Caño Santoya	6,56%	2.582,71	1.743,31
Caño Yurimena	7,73%	2.635,94	1.743,36
Caño Menegua	0,38%	2.465,73	1.741,92
Caño Pirigua	6,01%	2.611,36	1.751,27
Caño El Boral	0,81%	2.855,41	1.748,12
Caño El Chocho	0,10%	2.856,32	1.743,35
Caño Emma	20,19%	2.613,39	1.737,78
Bajo Rio Negro	1,62%	2.921,74	1.724,63
Río Cabuyarito	3,84%	2.878,70	1.724,53
Bajo rio Humea	1,04%	3.276,98	1.516,19
Río Yucao	7,48%	2.470,04	1.743,00
Río Upía	0,28%	2.769,99	1.101,64
Rio Metica	1,72%	3.239,09	1.430,68
Rio Meta	11,44%	2.958,47	1.406,60
Promedio ponderado	100%	2.669,53	1.694,13

Fuente: GessiG SAS, 2026

4.3.3.5 Avance del frente húmedo en el perfil del suelo

El flujo de agua vertical a través del perfil del suelo sobre el cual se realizará el vertimiento se definió mediante 2 análisis: El primero es el escenario 1 de la modelación realizada en el **Numeral 4.3.3.9** del presente documento; el segundo análisis se realizó mediante una prueba de infiltración in situ. A partir de los resultados obtenidos, se determinó el valor de máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo (infiltración básica), que, de ser excedido por cualquier vertimiento, provocarían acumulaciones de agua en la superficie o escorrentías que pueden desencadenar erosión o encharcamientos de la capa superficial del suelo.

El ensayo in situ de infiltración consiste básicamente en registrar el descenso de una columna de agua al interior de un anillo (simulando el movimiento vertical del agua durante lluvia o riego), enterrado a unos centímetros de la superficie del suelo. Luego, los datos obtenidos en campo son ajustados al modelo de infiltración de Kostiakov para así determinar la infiltración básica.

La infiltración básica del suelo (I_b) es quizá el parámetro más importante para llevar a cabo un diseño de un sistema de riego por aspersión; pues este valor, debe ser mayor a la intensidad pluviométrica del aspersor para así evitar erosión y encharcamiento superficial.

4.3.3.5.1 Cálculo de la velocidad de infiltración básica - Pruebas de percolación o infiltración

Dentro de los modelos de infiltración que han sido propuestos desde que ha sido estudiado el fenómeno de infiltración de agua en el suelo, el modelo de infiltración de Kostiakov (1932) se destaca como el más empleado en las prácticas de riego a nivel mundial. Su expresión se define como:

$$i = c't^\alpha$$

Dónde:

i = lámina de infiltración acumulada (cm)

t = tiempo (min)

c' y α = parámetros empíricos adimensionales.

Los parámetros c' y α recogen el efecto de muchas variables tales como textura, estructura, contenido inicial de humedad, manejo del suelo, presencia de raíces, etc. en una forma conjunta que no explica el efecto de cada una de estas variables y por consiguiente son parámetros empíricos, igualmente, puede observarse que la ecuación de Kostiakov no es dimensionalmente homogénea, se trata entonces de una ecuación también empírica. La velocidad de infiltración del suelo es simplemente la primera derivada de la infiltración acumulada en función del tiempo. En esta forma se puede expresar como:

$$di/dt = I = c'\alpha t^{\alpha-1}$$

Dónde:

I= Velocidad de infiltración (cm/min)

t= tiempo (min)

c' y α = como se definieron anteriormente.

Si se define un $K=60c'$ a la velocidad de infiltración se puede expresar en cm/h para el tiempo en minutos; así se tendrá:

$$I = Kt^{\alpha-1}$$

La regresión estadística constituye la forma más rápida y precisa de obtener la ecuación de $i=f(t)$. Con fines de riego, el parámetro más importante al desarrollar un modelo de infiltración es la infiltración básica, la cual se define como aquel valor de la velocidad de infiltración que permanece aproximadamente constante con el tiempo, es decir un valor en el cual la curva presenta un comportamiento aproximadamente asintótico.

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (NRCS) desarrolló un método para estimar la infiltración básica, el cual es un procedimiento rápido y de precisión aceptable. Según este análisis, el tiempo en el cual la velocidad de infiltración es igual a la tasa básica, se encuentra cuando dI/dt es igual $-10/100$ de la velocidad de infiltración I , es decir:

$$dI/dt = -0.1I$$

El signo negativo obedece al sentido descendente de la pendiente de la velocidad de infiltración. Reemplazando y despejando t se tiene el tiempo básico t_b o tiempo en cual ocurre la infiltración básica como:

$$t_b = -600(\alpha-1)$$

Los registros y datos de cálculo correspondientes con la prueba de infiltración, realizada a los lugares de caracterización dentro del loque CPO-5, se presentan en el **Anexo 4.3-1c_Prueba_infil y 4.3-1f_Resultados_lab**.

Como se mencionó anteriormente la tasa básica de infiltración I_b es de gran importancia para la correcta selección de aspersores en este diseño y operación de sistemas de riego por aspersión; la tasa de aplicación de agua o intensidad pluviométrica de los aspersores debe ser menor que I_b para que no se presenten problemas de escorrentía superficial ni de encharcamientos, si no que el agua aportada a través del riego sea infiltrada sin problema. Con el fin de orientar esa selección e interpretar de forma cualitativa los valores numéricos obtenidos del análisis de los datos tomados de la prueba, se valoraron los resultados obtenidos de acuerdo con la **Tabla 4.3-20** que presenta la categorización establecida por el IGAC.

Tabla 4.3-20 Clasificación de la velocidad de infiltración básica

Interpretación	Velocidad de infiltración básica [CM/H]
Sin dato	-
Muy lenta	< 0.1
Lenta	0.1 - 0.5
Moderadamente lenta	0.51 - 2.0
Moderada	2.01 – 6.3
Moderadamente rápida	6.311 – 12.7
Rápida	12.7 – 25.4
Muy rápida	> 25.4

Fuente: Instructivo para los levantamientos de suelos (manual de códigos). Laboratorio de suelos, características fisicoquímicas y mineralógicas. IGAC, 2010.

Para el presente estudio, se realizaron dos pruebas de infiltración por cada unidad cartográfica de suelo (original y replica), durante las actividades de campo efectuadas en los lugares de realización de los perfiles modal presentados en el **numeral 4.3.3.2.1** y cuyos resultados se presentan en el **Anexo 4.3-1f_Resultados_lab**. Sin embargo, al recibir los resultados de las pruebas realizadas se verifica que las pruebas de infiltración de las unidades RVG, PVA y LVJ tienen clasificaciones “Muy lentas” aunque pertenezcan a geoformas que no presentan encharcamientos frecuentes, lo anterior debido a que las pruebas de infiltración se realizaron entre el 19 de octubre del 2025 y el 26 de octubre del 2025, época de altas precipitaciones para la zona y en los tres casos al realizar las pruebas, los suelos se encontraban saturados al haber presentado precipitaciones de alta intensidad las noches anteriores a la realización de las respectivas pruebas, resultando disminuidas las infiltraciones básicas. Con lo cual, se realizó una tercera prueba de infiltración con el fin de medir las capacidades de infiltración de estas 3 unidades cartográficas de suelo, pero en época de bajas precipitaciones las cuales se realizaron entre el 1 de febrero del 2026 y el 10 de febrero del 2026, con el fin de viabilizar el vertimiento únicamente en esta época climática para estas unidades de suelo.

Los análisis de resultados de las pruebas de infiltración en los lugares de caracterización de las unidades aptas para realizar vertimiento y su respectiva categorización se presentan en la **Tabla 4.3-21** (Ver **Anexo 4.3-1f_Resultados_lab** y **Anexo 4.3-1c_Prueba_infil**).

Tabla 4.3-21 Resultados de las pruebas de infiltración en campo de los perfiles caracterizados de las unidades aptas para realizar vertimiento mediante campos de aspersión

Unidad de suelo	Perfil modal	Ib (mm/hr)	Ib (cm/hr)	Clasificación	Coordenadas origen único nacional	
					Este	Norte
AVC	Cal-Vert-AVC01-1	9,95	0,995	Moderada	5041202,8	2015843,7
	Cal-Vert-AVC01-2	9,88	0,988	Moderadamente lenta		
RVG	CAL-VERT-RVG-1	0	0	Muy lenta	5002774,5	2019744,9
	CAL-VERT-RVG-2	0	0	Muy lenta		
PVB	CAL-VERT-PVB-1	8,13	0,813	Moderadamente lenta	5000665,2	2030461,3
	CAL-VERT-PVB-2	24,6	2,46	Moderada		

Unidad de suelo	Perfil modal	Ib (mm/hr)	Ib (cm/hr)	Clasificación	Coordenadas origen único nacional	
					Este	Norte
PVA	CAL-VERT-PVA-1	0,175	0,0175	Muy lenta	5001127,8	2027457,2
	CAL-VERT-PVA-2	0,305	0,0305	Muy lenta		
LVJ	CAL-VERT-LVJ-1	0,841	0,0841	Muy lenta	5013299,7	2001931,5
	CAL-VERT-LVJ-2	0,312	0,0312	Muy lenta		
RVG*	CAL-VERT-RVG-3	39,56	3,956	Moderada	5000898	2010280
PVA*	CAL-VERT-PVA-3	84,39	8,439	Moderadamente rápida	5005928	2029059
LVJ*	CAL-VERT-LVJ-3	36.16	3.616	Moderada	5016361	2006947

*Pruebas de infiltración realizadas en época de bajas precipitaciones

Fuente: GessiG SAS, 2026

De acuerdo con la caracterización y las pruebas de infiltración de los perfiles de las unidades cartográficas de suelo aptas, se tienen restricciones para realizar vertimiento en suelo mediante sistemas de riego por aspersión en las unidades de suelo RVG, PVA, LVJ, acotando el periodo de vertimiento para estas unidades únicamente en épocas de bajas precipitaciones la cual para la zona se refiere a los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo siempre y cuando se operen correctamente los tiempos de riego y caudales de disposición que posteriormente se expondrán en este capítulo. Para las unidades AVC y PVB no se tienen restricciones.

Esta información resultante junto con los análisis de laboratorio fueron insumos para realizar los diseños de los sistemas de riego para cada unidad de suelos apta. Con el cálculo de la infiltración básica presentado anteriormente y en comparación con la intensidad pluviométrica obtenida de la configuración en los diseños de los sistemas de aspersión (función de la distancia entre aspersores, distancia entre laterales y el caudal del aspersor) que se presentan en el ítem siguiente, se puede concluir que si se opera adecuadamente el sistema de aspersión no se presentarán saturaciones superficiales o encharcamientos, puesto que la capacidad utilizada de infiltración de la unidad de suelo está por debajo a la capacidad máxima de infiltración.

4.3.3.6 Variación del nivel freático

Para la determinación de este parámetro se realizó el análisis de los puntos piezométricos identificados en el componente hidrogeológico y que se presentan en el **Capítulo 3.2.7** en el cual, se realiza una estimación de las direcciones de flujo somero local (nivel freático) mediante la interpolación de los niveles piezométricos de 249 puntos incluidos pozos, piezómetros y aljibes de hasta 20 m de profundidad, y manantiales.

Los resultados obtenidos reportan que los niveles estáticos en estos puntos son en su mayoría de menos de 6 m de profundidad, sin embargo, no se especifica cuáles son los valores mínimos reportados. Esto puede generar inconvenientes en épocas de invierno, donde las altas precipitaciones pueden generar que el nivel freático ascienda a niveles cercanos a la superficie, lo cual aumenta el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por el vertimiento.

Por tal motivo, se establece como medidas de manejo que los vertimientos se realizarán siempre y cuando el nivel freático este inferior a 1,7 m con respecto a la superficie, lo cual se monitoreará mediante el establecimiento de al menos un piezómetro en cada uno de campos de aspersión a instalar. Esto garantizará que la concentración de solutos que puedan hacer contacto con las aguas subterráneas no supere los límites máximos permisibles dentro de la norma, lo cual se presenta en el **numeral 4.3.3.9.4**.

4.3.3.7 Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero asociado

El riesgo de contaminación del acuífero asociado a cada una de las unidades cartográficas de suelo se evaluó por medio de la metodología Foster e Hirata, (1988) y se presenta en el **numeral 4.3.3.9** del presente capítulo.

4.3.3.8 Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 3930 Art. 42 (adoptado por el ARTÍCULO 2.2.3.3.5.2. del decreto 1076 del 2015)

Este numeral da cumplimiento a los requisitos para la obtención del permiso de vertimiento establecidos en el Artículo 2.2.3.3.5.2 del decreto 1076 del 2015 (modificación del Art. 42 del Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010) "Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1974, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11 Libro 11 del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones" y que aplican para el presente Estudio de Impacto Ambiental.

4.3.3.8.1 Datos del solicitante del permiso de vertimiento

Tabla 4.3-22 Datos del solicitante

Nombre o razón social	ONGC VIDESH LIMITED SUCURSAL COLOMBIANA
Nit. De la empresa	900196778 7
Representante legal:	Niranjan Roul
Documento de identidad:	Z8086960
Cedula de ciudadanía	
Dirección	Calle 100 No. 13 - 76
Correo electronico	notificaciones_judiciales@ongcvidesh.in / astrid_nossa@ongcvidesh.in
Telefono	4858700 - 3138098667

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.8.2 Poder debidamente otorgado al apoderado

Se presenta en el **Anexo 4.0_Informacion_Legal**.

4.3.3.8.3 Certificado de existencia y representación legal de la persona jurídica

Se presenta en el **Anexo 4.0_Informacion_Legal**.

4.3.3.8.4 Datos del predio, propiedad o inmueble utilizado para realizar el vertimiento

El presente permiso se solicita sobre unidades cartográficas de suelo, pues aún no se tienen definidos los puntos exactos donde se realizarán los vertimientos en ZODAR para el desarrollo de las actividades en el Bloque CPO-5. En los PMAE se presentará la información correspondiente a los predios utilizados para realizar el vertimiento en suelo.

4.3.3.8.5 Costo del proyecto

El costo del total del proyecto se estima en \$2.018.606.963.404 (Dos billones dieciocho mil seiscientos seis millones novecientos sesenta y tres mil cuatrocientos cuatro pesos).

4.3.3.8.6 Fuente de abastecimiento de agua

La fuente de abastecimiento de agua para uso doméstico e industrial se obtendrá de los puntos solicitados para concesión de aguas superficiales y subterránea reportados en los **numerales 4.1 Aguas Superficiales** y **4.2 Aguas Subterráneas** del presente estudio. Por lo cual estos podrán ser usados siempre y cuando los puntos sean autorizados.

4.3.3.8.7 Características de las actividades que generan el vertimiento.

Estas se presentaron en el **Numeral 4.3.1.1** del presente capítulo.

4.3.3.8.8 Plano donde se identifique origen, cantidad y localización georreferenciada de las descargas al cuerpo de agua o al suelo

A continuación, en la **Figura 4.3-21** se presenta el área que componen las unidades cartográficas de suelo de interés y aptas a las cuales se les realiza la solicitud de permiso de vertimiento a suelos.

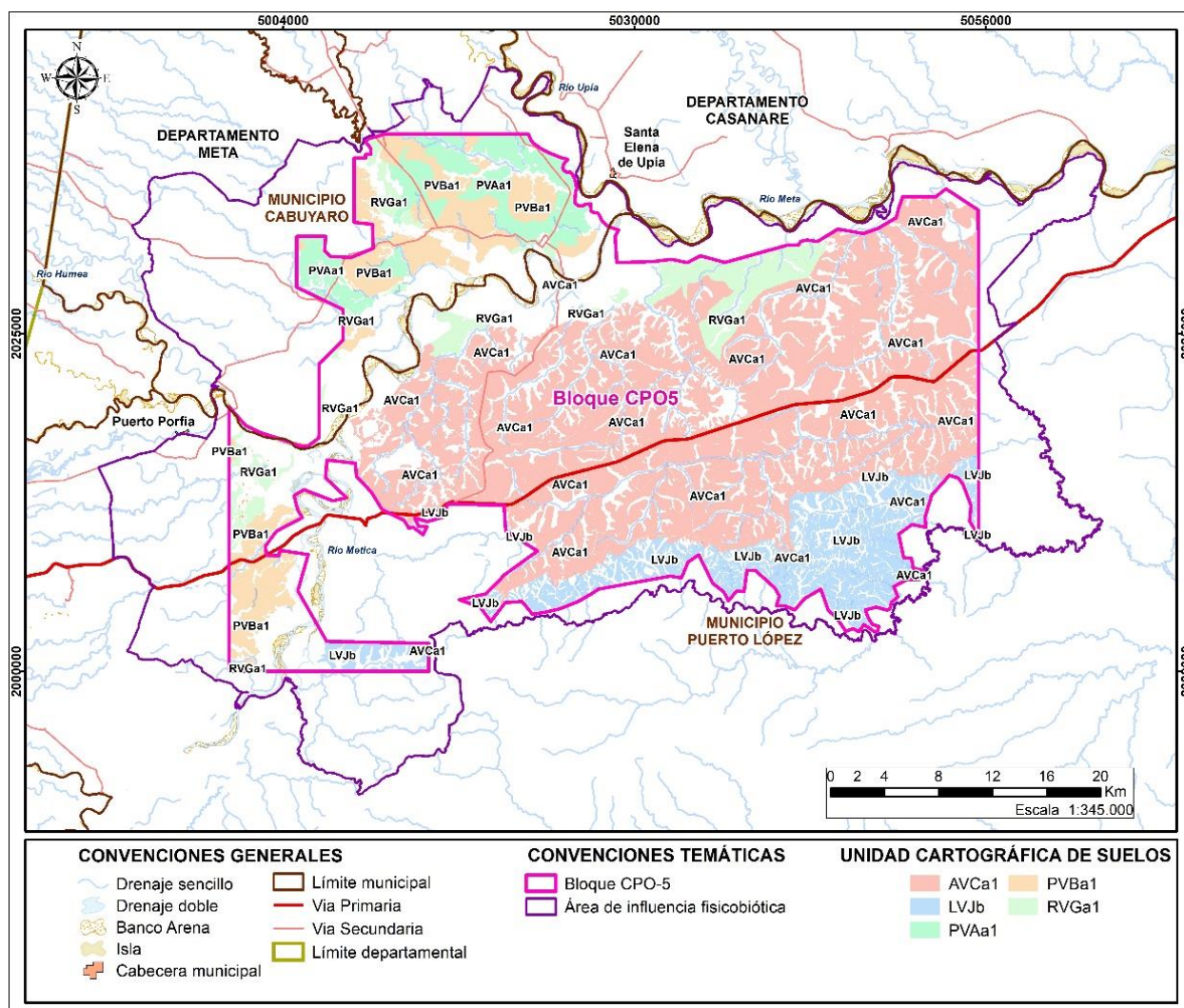


Figura 4.3-21 Distribución de las unidades cartográficas de suelo de interés y aptas para realizar vertimientos en suelo

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.8.9 Caudal de la descarga expresada en litros por segundo

El caudal de descarga o vertimiento se presenta en la **Tabla 4.3-23** para cada unidad de suelo dentro de la solicitud del permiso de vertimiento.

Tabla 4.3-23 Caudal de vertimiento para cada unidad de suelo

Unidad de suelo -perfil modal	Área de la zodar	Caudal de vertimiento
	[ha]	[L/s]
AVC	2,45	3
RVG	2,05	3

Unidad de suelo -perfil modal	Área de la zodar	Caudal de vertimiento
	[ha]	[L/s]
PVB	2,2	3
PVA	2,44	3
LVJ	2,64	3

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.8.10 Frecuencia de la descarga expresada en días por mes

La frecuencia de la descarga se calculó como el número de días en un mes (30 días) sobre el valor de frecuencia de riego. Este último se determinó en el diseño de cada sistema de riego por aspersión presentado posteriormente, teniendo en cuenta las propiedades físicas de cada tipo de suelo y el caudal máximo a verter que se presentó en la **Tabla 4.3-23**.

Tabla 4.3-24 Frecuencia de descarga expresada en día por mes para cada unidad de suelo caracterizada

Unidad de suelo	Tiempo de riego al día [horas]	Frecuencia de riego [días]	Frecuencia de descarga [día/mes]
AVC	14,38	2	15
RVG	11,41	3	10
PVB	12,55	3	10
PVA	12,8	2	15
LVJ	15,2	2	15

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

4.3.3.8.11 Tiempo de la descarga expresada en horas por día

Teniendo un caudal de descarga constante, en la **Tabla 4.3-24**, se encuentra el tiempo de descarga o tiempo de riego expresado en horas por día.

4.3.3.8.12 Tipo de flujo de la descarga indicando si es continuo o intermitente

Para mantener un caudal de descarga constante, con el cual los suelos lleguen a su capacidad de campo, la descarga del vertimiento tendrá un flujo continuo durante el tiempo de riego presentado en la **Tabla 4.3-24**.

4.3.3.8.13 Caracterización actual del vertimiento existente o estado final previsto para el vertimiento proyectado de conformidad con la norma de vertimientos vigente.

La caracterización de las aguas residuales a tratar se presentó en el **numeral 4.3.1.2**.

4.3.3.8.14 Ubicación, descripción de la operación del sistema, memorias técnicas y diseños de ingeniería conceptual y básica, planos de detalle del sistema de tratamiento y condiciones de eficiencia del sistema de tratamiento que se adoptará

La ubicación de las áreas proyectadas para vertimiento no es el alcance del presente estudio, estas se presentarán en los PMA específicos. La descripción de los sistemas y alternativas de tratamiento y manejo se presentan en el **numeral 4.3.1.5**. Descripción de las alternativas de manejo de las aguas residuales generadas y los sistemas de tratamiento propuestos del presente capítulo. Adicionalmente en apartados posteriores se presenta el diseño del sistema de riego tipo a emplear por cada posible unidad de suelo caracterizada.

4.3.3.8.15 Concepto sobre el uso del suelo expedido por la autoridad municipal competente.

Debido a que los certificados de uso de suelo para permiso de vertimiento se emiten por predio y al momento de la elaboración del presente estudio no se sabe la localización exacta de las ZODAR, lo cual está determinado por la zonificación y unidades de suelo, se plantea presentar los certificados de uso de los predios exactos donde se localizaran los ZODAR en los PMA específicos.

Mientras tanto en el **Anexo 4.3-1i_Cert_uso_suelo** se encuentran los oficios radicados a las secretarías de planeación de las alcaldías de Cabuyaro y de Puerto López; referentes a la solicitud de Uso de suelo en las veredas al interior del Bloque CPO-5, sin que en ellos se especifique ningún predio, dado que en esta etapa del proyecto no es posible conocer la localización exacta de las ZODAR.

4.3.3.8.16 Plan de gestión del riesgo para el manejo del vertimiento

Este plan sigue los lineamientos establecidos por la Resolución 1514 del 31 de agosto de 2012, por medio del cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimientos. En el **Anexo 4.3-1g_PGRMV** se encuentra el Plan de Gestión para el Manejo del Riesgo de Vertimientos elaborado bajo lo establecido en el Decreto 3930 de 2010 citado por el artículo 2.2.3.3.5.4 del Decreto 1076 de 2015, sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales para situaciones y eventos no planeados, suspensiones temporales o fallas entre otros.

4.3.3.9 Evaluación ambiental del vertimiento

A continuación, en este numeral se presenta la información necesaria para desarrollar la Evaluación Ambiental del Vertimiento en concordancia con lo estipulado en el artículo 9 del Decreto 050 de 2018, que modificó el artículo 2.2.3.3.5.3 del Decreto 1076 de 2015, generado por el proyecto en el Bloque CPO-5, el cual se asocia con la alternativa de disposición de aguas residuales tratadas en el suelo mediante riego en ZODAR. Igualmente, se presentan los resultados de la modelación de las aguas residuales tratadas vertidas al suelo (zona no saturada) con el modelo HYDRUS 1D.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Así mismo se presentan los diseños de sistemas de riego tipo. De esta manera, una vez determinados el caudal y el sistema de riego por aspersión más adecuado, es decir aquellos que no generen encharcamientos o escorrentía superficial, se procede a realizar la evaluación de los impactos ocasionados por las descargas en el suelo. Y finalmente se presentan los resultados arrojados por el modelo HYDRUS 1D, que requiere entre otros datos de entrada: caudal y carga de contaminantes del vertimiento generado, variables hidrometeorológicas y características de las unidades de suelo y sus respectivos perfiles. Finalmente, estos resultados se evalúan junto con las características geológicas e hidrogeológicas de la zona para determinar el riesgo de contaminación en la zona saturada.

4.3.3.9.1 Localización georreferenciada de proyecto, obra o actividad.

La información referente a la localización del proyecto se encuentra en el **Capítulo 2** del presente estudio. Adicionalmente, en el presente documento se presentó el plano donde se encuentran las áreas concernientes a las unidades cartográficas de suelos aptas y de interés a las cuales se les realiza la solicitud del permiso de suelo.

4.3.3.9.2 Memoria detallada del proyecto, obra o actividad que se pretenda realizar, con especificaciones de procesos y tecnologías que serán empleados en la gestión del vertimiento. - Información detallada sobre la naturaleza de los insumos, productos químicos, formas de energía empleados y los procesos químicos y físicos utilizados en el desarrollo del proyecto, obra o actividad que genera vertimientos.

Esta información se ha presentado en diferentes numerales tanto del presente capítulo como de otros capítulos del mismo Estudio de impacto ambiental, tal como se mencionan a continuación: en el **Numeral 4.3.1.1, 4.3.1.2, 4.3.1.3, 4.3.1.4 y 4.3.1.5**. Del presente capítulo se exponen las actividades generadoras de las aguas residuales que posteriormente de ser tratadas se dispondrán mediante vertimiento en suelo, compilando de forma general el manejo, tratamiento y disposición que se realizara tanto a las ARD como a las ARnD; en el mismo **numeral 4.3.1.1** del presente capítulo, se presenta la caracterización de las aguas residuales al igual que en el numeral anterior, discriminadas entre domésticas y no domesticas (industriales); posteriormente en el **numeral 4.3.1.5** se presentan las alternativas de manejo y sistemas de tratamiento propuestos por cada una del tipo de aguas residuales a generar, los cuales abordan temas de procesos, tecnologías e insumos químicos; finalmente en el **Capítulo 2 Numeral 2.2.2 Estrategias de desarrollo** se ahondan cada uno de los temas solicitados en el presente numeral.

4.3.3.9.3 Predicción y valoración de los impactos que puedan derivarse de los vertimientos generados por el proyecto, obra o actividad al suelo, considerando su vocación conforme a lo dispuesto en los instrumentos de ordenamiento territorial y los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.

La valoración de impactos se realizó mediante la matriz presentada en el **Capítulo 5 Evaluación Ambiental** del Proyecto del presente estudio, en el cual, se identificó dentro del escenario Con

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

Proyecto, la actividad denominada "55. Disposición de AR mediante campo de aspersión" que se encuentra en la etapa denominada "Operación – Pruebas de producción y operación de facilidades de producción".

En esta se evaluaron ocho impactos que se generan por la realización de la actividad asociada al vertimiento en suelo, los cuales fueron:

"Alteración de las condiciones geotécnicas" en donde se expone que esta actividad "podría generar un impacto negativo ya que se podría incrementar los procesos erosivos debido a la disposición de agua libre sobre la superficie, la intensidad del impacto es baja ya que el riego se realizará mediante un diseño para evitar encharcamientos y escorrentías que pudieran erosión hídrica, por lo cual no generaría agua libre que pudiera constituirse en un factor detonante; la extensión es puntual ya que se realizaría sobre las ZODAR sobre las cuales la operadora realice actividades; el impacto se daría a mediano plazo sobre la ZODAR ya que la frecuencia seria mayor. La persistencia temporal ya que con obras de geotecnia se podría corregir el impacto, acumulativo dado que los que la actividad de vertimiento se realizaría con frecuencia con lo cual se podrían generar áreas con procesos puntuales de erosión hídrica, reversible en el mediano plazo por medios naturales mientras se estabiliza, acumulativo ya que podría incrementarse por el efecto del vertimiento frecuente, indirecto ya que la actividad no se realiza con el objeto de incrementar procesos erosivos, de periodicidad irregular ya que no implica que necesariamente se vaya a presentar el impacto, y de recuperabilidad a corto plazo mediante intervención."

"Alteración a la calidad del suelo" en donde se expone que esta actividad "afecta al suelo, debido a que la disposición de estos modifica su capacidad de infiltración, porosidad y además tiende a haber una acumulación de iones procedentes de las aguas vertidas sobre este, lo que modifica sus propiedades químicas. De acuerdo con las condiciones del área de influencia, se estima que esta actividad podría generar un impacto de naturaleza negativa con extensión puntual, con efecto directo e inmediato de ocurrencia, persistencia de tipo temporal, reversibilidad en el mediano plazo, sinérgico debido a que la acumulación de iones puede alterar la capacidad de soportar vegetación, acumulativo debido a que la cantidad de iones en el suelo está se acumula en función del volumen vertido, periodicidad continua y recuperabilidad en el corto plazo con la implementación de medidas adecuadas. Presenta una importancia moderada con una calificación de -38".

El tercer impacto identificado es el de "Cambio en el uso del suelo" en este impacto se expone que "modifica el uso del suelo en la medida en que las condiciones físicas y químicas del suelo lo inhabilitan para fines de conservación y de producción agropecuaria. De acuerdo con las condiciones del área de influencia, se estima que esta actividad podría generar un impacto de naturaleza negativa con extensión puntual, con efecto directo e inmediato de ocurrencia, persistencia temporal, reversibilidad en el mediano plazo, con sinergia moderada debido a la modificación no es solamente sobre el suelo sino también sobre las coberturas, no es acumulativo, periodicidad continuo, ya que su efecto inicia una vez es modificado el suelo, con recuperabilidad en el corto plazo con las medidas adecuadas. Es un impacto de naturaleza negativa y de importancia ambiental moderada con una calificación de -35."

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

El cuarto impacto identificado es la "Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial" En donde se expone que "genera un impacto negativo de importancia irrelevante sobre la calidad de agua, debido a que teniendo en cuenta las unidades fisiográficas bajo las cuales se desarrolla el proyecto (llanura de inundación y altillanura), en los campos de aspersión puede existir una sobre saturación del suelo que genere encharcamiento, o inundación que por acción de la escorrentía superficial o aguas subsuperficiales (nivel freático cercano a la superficie) hace que las aguas dispuestas entren en contacto con cuerpos de agua cercanos, la intensidad del impacto es baja ya que las aguas residuales dispuestas han sido sometidas a un tratamiento previo a su disposición que cumple con los criterios de la normatividad ambiental. La extensión del impacto es puntual ya que se restringe al área del campo de aspersión. El impacto se manifiesta a corto plazo y tiene una persistencia inferior a un año, la reversibilidad y recuperabilidad se considera a corto plazo de acuerdo a la temporalidad ya sea época de lluvia a o seca, la cual acelera o ralentiza la capacidad de autodepuración de los drenajes. El efecto se considera de sinérgica y acumulación simple, indirecto, y de ocurrencia irregular."

El quinto impacto identificado es "Alteración a la calidad del recurso hídrico subterráneo" en donde se sustenta que "la disposición de AR mediante campo de aspersión de aguas residuales domesticas e industriales tratadas, podría genera un impacto negativo de intensidad media si la escorrentía se infiltra hacia los niveles someros del acuífero, de extensión puntual en las zonas en donde se realice la actividad de disposición, la manifestación del impacto se daría a mediano plazo ya que las sustancias deben atravesar la zona no saturada hasta alcanzar el nivel del acuífero por lo cual sufriría procesos de retardación y degradación que tienden a disminuir la peligrosidad de los fluidos, de persistencia temporal debido a que las sustancias tienden a disolverse una vez ingresan al acuífero; reversible a mediano plazo mientras se disuelven en el acuífero los remanentes que atraviesen la zona no saturada, no sinérgico pero acumulativo con cada disposición que se realice, el efecto es indirecto ya que la dispersión no se realizará sobre el acuífero, regular en relación con la frecuencia en al cual se realice la actividad, y de recuperabilidad a medio plazo con intervención. La importancia ambiental del impacto es irrelevante (-24) para ambas actividades."

El sexto impacto se refiere a la "Alteración de la concentración de gases contaminantes criterio" el cual "obtiene un nivel de Importancia irrelevante. Cuentan con una Intensidad baja ya que su única contribución son las emisiones pasivas de gases desde el agua, sin involucrar un proceso de combustión. Asimismo, su Extensión es puntual dado que tanto el campo de aspersión como el sistema de evaporación, son zonas muy localizadas y fijas en el campo petrolero. Finalmente, su Periodicidad regular indica que la aspersión o evaporación del agua no es totalmente constante, sino que ocurre en ciclos determinados durante la operación del proyecto."

El séptimo impacto es "Generación de olores ofensivos" en el cual se expone que "generan olores debido a la liberación de gases resultantes de los procesos de degradación biológica y evaporación de compuestos volátiles. Ambas se valoraron con intensidad media, reversibilidad a corto plazo y una importancia irrelevante negativa (-24). Aunque el efecto es puntual y de baja permanencia, puede percibirse en el entorno cercano a los puntos de disposición, especialmente bajo condiciones de alta temperatura o escasa circulación del aire."

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Finalmente, el ultimo impacto evaluado es el de “Alteración a la hidrobiota” el cual “genera impactos perjudiciales cuya importancia ambiental es irrelevante ($I = -15$). Muestra una intensidad baja ($IN = 1$) y una extensión puntual ($EX = 1$), confinada al área de aplicación. Se manifiestan a corto plazo ($MO = 3$), tiene una persistencia fugaz ($PE = 1$), una reversibilidad a corto plazo ($RV = 1$), una sinergia simple ($SI = 1$), una acumulación simple ($AC = 1$), un efecto indirecto ($EF = 1$) sobre la hidrobiota (principalmente a través de la posible alteración de la calidad del agua por hidrocarburos o cambios en la salinidad (Veil, 2015²)) y una periodicidad irregular ($PR = 1$), vinculada a eventos operativos específicos. La recuperabilidad inmediata ($MC = 1$) indica que, ante un incidente, la aplicación de protocolos de contención y remediación permitiría un restablecimiento rápido de las condiciones iniciales. La combinación de estos criterios determina que se trata de riesgos operacionales controlados, de baja probabilidad y magnitud, cuyos efectos potenciales no comprometen la integridad ecológica de los sistemas acuáticos, pero en menor medida a sus poblaciones acuáticas.”

La matriz donde se evaluaron los impactos presentados anteriormente se presenta en el **Anexo 5.1_Matriz_Evaluacion_Ambiental**.

4.3.3.9.4 Predicción a través de modelos de simulación de los impactos que cause el vertimiento en el cuerpo de agua y/o al suelo, en función de la capacidad de asimilación

En este numeral se presentan los resultados de las predicciones y valoraciones de los impactos potenciales en la calidad de agua de los acuíferos, debido a las actividades de vertimiento a suelo de aguas residuales domésticas y no domésticas (industriales), y evaluados con el software HYDRUS 1D (Simunek et al., 1998). Este software resuelve ecuaciones numéricas de movimiento de agua y solutos en el medio no saturado (zona vadosa), generando predicciones sobre los tiempos de recorrido y las concentraciones finales de un contaminante en la zona no saturada. Las modelaciones están en concordancia con lo estipulado en el Decreto 3930 de 2010, Artículo 43 numerales 4 y 5 (Adoptado por el Art. 2.2.3.3.5.3 del decreto 1076 del 2015 el cual fue modificado por el Art. 9 del decreto 050 del 2018).

➤ *Normatividad vigente aplicable*

La normatividad aplicable a la solicitud del permiso de vertimiento en suelo se ciñe directamente al Decreto 050 del 2018 y Decreto 1076 del 2015 el cual modifico en parte al Decreto 3930 del 2010. En cuanto a la normatividad aplicable a las aguas residuales generadas por las actividades del Bloque CPO-5, se tiene que aclarar que estas no están destinadas de forma directa a ninguno de los usos establecidos en el Capítulo IV del Decreto 1594 de 1984 citado por el Decreto 1076 del 2015, en donde se define que el agua puede estar destinada a los siguientes usos: Consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, estético, industrial, pesca, maricultura y acuicultura, navegación y transporte acuático. Sin embargo, de forma indirecta, los vertimientos realizados en los suelos presentes en el proyecto pueden

² Veil, J. A. (2015). Management of Water Extracted from Oil and Gas Wells. Argonne National Laboratory.

asociarse a las actividades agrícola y pecuaria; dicha relación a estas actividades se establece por un potencial estado futuro de utilización de las ZODAR.

De acuerdo con el Artículo 66 del Decreto 1594 las normas de vertimiento deben ser fijadas teniendo en cuenta los criterios de calidad establecidos para el uso o los usos asignados al recurso. En donde se asignen usos múltiples, las normas de vertimientos se establecerán teniendo en cuenta los valores más restrictivos de cada uno de los parámetros fijados para cada uso. Es así como para el caso de los vertimientos en suelos realizados en el Área del proyecto se toman como criterios de calidad de agua los valores más restrictivos de los usos indirectos o usos futuros potenciales de las ZODAR los cuales serán agrícolas y pecuarios.

Los criterios de calidad del vertimiento están indicados en las **Tabla 4.3-25** y **Tabla 4.3-26**, en los cuales prevalece el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984 - Art 72 (adoptado por el Art 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 del 2015) y los establecidos por el artículo 8 y artículo 11 de la Resolución 0631 de 2015. Se debe aclarar que estos parámetros se establecieron para vertimientos en cuerpos de agua, pero se utilizan como punto de referencia en vertimiento en suelo al no existir normatividad vigente específica.

Tabla 4.3-25 Regulación de calidad del vertimiento

Parámetro	Norma aplicable	Valores límites máximos en los vertimientos	Valores límites máximos en los vertimientos
		Artículo 8 de la resolución 0631	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076
Generales			
pH	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 Artículo 8 de la resolución 0631	6,00 a 9,00	5 a 9 unidades
Temperatura	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076	-	° = 40 °C
Material Flotante	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076	-	Ausente
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Artículo 8 de la resolución 0631	180,00	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 Artículo 8 de la resolución 0631	90,00	-
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 Artículo 8 de la resolución 0631	90,00	Remoción:
			80% en carga (usuario nuevo)
			50% en carga (usuario existente)
Sólidos Sedimentables (SSED)	Artículo 8 de la resolución 0631	5,00	
Grasas y Aceites	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 Artículo 8 de la resolución 0631	20,00	Remoción
			80% en carga
			(usuario nuevo y existente)
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Parámetro	Norma aplicable	Valores límites máximos en los vertimientos	Valores límites máximos en los vertimientos
		Artículo 8 de la resolución 0631	Artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO43-)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Fósforo Total (P)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO3-)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Nitritos (N-NO2-)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-
Nitrógeno Total (N)	Artículo 8 de la resolución 0631	Análisis y reporte	-

Fuente: Decreto 1594 de 1984 adoptado por el Decreto 1076 del 2015 y Resolución 0631 del 2015, consultado por GessiG S.A.S., 2025

Tabla 4.3-26 Regulación de calidad del vertimiento 2

Parametro	Unidades	Exploración (upstream)	Producción (upstream)	Refino	Venta y distribución (downstream)	Transporte y almacenamiento (midstream)
Generales						
pH	Unidades de pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400	180	400	180	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O ₂	200	60	200	60	60
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50	50	50	50	50
Sólidos sedimentables (SS _{ED})	mg/L	1	1	1	1	1
Grasas y aceites	mg/L	15	15	15	15	15
Fenoles	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Sustancias activas al Azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Hidrocarburos						
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10	10	10	10	10
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Compuestos de Fósforo						
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Ortofosfatos (P-PO43)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES		

Parametro	Unidades	Exploración (upstream)	Producción (upstream)	Refino	Venta y distribución (downstream)	Transporte y almacenamiento (midstream)
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10	10	10 o 40	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Iones						
Cianuro Total (CN)	mg/L	1	1	1		
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	1200	1200	500	250	250
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300	300	500	250	250
Sulfuros (S ₂)	mg/L	1	1	1		
Metales y metaloides						
Arsénico (As)	mg/L	0,1	0,1	0,1		
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,1	0,1	0,1		
Cinc (Zn)	mg/L	3	3	3		
Cobre (Cu)	mg/L	1	1	1		
Cromo (Cr)	mg/L	0,5	0,5	0,5		
Hierro (Fe)	mg/L	3	3	3		
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01	0,01		
Níquel (Ni)	mg/L	0,5	0,5	0,5		
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Plomo (Pb)	mg/L	0,2	0,2	0,1		
Selenio (Se)	mg/L	0,2	0,2	0,2		
Vanadio (V)	mg/L	1	1	1		
Otros parámetros para análisis y reporte						
Acidez Total	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
	CaCO ₃					
Alcalinidad Total	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
	CaCO ₃					
Dureza Cálrica	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
	CaCO ₃					
Dureza Total	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
	CaCO ₃					
Color real	m-1	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

Fuente: Resolución 0631 del 2015, consultado por GessiG S.A.S., 2026

Ahora, según lo publicado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España en su Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005 de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados, "Se entiende por riesgo la posibilidad de sufrir un daño

por la exposición a un peligro, en este caso, a una sustancia.” Como actualmente en Colombia no existe legislación que establezca límites de elementos que lleguen al nivel freático o a los acuíferos someros y su posible incidencia en la salud humana o al ambiente, para la evaluación del riesgo a la salud humana se tomaron y compararon los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso presentados en el decreto 1594 de 1984 en sus artículos 38 y 39, adoptado por el decreto 1076 del 2015 en sus Art 2.2.3.3.9.3. y Art. 2.2.3.3.9.4 (**Tabla 4.3-27**), los cuales presentan los criterios de calidad de las aguas para uso humano y doméstico (Tratamiento convencional) y Uso humano doméstico (Desinfección) respectivamente, así si se realiza una estimación de los datos arrojados por los modelos obtenidos en el software y si las concentraciones obtenidas en los modelos para el escenario 2 (**Numeral 4.3.3.9.4**) luego de 1 año de vertimiento en la parte inferior del perfil, no sobrepasan estos criterios, significa que así se genere la disposición de estos elementos en los acuíferos y asumiendo que allí se presente captación de este recurso para uso doméstico, existe un riesgo bajo a la salud humana al cumplir los criterios presentados en el Decreto 1076 del 2015.

Según lo anterior, el riesgo al ambiente (entendido como recurso suelo y aguas subterráneas) será evaluado de la siguiente manera, se compararan los criterios más restrictivos de calidad del recurso de los artículos 40 al 45 (**Tabla 4.3-27**) del Decreto 1594 de 1984 citado por el Decreto 1076 del 2015 Art 2.2.3.3.9.3 al Art. 2.2.3.3.9.10, destinados a uso agrícola, uso pecuario, recreativo y de preservación de flora y fauna en aguas dulces cálidas o frías respectivamente, así nuevamente si las concentraciones modeladas en el escenario 2 no sobrepasan los criterios más restrictivos de estos artículos, existirá un bajo riesgo al ambiente, por las posibles destinaciones del suelo, posterior al vertimiento generado por el proyecto.

Tabla 4.3-27 Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso

Parámetro	Unidades	Art .38 Uso humano y doméstico (Tratamiento convencional) (**Art. 2.2.3.3.9.3.)	Art .39 Uso humano y doméstico (Desinfección) (** Art. 2.2.3.3.9.4)	Art .40 Uso Agrícola (** Art. 2.2.3.3.9.5)	Art .41 Uso Pecuario (** Art. 2.2.3.3.9.6)	Art .42 Uso Recreativo (contacto primario) (** Art. 2.2.3.3.9.7)	Art .43 Uso Recreativo (contacto secundario) (** Art. 2.2.3.3.9.8)	Art .45 Preservación flora y fauna aguas dulces, frías o cálidas (** Art. 2.2.3.3.9.10)
Aluminio	mg/L			5	5			
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,1	0,2			0,1
Berilio	mg/L			0,1				0,1
Boro	mg/L				5			
Cadmio	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,05			0,01
Bario	mg/L	1	1	N.A	N.A	N.A	N.A	0,1
Cloruros	mg/L	250	250	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Cinc	mg/L	15	15	2	25			0,01
Cobalto	mg/L			0,5				
Cobre	mg/L	1	1	0,2	0,5	N.A	N.A	N.A
Coliformes fecales	NMP/100mL	2000				200		

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Parámetro	Unidades	Art .38 Uso humano y doméstico (Tratamiento convencional) (**Art. 2.2.3.3.9.3.)	Art .39 Uso humano y doméstico (Desinfección) (**Art. 2.2.3.3.9.4)	Art .40 Uso Agrícola (**Art. 2.2.3.3.9.5)	Art .41 Uso Pecuario (**Art. 2.2.3.3.9.6)	Art .42 Uso Recreativo (contacto primario) (**Art. 2.2.3.3.9.7)	Art .43 Uso Recreativo (contacto secundario) (**Art. 2.2.3.3.9.8)	Art .45 Preservación flora y fauna aguas dulces, frías o cálidas (**Art. 2.2.3.3.9.10)
Coliformes totales	NMP/100mL	20000				1000	5000	
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	0,05	0,1	1			0,01
Hierro	mg/L			5				0,1
Fenol	mg/L	0,002	0,002	N.A	N.A	0,002	N.A	N.A
Litio	mg/L			2,5				
Manganeso	mg/L			0,2				0,1
Molibdeno	mg/L			0,01				
Nitratos	mg/L	10	10		100*			
Nitritos	mg/L	1	1		10			
Níquel	mg/L			0.2				0,01
pH	unidades	5 a 9	6,5 a 8,5	4,5 a 9		5 a 9	5 a 9	4,5 a 9
Plata	mg/L	0,05	0,05					
Plomo	mg/L	0,05	0,05	5	0,1			0,01
Selenio	mg/L	0,01	0,01	0,02				0,01
Sulfatos	mg/L	400						
Vanadio	mg/L			0,1				
Turbiedad	UJT		10					
Oxígeno disuelto	mg/L	N.A	N.A	N.A	N.A	70% saturación	70% saturación	4 a 5

* Nitratos +Nitritos

** Adoptado por el decreto 1076 del 2015. MADS.

N.A= No aplica

Fuente: Decreto 1594 de 1984. MAVDT citado por el decreto 1076 del 2015. MADS. Adaptado por GessiG S.A.S., 2025

➤ *Diseño de los sistemas de riego por aspersión tipo de las unidades de suelo de interés y aptas para vertimiento*

El vertimiento mediante campos de aspersión es una de las alternativas solicitadas para aprobación de la disposición de las aguas residuales tratadas. Estas zonas de disposición de aguas residuales (ZODAR) corresponderán a áreas dentro o anexas a cada plataforma y facilidad de producción y se localizarán buscando que su ubicación y propiedades físicas de los suelos sean óptimas para realizar este procedimiento.

El establecimiento, caracterización y diseño de las zonas de disposición de aguas residuales (ZODAR) se realizará con base en las actividades previstas dentro del Bloque CPO-5, donde se contempla la construcción y operación de plataformas de explotación. Dentro del área de la locación o áreas de facilidades se encuentran incluidos las ZODAR (localizado) o su respectivo Campo de Aspersión.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

En los ZODAR se realizará la disposición de las aguas residuales no domésticas (industriales) y domésticas resultantes de la operación del proyecto, después del proceso de tratamiento y dando cumplimiento con los parámetros del Artículo 72 del Decreto 1594/84 o la norma que lo modifique o compile que en este caso en el Art. 2.2.3.3.9.14. del decreto 1076 del 2015 (MADS).

La definición de la ubicación exacta de las localizaciones y por consiguiente de los ZODAR, está fuera del alcance del estudio dado que se desconoce la ubicación específica de la infraestructura asociada al proyecto, por lo que es relevante ceñirse a las extensiones destinadas a las ZODAR aquí establecidas, a la zonificación de manejo y a las restricciones descritas a continuación, dando cumplimiento al Artículo 24 del Decreto 3930 de 2010, donde se establecen la prohibición para realizar vertimientos en las siguientes áreas o condiciones:

- En las cabeceras de las fuentes de agua.
- En acuíferos.
- En los cuerpos de agua, destinadas para recreación o usos afines que impliquen contacto primario, que no permita el cumplimiento del criterio de calidad para este uso.
- En un sector aguas arriba de las bocatomas para agua potable, en extensión que determinará, en cada caso, la autoridad ambiental competente.
- En cuerpos de agua que la autoridad ambiental competente declare total o parcialmente protegidos, de acuerdo con los artículos 70 y 137 del Decreto-ley 2811 de 1974.
- En calles, calzadas y canales o sistemas de alcantarillados para aguas lluvias, cuando quiera que existan en forma separada o tengan esta única destinación.
- Que alteren las características existentes en un cuerpo de agua que lo hacen apto para los usos determinados en el artículo 9° del Decreto 3930 de 2010.
- Que ocasionen altos riesgos para la salud o para los recursos hidrobiológicos.

De forma complementaria a las restricciones de La respuesta va en línea con la respuesta planteada en el comentario anterior. descritas por este artículo, se debe restringir la localización de las ZODAR en áreas donde haya una presencia permanente del nivel freático a poca profundidad, entendida esta como menos de 170 cm, medidos desde la superficie, áreas anegables que se encuentren en estado de saturación permanente o con tanta frecuencia que genere dinámicas anaeróbicas en la superficie del suelo (régimen de humedad ácuico) y áreas susceptibles a erosión por efecto del riego, como escarpes o terrenos con evidente tendencia a formación de cárcavas o zonas con pendientes mayores del 12%. De igual manera se deben excluir rondas de cuerpos hídricos, sean estos lenticos o loticos.

En cuanto a restricciones de ubicación en lo referente a cobertura de la tierra, las ZODAR hacen parte de la distribución de áreas solicitada para las locaciones y facilidades de producción, por lo tanto, se ubicarán en cumplimiento de la zonificación de manejo ambiental establecida en la licencia ambiental.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

✓ *Diseños tipo*

Un sistema de aspersión se puede definir como un conjunto de equipos y materiales, configurado con el objeto de distribuir agua asperjada sobre el suelo de forma uniforme, simulando la lluvia.

Cada sistema de riego por aspersión tiene los mismos componentes los cuales son: almacenamiento, automatización, bombeo, filtrado, control y monitoreo, conducción y distribución, aplicación. A continuación, se describe la función y características de cada componente.

- **Almacenamiento:** Consiste en tanques de almacenamiento de aguas residuales tratadas. La capacidad de estos tanques es calculada en función de la capacidad de tratamiento de la planta, jornada de riego u operación, caudal de vertimientos, continuidad o frecuencia de riego de estos y tiempo acumulado de generación de las aguas residuales tratadas, confrontados con la capacidad de retención de agua del suelo y la evapotranspiración de la zona. Este almacenamiento tiene como objeto garantizar un volumen y por consiguiente un caudal (en función de la jornada disponible de operación).
- **Automatización:** Se utilizará un sistema de control tipo ON-OFF con un sensor análogo consistente en un flotador, que censa niveles máximos y mínimos al interior de las piscinas de almacenamiento, al detectar el nivel máximo, éste envía una señal eléctrica al arrancador (contacto) para encender el sistema de bombeo. La cantidad y capacidad de los tanques de almacenamiento se calcula de forma consistente con este esquema de operación, garantizando que aun así se presente un llenado frecuente y no se presentaran encharcamientos, escorrentía superficial ni percolación profunda en el campo de aspersión, siempre y cuando se cumplan los tiempos de riego establecidos en este diseño.
- **Bombeo:** Consiste en una motobomba hidráulica, cuya potencia depende de las características de operación, las cuales son caudal y presión (cabeza hidráulica), su operación la realizara el sistema de automatización antes descrito.
- **Filtrado:** Para garantizar la correcta operación a mediano y largo plazo del sistema de aspersión es necesario realizar un filtrado que minimice las probabilidades de obturación de los emisores, en este caso, los aspersores que realizan la aplicación del agua a través de boquillas con orificios de diámetros que no pasan de los 4 mm. Para tal fin se implementa un sistema de filtrado consistente en un filtro de malla o disco con capacidad máxima de 3 l/s y una capacidad de filtrado de partículas de 200 Mesh³.
- **Control y Monitoreo:** Hace referencia a los componentes del sistema de riego cuya función permite controlar y medir o cuantificar la operación del sistema. Para los sistemas de aspersión aquí propuestos, se contempla el monitoreo de la presión, volumen y caudal, para ello es necesario la instalación de manómetros de glicerina (monitoreo de presión), fluxómetros (monitoreo de caudal) y un contador volumétrico (monitoreo de volumen acumulado), estos dos últimos pueden ser integrados. Como elementos de control se contempla la utilización de válvulas de operación manual cuyo objetivo será bloquear de forma discriminada la totalidad

³ Cantidad de orificios por pulgada cuadrada.

o parte del sistema, bien sea para manejo de incidentes, operarla de forma diferente de acuerdo con las necesidades específicas de campo o para efectos de mantenimiento (lavado o reparación).

- **Conducción y distribución:** Hace referencia al sistema de tuberías y accesorios necesarios para conducir y distribuir las aguas residuales tratadas desde los tanques de almacenamiento hasta los emisores (aspersores), para este sistema de tuberías se utilizara PVC y su instalación podrá ser subterránea o superficial, los diámetros nominales de tubería y RDE se establecen con base en cálculos hidráulicos que son función del caudal, longitud de las tuberías, pérdidas energéticas y presión de operación de los aspersores (Presentadas posteriormente).
- **Emisores:** Hace referencia a los elementos encargados de aplicar el agua al suelo, en este caso serán aspersores, su función es distribuir o asperjar el agua sobre el suelo por medio de gotas pequeñas que simulen una lluvia suave, de forma tal que no produzca erosión y distribuya el agua de forma uniforme evitando encharcamientos o anegamientos puntuales.

Para la selección del sistema de riego, el diseño de este y su ubicación se consideraron los siguientes criterios:

- Generar el mejor aprovechamiento por unidad de área del suelo.
- Generar el mejor aprovechamiento del recurso hídrico.
- Minimizar los potenciales impactos ambientales.
- Optimizar la utilización de infraestructura existente y proyectada.
- Minimización de costos de operación.
- Facilidad y fiabilidad de operación.
- Seguridad y estabilidad del proyecto.

✓ *Conceptos de parámetros utilizados para diseño del sistema de riego*

A continuación, se definen algunos de los parámetros empleados en los cálculos del sistema de riego.

- i. **Densidad aparente del suelo:** La densidad aparente de un suelo es simplemente la relación que existe entre su volumen y su peso seco, siendo la composición y la estructura, los factores que la afectan. La densidad aparente varía según la textura del suelo.
- ii. **Curvas de retención de humedad:** La curva de retención de humedad de cada suelo expresa la relación existente entre la humedad del suelo en un momento dado y la presión de absorción que tiene que ejercer una planta para lograr tomar el agua presente en el suelo, así entre más húmedo este el suelo, las raíces de las plantas tienen que ejercer menor presión de absorción para succionar el agua con respecto a si el suelo está menos húmedo, pues en este caso la raíces tienen que realizar una succión más elevada al suelo

para adquirir el agua. De esta curva para el diseño de los sistemas de riego se necesita saber el punto de marchitez permanente y el punto de capacidad de campo.

- iii. **Humedad de punto de marchitez permanente (qvPMP):** Este es el punto de humedad mínima en el que una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo pues no puede recuperarse de la falta del líquido. En el laboratorio se obtiene al calcular el contenido de agua después de someter un terrón de suelo a una presión de 15 atmósferas de presión.
- iv. **Humedad de punto de capacidad de campo (qvCC):** Este es el contenido de humedad de un suelo el cual fue sometido a saturación y posteriormente fue dejado drenar libremente sin que se viera afectado por más pérdidas como evaporación. En el laboratorio se obtiene al calcular el contenido de agua después de someter un terrón de suelo a una presión de 1/3 de Atmosfera de presión.
- v. **Lámina neta de riego (Ln):** La cantidad de agua que requiere ser aplicada en cada riego se denomina lámina neta y está determinada por cuatro factores: agua útil, criterio de riego, profundidad radicular y densidad aparente del suelo. La lamina neta se define como:

$$i. \quad Ln = \frac{CC - PMP}{100} * Pr * \rho a * Cr$$

CC	=	Humedad en capacidad de campo
PMP	=	Humedad en Punto de marchitez permanente
Pr	=	Profundidad radicular
pa	=	Densidad aparente del suelo
Cr	=	Criterio de riego

- vi. **Agua útil:** Es la diferencia entre dos niveles de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) en que las plantas pueden absorber el agua que requieren. Valores superiores e inferiores a dichos niveles resultan limitantes para el desarrollo de los cultivos. El criterio de riego representa el porcentaje del agua útil que se quiere aportar a través del riego.
La profundidad radicular contemplada en los diseños es de 30 cm debido a que la cobertura vegetal a regar es pasto.
- vii. **Uso consuntivo (Uc):** El uso consuntivo reúne todas las pérdidas de agua de una zona dependiendo de las condiciones climáticas propias. Este se encuentra conformado por el agua que se evapora del suelo, el agua que transpiran las plantas y la que constituye el tejido de las plantas.

$$Uc = Et * Kc$$

Uc	=	Uso consuntivo
Et	=	Evapotranspiración potencial de la zona
Kc	=	Coeficiente de cultivo

El cálculo del uso consuntivo del cultivo se compone del producto entre el coeficiente del cultivo K_c que está relacionado con la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo y que presenta valores para cada cultivo en sus diferentes etapas de desarrollo (para el caso de pasto se tomó el valor de 1.0) y la evapotranspiración potencial propia del suelo relacionada con el clima del lugar (para efectos de cálculo se tomó como 4,46 mm/día que es el promedio multianual de las estaciones más cercanas al Bloque CPO-5).

- viii. **Frecuencia de riego (Fr):** La frecuencia de riego es el tiempo que tarda el suelo en perder la lámina de agua que se aplica por cada ciclo de riego y se define como:

$$Fr = \frac{Ln}{Uc}$$

- ix. **Lámina bruta (Lb):** Se trata de la lámina de agua a aplicar teniendo en cuenta la eficiencia del riego utilizado:

$$Lb = \frac{Ln}{Eficiencia}$$

En el presente diseño se asume una eficiencia de 75 %, por tratarse de riego por aspersión según lo expuesto por Tarjuelo (2005)⁴.

- x. **Intensidad pluviométrica del emisor (Ip):** Corresponde a la tasa de aplicación de agua por aspersores y, depende del caudal del emisor y la separación entre líneas y emisores de aspersión

$$Ip = \frac{Q_{emisor}}{Espaciamiento_{Aspersores} \times Espaciamiento_{Líneas}}$$

Para el presente diseño se toma en consideración que la velocidad de infiltración básica mencionada párrafos atrás, no es superada por la intensidad pluviométrica del aspersor escogido. Por lo anterior, se garantiza que no ocurrirá bajo la operación de riego, escurrimientos superficiales ni encharcamientos, y que el agua asperjada se infiltrará sin generar saturación de la zona radicular, siempre y cuando los tiempos y las frecuencias de riego planteadas en el presente diseño, sean cumplidos y que además se apliquen riegos en épocas de baja precipitación (que agrícolaemente hablando son las épocas en las cuales la evapotranspiración supera la precipitación, no en épocas de invierno, cuando la precipitación supera la evapotranspiración).

- xi. **Tiempo de riego (Tr):** Hace referencia al tiempo que tarda un aspersor en disponer la lámina de agua

⁴ TARJUELO, J., El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa, 2005 – 581 pags.

$$Tr = \frac{Lb}{Ip}$$

Donde:

Tr	=	Tiempo de riego
Lb	=	Lamina bruta de riego
Ip	=	Intensidad Pluviométrica

- xii. **Jornada de riego (Jr):** Este término se utiliza para referirse al tiempo en que una o varias laterales de riego operaran simultáneamente o una a la vez cumpliendo un tiempo de riego al día.

✓ *Escogencia del aspersor*

- Unidades Cartográficas de suelos AVC, RVG y LVJ

Luego de observar diferentes alternativas de utilización de aspersores, sus múltiples campos de aplicación y el tamaño del área dispuesta para la operación, se presenta como alternativa el emisor: Aspersor plástico de impacto 501-U de Boquilla roja de 1,6 mm de la marca NAANDANJAIN, para ser empleado en el diseño de la unidad. Se aclara que, cualquier otro aspersor con las mismas características de presión de trabajo, caudal de operación, diámetro de humedecimiento, separación entre líneas y emisores, y consecuentemente una misma intensidad pluviométrica (señaladas en la **Tabla 4.3-28**), podrá ser empleado sin que tenga que realizarse variaciones tanto en el diseño como en la operación del sistema.

Tabla 4.3-28 Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla roja de 1.6 mm, Marca NAANDANJAIN

Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (l/h)	D (m)
 1.6 Rojo	1.5	100	12.0
	2.0	110	12.0
	2.5	130	12.0
	3.0	150	12.0
	3.5	165	12.5



Fuente: Catálogo aspersores NAANDANJAIN, 2021, modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Unidad Cartográfica de suelos PVB

Luego de observar diferentes alternativas de utilización de aspersores, sus múltiples campos de aplicación y el tamaño del área dispuesta para la operación, se presenta como alternativa el emisor: Aspersor plástico de impacto 501-U de Boquilla roja de 1,6 mm de la marca NAANDANJAIN, para ser empleado en el diseño de la unidad. Se aclara que, cualquier otro aspersor con las mismas características de presión de trabajo, caudal de operación, diámetro de

humedecimiento, separación entre líneas y emisores, y consecuentemente una misma intensidad pluviométrica (señaladas en la **Tabla 4.3-29**), podrá ser empleado sin que tenga que realizarse variaciones tanto en el diseño como en la operación del sistema.

Tabla 4.3-29 Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla roja de 1.6 mm, Marca NAANDANJAIN

501-U Tabla de Rendimiento								
Precipitación (mm/h), Espaciamento (m)								
Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (l/h)	D (m)	Espaciamento (m)				
				6x6	6x7	7x7	7x8	8x8
1.6 Rojo	1.5	100	12.0	2.8	2.4	2.0	1.8	1.6
	2.0	110	12.0	3.1	2.6	2.2	2.0	1.7
	2.5	130	12.0	3.6	3.1	2.7	2.3	2.0
	3.0	150	12.0	4.2	3.6	3.1	2.7	2.3
	3.5	165	12.5	4.6	3.9	3.4	2.9	2.6



Fuente: Catálogo aspersores NAANDANJAIN, 2021, modificado por GessiG S.A.S., 2026

- Unidad Cartográfica de suelos PVA

Luego de observar diferentes alternativas de utilización de aspersores, sus múltiples campos de aplicación y el tamaño del área dispuesta para la operación, se presenta como alternativa el emisor: Aspersor plástico de impacto 501-U de Boquilla amarilla de 2,2 mm de la marca NAANDANJAIN, para ser empleado en el diseño de la unidad. Se aclara que, cualquier otro aspersor con las mismas características de presión de trabajo, caudal de operación, diámetro de humedecimiento, separación entre líneas y emisores, y consecuentemente una misma intensidad pluviométrica (señaladas en la **Tabla 4.3-30**), podrá ser empleado sin que tenga que realizarse variaciones tanto en el diseño como en la operación del sistema.

Tabla 4.3-30 Característica del Aspersor turbo martillo 501 U de boquilla amarilla de 2.2 mm, Marca NAANDANJAIN

501-U Tabla de Rendimiento								
Precipitación (mm/h), Espaciamento (m)								
Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (l/h)	D (m)	Espaciamento (m)				
				6x6	6x7	7x7	7x8	8x8
2.2 Amarillo	1.5	170	13.5	4.7	4.0	3.5	3.0	2.7
	2.0	200	15.0	5.6	4.8	4.1	3.6	3.1
	2.5	215	15.0	6.0	5.1	4.4	3.8	3.4
	3.0	235	15.5	6.5	5.6	4.8	4.2	3.7
	3.5	250	15.5	6.9	6.0	5.1	4.5	3.9

*Boquilla estándar

Código de color - Uniformidad de distribución	CU > 92%	CU 88-92%	CU 85-88%	CU < 85%
---	----------	-----------	-----------	----------



Fuente: Catálogo aspersores NAANDANJAIN, 2021, modificado por GessiG S.A.S., 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

✓ *Diseño hidráulico y Área cubierta por los sistemas de riego*

El dimensionamiento de las tuberías y sus respectivas perdidas se calcularon a partir de la ecuación de Hazen-William, tomando la siguiente ecuación (**Anexo 4.3-1d_Diseños_riego_hira**):

$$F = \frac{10,64 \times Q^{1,852}}{C^{1,852} \times D^{4,871}}$$

Dónde:

F = Pérdida de presión en m.c.a/1m

Q = Flujo m³/s

D = Diámetro interior en m

C = Factor de fricción constante = 150

Para el diseño de la lateral de riego se asumió que esta no tiene inclinación, ósea que es una lateral horizontal, la cual por su condición de horizontalidad tiene que satisfacer la condición de diseño de la siguiente ecuación:

$$F * L \leq 20\% \frac{Pa}{\lambda}$$

Dónde:

F = Pérdida de presión en m.c.a/1m

L = Longitud de la lateral de riego en m

Pa/ λ = Presión de funcionamiento del aspersor seleccionado

Para las líneas principal y secundaria, las pérdidas se calcularon de la misma forma, sin embargo la condición de diseño elegida fue la velocidad a la que el flujo se desplazará en la tubería, teniendo esto, por un lado el flujo no puede ir a menos de 0,5 m/s para evitar sobrediseño en el sistema y para evitar decantamiento de las partículas que van en el agua y así evitar problemas con taponamiento en los accesorios y en la tubería; por otro lado el flujo no puede ir a más de 2,5 m/s para evitar flujo turbulento en el sistema y con esto un aumento exponencial en las pérdidas generadas a lo largo de la tubería. En la **Tabla 4.3-31** se presentan las dimensiones de las tuberías correspondientes a los diseños tipo realizados para cada unidad cartográfica de suelo, adicionalmente se presentan las áreas requeridas de acuerdo con la distribución de los aspersores para cada unidad de suelo apta para implementar riego por aspersión

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Tabla 4.3-31 Dimensionamiento de tuberías y área requerida para los ZODAR tipo por cada unidad cartográfica de suelo

Unidad cartográfica de suelo	Dimensionamiento tuberías		Área requerida para los zodar		
	Diámetro tubería Principal y secundaria	Diámetro tubería lateral de riego	LONGITUD	ANCHO	ÁREA
	[Pulgadas]	[Pulgadas]	[m]	[m]	[ha]
AVC	2	3/4	221	111	2,45
RVG	2	3/4	244	84	2,05
PVB	2	3/4	220	100	2,2
PVA	2	3/4	344	71	2,44
LVJ	2	1/2	228	116	2,64

Fuente: GessiG S.A.S., 2026.

Según lo presentado anteriormente para todas las ZODAR, se requiere de una tubería de conducción o línea principal, la cual se localiza entre la motobomba ubicada junto a la piscina o tanque de almacenamiento de aguas residuales tratadas y el área propiamente determinada como zona de riego, con un diámetro de 2" de PVC, con un RDE 21. La tubería de distribución se compondrá por la línea secundaria y las líneas laterales, ambas de 3/4" de diámetro en los dos casos con RDE 21 y de PVC.

✓ *Condiciones, características y operación del sistema de riego*

La **Tabla 4.3-32** y **Tabla 4.3-33**, relaciona los valores de los parámetros calculados y los aspectos que definen el funcionamiento de los sistemas de riego para el diseño en cada unidad de suelo.

Tabla 4.3-32 Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS AVC, RVG y PVB

Ubicación	Unidades de suelos caracterizadas dentro del Bloque CPO-5		
Unidad de suelo	AVC	RVG	PVB
Muestreo	Cal-Vert-AVC01 – S1	CAL-VERT-RVG05	CAL-VERT-PVB04
Profundidad radicular [cm]	30	30	30
Criterio de riego [%]	20	20	20
Lámina neta de riego [mm]	8,47	11,36	12,41
Lámina bruta de riego [mm]	13,08	19,61	19,61
Modelo aspersor	501-U de boquilla roja de 1.6 mm		
Caudal aspersor [l/hr]	110	110	100
Presión de operación [bar]	2	2	1,5
Intensidad pluviométrica emisor [mm/h]	0,91	1,72	1,56
Diámetro de Humedecimiento [m]	12	12	12
Espaciamento entre aspersores [m]	11	8	8
Espaciamento entre líneas [m]	11	8	8
Número de aspersores por línea	10	10	12
Número total de líneas de riego en el área	20	30	27
Número de líneas por día	10	10	9

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

Ubicación	Unidades de suelos caracterizadas dentro del Bloque CPO-5		
Número de líneas regadas simultáneamente	10	10	9
Frecuencia de riego [días]	2	3	3
Duración de jornada de riego [h]	14,38	11,41	12,55
Duración de operación por la línea de riego [h]	14,38	11,41	12,55
Caudal para disponer durante la jornada de riego [lps]	3	3	3
Volumen diario de agua a disponer [m3]	158,22	125,54	135,58
Área de aspersión rectangular [ha]	2,45	2,05	2,2

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Tabla 4.3-33 Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS PVA y LVJ

Ubicación	Unidades de suelos caracterizadas dentro del Bloque CPO-5	
Unidad de suelo	PVA	LVJ
Muestreo	CAL-VERT-PVA03	CAL-VERT-RVG05
Profundidad radicular [cm]	30	30
Criterio de riego [%]	20	20
Lámina neta de riego [mm]	8,47	11,36
Lámina bruta de riego [mm]	13,08	19,61
Modelo aspersor	501-U de Boquilla amarilla de 2,2 mm	501-U de boquilla roja de 1.6 mm
Caudal aspersor [l/hr]	200	110
Presión de operación [bar]	2	2
Intensidad pluviométrica emisor [mm/h]	0,91	1,72
Diámetro de Humedecimiento [m]	12	12
Espaciamento entre aspersores [m]	11	8
Espaciamento entre líneas [m]	11	8
Número de aspersores por línea	10	14
Número total de líneas de riego en el área	20	28
Número de líneas por día	10	14
Número de líneas regadas simultáneamente	10	7
Frecuencia de riego [días]	2	2
Duración de jornada de riego [h]	14,38	15,2
Duración de operación por la línea de riego [h]	14,38	7,6
Caudal para disponer durante la jornada de riego [lps]	3	3
Volumen diario de agua a disponer [m3]	158,22	164,03
Área de aspersión rectangular [ha]	2,45	2,64

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

En estos diseños la jornada de riego y su respectiva frecuencia han sido calculadas de manera que los aportes realizados al suelo no superan la capacidad de asimilación y retención del campo, es decir, que no generen saturación del suelo y que entre una jornada y la siguiente el nivel de agua útil para la cobertura no desciende a valores críticos ni se presenten saturación del suelo siempre y cuando no se presenten eventos naturales extremos.

✓ *Distribución espacial y operación de los laterales de riego dentro de cada unidad cartográfica de suelos de interés y apta para vertimientos*

- Unidad cartográfica de suelo AVC

El sistema estará compuesto por 200 aspersores que configuran 20 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 11 m. Diariamente diez (10) laterales de riego deben ser puestas en funcionamiento de manera simultánea, de forma tal que estas laterales se rieguen durante 14,38 horas. Cuando las laterales hayan terminado su tiempo de riego, serán apagadas en 14,38 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 10 laterales, esta disposición se realizará en forma cíclica a lo largo del tiempo en que requiera hacer la disposición. La configuración está diseñada para que cada posición de riego vuelva a regarse al tercer día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 2 días. Tal operación efectuará una descarga de 3 l/s. En la **Figura 4.3-22**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

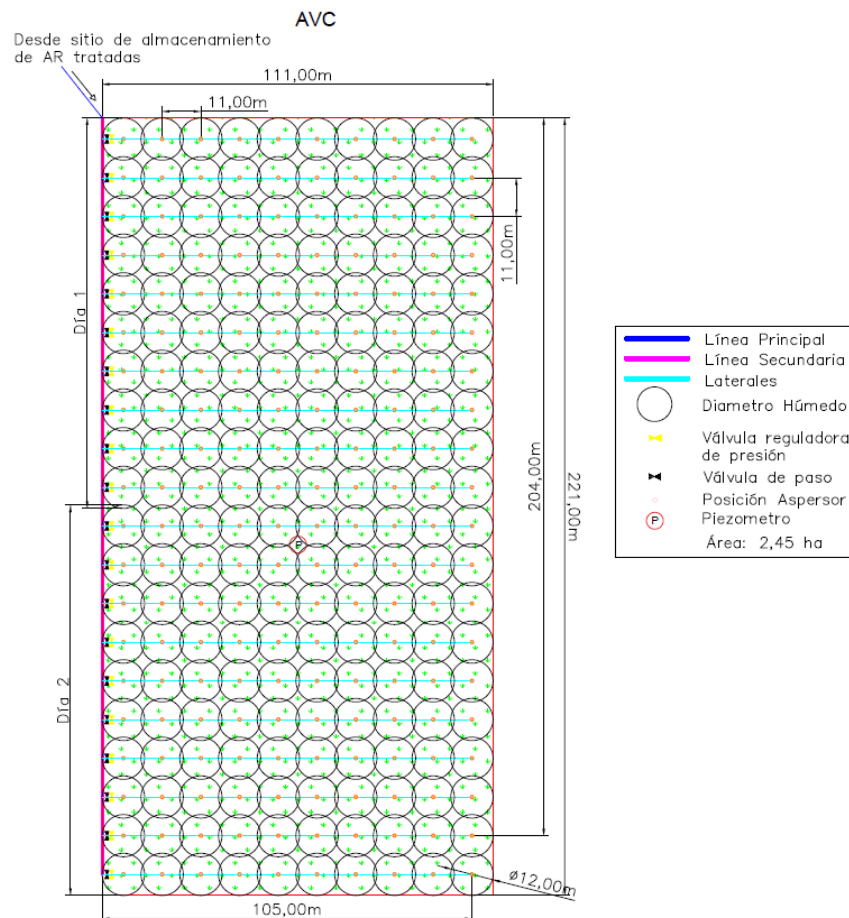


Figura 4.3-22 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo AVC, la cual es de interés y apta para riego

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

- Unidad cartográfica de suelo RVG

El sistema estará compuesto por 300 aspersores que configuran 30 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 8 m. Diariamente diez (10) laterales de riego deben ser puestas en funcionamiento de manera simultánea, de forma tal que estas laterales se rieguen durante 11,41 horas. Cuando las laterales hayan terminado su tiempo de riego, serán apagadas en 11,41 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 10 laterales, esta disposición se realizará en forma cíclica a lo largo del tiempo en que requiera hacer la disposición. La configuración está diseñada para que cada posición de riego vuelva a regarse al cuarto día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 3 días. Tal operación efectuará una descarga de 3 l/s. En la **Figura 4.3-23**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

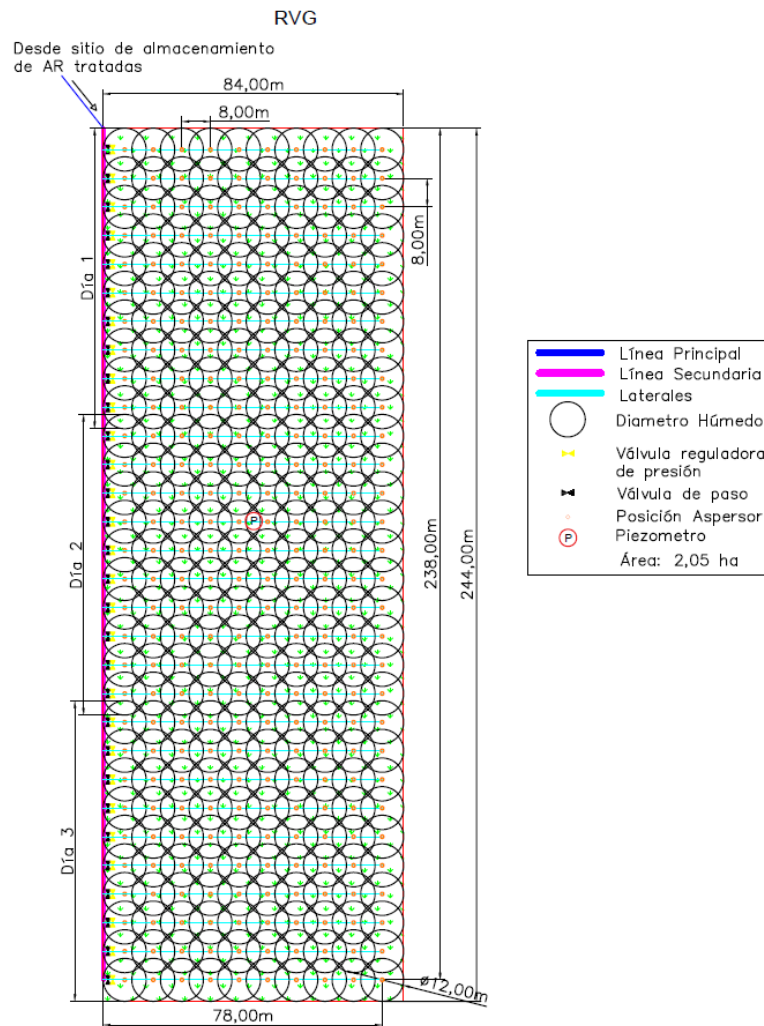


Figura 4.3-23 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo RVG, la cual es de interés y apta para riego

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

- Unidad cartográfica de suelo PVB

El sistema estará compuesto por 324 aspersores que configuran 27 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 8 m. Diariamente nueve (9) laterales de riego deben ser puestas en funcionamiento de manera simultánea, de forma tal que estas laterales se rieguen durante 12,55 horas. Cuando las laterales hayan terminado su tiempo de riego, serán apagadas en 12,55 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 9 laterales, esta disposición se realizará en forma cíclica a lo largo del tiempo en que requiera hacer la disposición. La configuración está diseñada para que cada posición de riego vuelva a regarse al cuarto día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 3 días. Tal operación efectuará una descarga de 3 l/s. En la **Figura 4.3-24**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

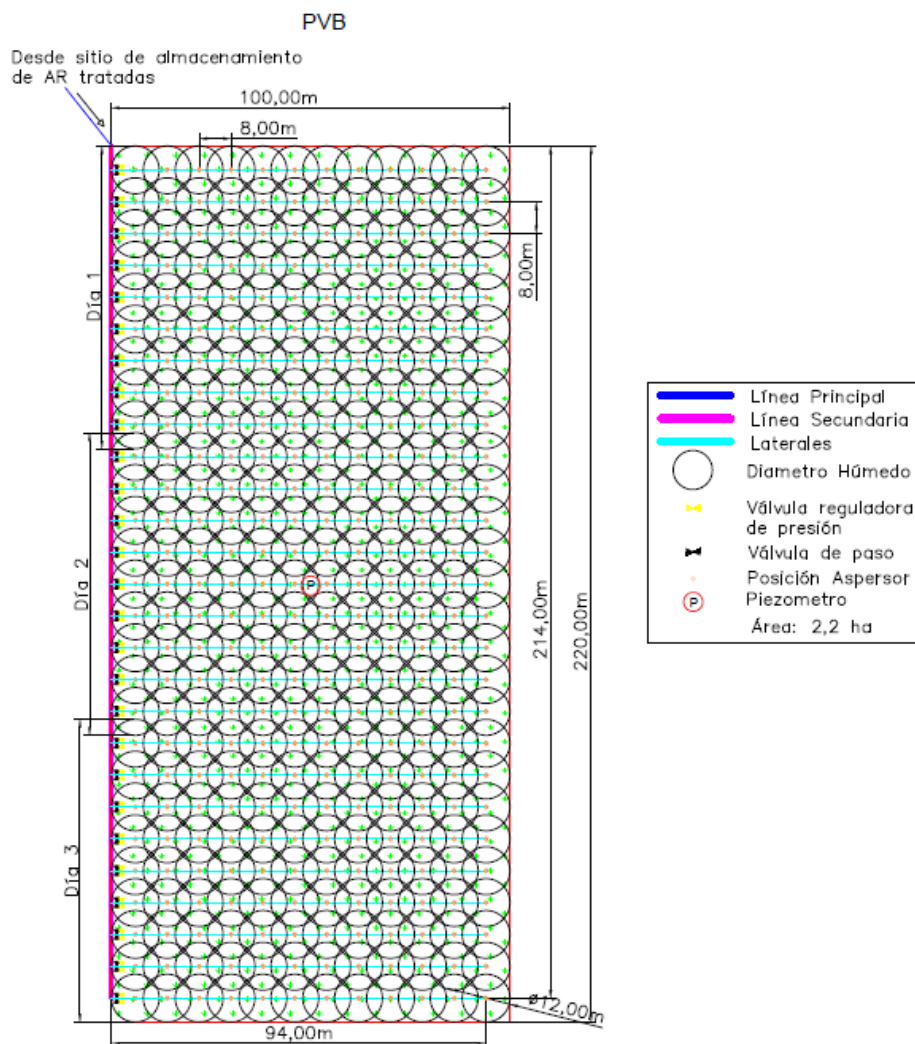


Figura 4.3-24 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PVB, la cual es de interés y apta para riego

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

- Unidad cartográfica de suelo PVA

El sistema estará compuesto por 432 aspersores que configuran 48 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 7 m. Diariamente veinticuatro (24) laterales de riego deben ser puestas en funcionamiento, de forma tal que seis laterales se rieguen de forma simultánea durante 3,2 horas. Cuando las primeras seis laterales hayan terminado su tiempo de riego, serán apagadas y se encenderán las siguientes 6 laterales durante el mismo tiempo de riego, hasta que las 24 laterales se rieguen en 4 turnos en 12,8 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 24 laterales, esta disposición se realizará en forma cíclica a lo largo del tiempo en que requiera hacer la disposición. La configuración está diseñada para que cada posición de riego vuelva a regarse al tercer día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 2 días. Tal operación efectuará una descarga de 3 l/s. En la **Figura 4.3-25**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

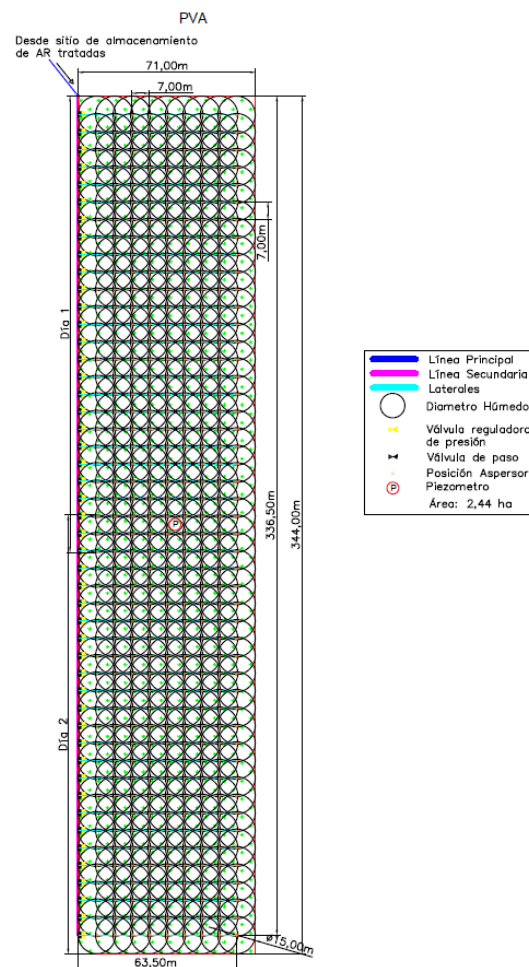


Figura 4.3-25 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PVA, la cual es de interés y apta para riego

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

- Unidad cartográfica de suelo LVJ

El sistema estará compuesto por 392 aspersores que configuran 28 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 8 m. Diariamente catorce (14) laterales de riego deben ser puestas en funcionamiento, de forma tal que siete laterales se rieguen de forma simultánea durante 7,6 horas. Cuando las primeras siete laterales hayan terminado su tiempo de riego, serán apagadas y se encenderán las siguientes 7 laterales durante el mismo tiempo de riego, hasta que las 14 laterales se rieguen en 2 turnos en 15,2 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 14 laterales, esta disposición se realizará en forma cíclica a lo largo del tiempo en que requiera hacer la disposición. La configuración está diseñada para que cada posición de riego vuelva a regarse al tercer día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 2 días. Tal operación efectuará una descarga de 3 l/s. En la **Figura 4.3-26**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

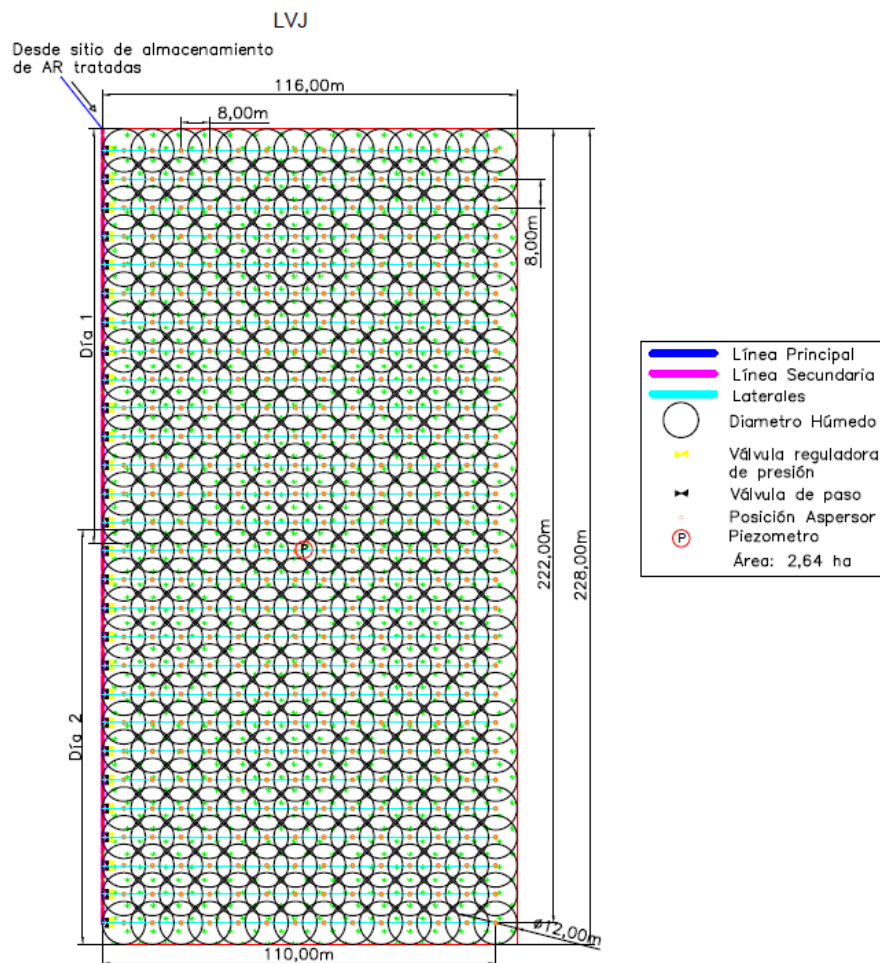


Figura 4.3-26 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo LVJ, la cual es de interés y apta para riego

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

✓ *Componentes y características de los sistemas de riego*

El sistema de riego por aspersión consta de las siguientes partes esenciales:

- **Motobomba de impulsión:** de tipo centrífugo, impulsada por motor diésel o eléctrico. A la salida de la motobomba se debe colocar una válvula tipo cheque para evitar daños en esta.
- **Succión:** se utilizará una manguera de una longitud aproximada de 7 m y 2" de diámetro, acompañada de una válvula de pie.
- **Manómetro, Filtro, válvulas y accesorios:** a lo largo del sistema se emplearán dispositivos para controlar y hacer más eficiente el funcionamiento del sistema. El manómetro es un dispositivo requerido para verificar la presión de operación del sistema. En el caso de las válvulas, se emplean, las válvulas ya nombradas anteriormente, además se utilizarán válvulas de aire o ventosas, de purga y de paso a lo largo del sistema donde se requiera. Para prevenir el taponamiento de los aspersores y garantizar su correcto funcionamiento se hace necesaria la utilización de un filtro de mallas o anillos colocado sobre la tubería después de la bomba. Se requiere también, ubicar tapones removibles al final de las líneas laterales para permitir la limpieza del sistema. Por otro lado, la distribución de flujo de agua a las diferentes secciones del sistema conlleva la utilización de accesorios como codos, tees y acoples.

- Consideraciones generales de manejo del equipo de bombeo

La eficiencia del sistema de bombeo tiene un efecto importante sobre el costo de la energía consumida. Se recomienda determinar la eficiencia del sistema de bombeo periódicamente. El proveedor del equipo se encargará de esta actividad.

Al encendido de la bomba se recomienda:

- Verificar el nivel del tanque para garantizar la succión del equipo de bombeo. La profundidad óptima de bombeo entre la válvula de pie, el fondo del tanque y el espejo de agua se confirmará con el proveedor del equipo.
- Si el nivel es demasiado bajo, es posible que la bomba succione barro del fondo del tanque y obstruya los aspersores y/o los filtros del equipo. Bajo esta condición también se puede presentar el fenómeno de cavitación.
- Se mantendrá el sitio de succión de las bombas lo más profundo posible y libre de basuras para evitar que se descargue la succión.
- Las bombas siempre estarán cebadas (Lleno de agua el tubo de succión). En caso contrario proceda a su llenado eliminando las bolsas de aire del interior.
- Verificar que ningún accesorio del equipo esté abierto o desarmado (válvulas, tapas de filtros, tapones de lavado, entre otros.) antes del encendido.
- Revisar que la válvula de paso del sector a regar se encuentre abierta, y que los aspersores estén debidamente instalados.

Durante la operación del equipo una vez encendida la bomba

- Verificar que la presión que genera la bomba aguas arriba alcance el nivel deseado. Si la presión es baja, el funcionamiento de todo el equipo de riego se perturba, y se pueden generar daños en el interior de la bomba.
- Cuando las tuberías están llenas y la presión baja persiste, es posible que existan elementos en la succión o problemas en la bomba que impidan su correcta operación.
- Una baja presión, también puede ser causada por una fuga en la tubería o en una válvula de aire, luego se hace necesario revisar la operación del sector de riego.
- Si por el contrario se registra una presión alta, es posible que se presente algún problema como que una válvula no abre correctamente, se hace necesario proceder a su revisión en campo; esto también se puede presentar por obstrucción dentro de las tuberías por elementos extraños.

Si mientras el sistema de riego está operando se presentan aumentos del nivel freático hasta llegar a la superficie (Saturación del suelo) se deberá detener inmediatamente la disposición de agua residual tratada hasta que la tabla de agua disminuya.

➤ *Modelación del vertimiento de aguas residuales en el suelo*

Con el fin de estimar la posible contaminación de acuíferos a causa del vertimiento en suelo de aguas residuales tratadas, se modeló el flujo de agua y contaminantes para las cinco (5) unidades de suelo sobre las cuales se solicitará permiso de vertimiento en suelo:

1. Consociación AVC Typic Hapludox, Familia Franco areno arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-AVC01 y S1.
2. Consociación PVA Typic Hapludox, Familia Franco arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-PVA03.
3. Asociación PVB Oxic Dystrudepts (75 %) – Plinthic Petraquepts (25 %), Familias Franca, Mixtas, Isohipertérmicas; Perfil modal: CAL-VERT-PVB04.
4. Consociación RVG Oxic Dystrudepts, Familia Franco arcillosa fina, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-RVG05.
5. Consociación LVJ Typic Dystrudepts, Familia Franco areno arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-LVJ14.

A continuación, se presentan los conceptos más importantes sobre la zona no saturada y la contaminación de suelos, necesarios para la modelación e interpretación del comportamiento del agua residual en las áreas aptas.

- a) **Nivel freático:** es la condición de frontera inferior de la zona no saturada. Usualmente fluctúa, debido a la recarga o descarga del acuífero dependiendo de las condiciones climáticas del área.
- b) **Superficie del suelo como frontera:** la condición de frontera hace referencia a una condición inicial en la superficie del suelo a partir de la cual el modelo desarrolla el flujo en la zona no saturada. Algunos ejemplos son: el contenido de humedad del suelo y las cabezas de presión.
- c) **Zona capilar:** esta zona se ubica inmediatamente sobre el nivel freático y se relaciona con la curva de retención de humedad. El drenaje en esta zona depende de la cantidad de factores como el agua que cae hacia o que asciende desde el acuífero, la relación del contenido de humedad del suelo, y la presión de succión que ejerce el suelo.
- d) **Vulnerabilidad:** representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes o cualquier impacto que recaiga sobre él. Este concepto está relacionado con la capacidad de amortiguación. A mayor capacidad de amortiguación o asimilación, menor vulnerabilidad. El grado de vulnerabilidad de un suelo frente a la contaminación depende de la intensidad de la afectación, del tiempo que transcurre para que los efectos negativos se manifiesten en las propiedades físicas y químicas de un suelo, y de la velocidad con que se producen los cambios secuenciales en las propiedades de los suelos en respuesta al impacto de los contaminantes.
- e) **Poder de amortiguación:** el conjunto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo hacen un factor clave en los ciclos biogeoquímicos superficiales, en los que actúa como un reactor complejo capaz de realizar diversas funciones (filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, etc.).

Por todo ello, el suelo actúa como una barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos. La mayoría de los suelos presentan una elevada capacidad de depuración. Esta capacidad de depuración tiene un límite diferente dependiendo de la situación de riesgo y de las características del suelo. Cuando se alcanza el límite de depuración, el suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como una "fuente" de sustancias peligrosas para los organismos que viven en él y para otros sistemas comunicados con él como el hidrológico.

El grado de contaminación de un suelo no puede ser estimado exclusivamente a partir de los valores totales de los contaminantes frente a determinados valores guía, sino que se hace necesario considerar la biodisponibilidad, movilidad y persistencia (Calvo de Anta, 1997). Por biodisponibilidad se entiende la asimilación del contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo. La movilidad regulará la distribución del contaminante y por tanto su posible transporte a otros sistemas. La persistencia regulará el periodo de actividad de la sustancia.

- f) **Carga crítica:** representa la cantidad máxima de un determinado componente que puede ser aportado a un suelo sin que se produzcan efectos nocivos en él.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

✓ *Descripción del software empleado*

En este estudio se utilizó el software HYDRUS 1D que modela el flujo de agua y transporte de solutos en una dimensión (Simunek, Van Genuchten, & Sejna, 1998) El software HYDRUS 1D está desarrollado en elementos finitos y soluciona numéricamente la ecuación de Richards (1931) para determinar el flujo de agua en medios porosos con contenido de humedad variable, incluyendo la ecuación de advección-dispersión para el flujo de calor y transporte de solutos:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S$$

Dónde:

h es la cabeza de presión [L],

θ es el contenido de humedad volumétrico [L³L⁻³],

t es el tiempo [T],

x es la coordenada espacial [L] (positive hacia arriba),

S es el termino sink [L³L⁻³T⁻¹],

α es el ángulo entre la dirección de flujo y el eje vertical (p.e, $\alpha = 0$ para flujo vertical, 90 para flujo horizontal, and $00 < \alpha < 90$ para flujo inclinado), y

K es función de la conductividad hidráulica para suelos no saturados.

El software HYDRUS 1D, fue utilizado para encontrar el tiempo de viaje a través de la zona no saturada de cuatro posibles contaminantes: cloruros (Cl⁻), los sulfatos (SO₄²⁻) como solutos conservativo y Grasas y aceites e hidrocarburos como solutos reactivos o no conservativos, es decir en el caso de los cloruros y sulfatos serán poco reactivos química y biológicamente, lo que implica que difícilmente se acumulan en el suelo o se transforman en otros componentes o se biodegradan; de esta manera, sus concentraciones son definidas por procesos físicos como la precipitación y la evapotranspiración, mientras que las grasas y aceites e hidrocarburos serán todo lo contrario.

Al no existir pérdidas por adsorción en los suelos o por transformación en procesos biológicos o químicos, las concentraciones originales de las sustancias a evaluar pueden llegar a los depósitos de aguas subterráneas de una región, afectando su calidad rápidamente a corto y mediano plazo. En la simulación se consideró que el flujo de agua es advectivo, que su dirección es vertical y que los contaminantes viajan mezclados con el agua.

El tiempo de viaje indica qué tanto puede residir el contaminante en el suelo, sufrir fenómenos que conlleven a su decaimiento, transformación, acumulación y/o desaparición. Para medir el tiempo de viaje se simuló un evento de infiltración con HYDRUS 1D, a través de la columna del perfil modal por un período de un año, tomado como 1 periodo hidrológico completo.

En la modelación se definió como condición de contorno o borde en la superficie, la precipitación y la evapotranspiración diaria; mientras que la condición de borde al fondo de la columna de suelo fue definida como drenaje libre hacia la zona saturada.

La simulación se hace de manera puntual para una columna de suelo de la cual se conocen las siguientes características por estrato: espesor, material, profundidad de raíces y parámetros de la ecuación de Richards (1931). Estos últimos corresponden a valores teóricos consignados en la base de datos del software, que se obtienen a partir de las características físicas propias de cada estrato u horizonte del suelo (porcentaje de arcilla, arena, limo, densidad aparente, entre otros).

Para la solución de la ecuación de flujo de agua se ha empleado la curva característica de humedad de van Genuchten (1980). Los parámetros de la curva (θ_r , θ_s , α , n ($m = 1-1/n$) y K_s) se han calculado con base en las clases texturales mediante las funciones de edafotransferencia contenidas en el software.

El transporte de solutos se resuelve con un modelo en equilibrio (Simunek et al., 1998) en el que se asume que dichos elementos no sufren fenómenos de adsorción o intercambio catiónico durante su recorrido por el medio poroso. Tal como se mencionó anteriormente, en el presente estudio se modeló el transporte de dos solutos: cloruro y sulfato. La simulación requiere valores de parámetros del suelo que influyen en el transporte de los solutos, e información sobre las propiedades de difusión de los solutos en el agua. Para el caso del presente estudio se utilizaron los datos de densidad aparente relacionados a los perfiles citados anteriormente. También se tuvo en cuenta el coeficiente de difusión molecular en agua que para el cloruro es de 44,4 mm²/d, el sulfato es de 92 mm²/d, las grasas y aceites presenta un valor de 1,73 mm²/d y los hidrocarburos un valor de 52 mm²/d.

Las condiciones de contorno con relación al transporte de solutos fueron definidas así: en el límite superior los solutos sólo entran al suelo a través del agua residual dispuesta más la precipitación, y en el límite inferior se permite el flujo libre de los mismos. Una vez se introducen los parámetros edáficos y las variables climatológicas, el software simula el recorrido de los solutos y/o contaminantes seleccionados en la zona no saturada. El tiempo de recorrido de cada sustancia se conoce como tiempo de viaje del contaminante.

✓ *Condicionantes de la modelación*

Uno de los condicionantes en el uso de software edáficos - hidrológicos es la cantidad de información necesaria para simular la heterogeneidad espacial agrológica de un área. Esta dependencia de los datos de entrada implica que cuando estos son escasos, los resultados obtenidos no son completamente confiables. Al igual otro problema presentado, es asumir una homogeneidad en las propiedades físico-químicas de los suelos para cada unidad de suelo, sin embargo, los suelos de la misma unidad pueden presentar variaciones significativas dependiendo de muchos factores, como pueden ser: los usos que se le han dado puntualmente a los suelos por sectores, la variación y/o fluctuación de los niveles freáticos o acuíferos someros dentro de la misma unidad, la cobertura vegetal implementada en los suelos, entre otros.

El software HYDRUS 1D requiere información de parámetros tales como la profundidad del nivel freático o el espesor de la zona vadosa, el contenido de humedad del suelo, la permeabilidad de los estratos en la zona vadosa y las tasas de recarga. Por consiguiente, si se cuenta con información completa de buena calidad, los resultados obtenidos con el software pueden ayudar

a evaluar la vulnerabilidad de la zona vadosa a la contaminación, y por consiguiente la vulnerabilidad de los recursos subterráneos que reciben flujos de agua desde la zona no saturada.

Según lo expuesto anteriormente, la modelación presentada es una aproximación a las condiciones que se pueden presentar en las zonas puntuales donde se establezcan las ZODAR finales, para el caso de la modelación realizada en las unidades de suelos del Bloque CPO-5, se tomó como línea base para las condiciones edáficas modeladas, las características levantadas en campo para las cinco (5) unidades cartográficas de suelos aptas para recibir vertimiento, con sus respectivas pruebas de infiltración; en cuanto a la información hidrogeológica se adoptó lo presentado en el Capítulo 3.2.7 Hidrogeología del presente estudio, lo cual permite tener la suficiente información como para reducir la incertidumbre de los resultados de las modelaciones y generar resultados acertados que se acerquen de manera congruente a la realidad.

✓ *Calibración del modelo*

La calibración es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros del modelo con el fin de hacer coincidir los resultados de la simulación con los datos medidos en campo y aquellos procesados por el laboratorio (Cante, 2020) En este orden de ideas, el proceso de calibración del modelo consiste en la definición de los parámetros óptimos que describen la representación del fenómeno simulado, considerando como criterio de análisis una función objetivo que permita valorar el nivel de discrepancia entre los valores experimentales observados y los valores simulados.

Para esto, se requiere la asignación o definición de un conjunto de valores iniciales de los parámetros que describen el fenómeno a modelar (Bowie et al., 1985, citado por Cante, 2020). Estos parámetros se obtienen a partir de la solución del problema inverso, en el cual se evalúa el desempeño de una función objetivo, por medio de un proceso iterativo de optimización que usa un método no lineal de mínimos cuadrados Maquardt (1963), citado por (Cante, 2020). Para este proceso se toma como función de análisis el Coeficiente de Error Cuadrático Medio MSE, cuya función se presenta a continuación:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2$$

Donde y_i es el valor observado y $\tilde{y}_i$ es el valor simulado.

La solución de la ecuación de Richard's que emplea el software en la modelación, requieren entre otras cosas especificar las funciones características del suelo de retención de humedad $h(\theta)$ y conductividad hidráulica. Por lo general, dichas curvas y funciones se determinan con base en la experimentación y pueden ser estimadas en forma tabular o algebraica, que para este caso corresponde al modelo de van Genuchten (1980), donde $m=1/1-n$.

$$\theta(h) = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Para lograr obtener los parámetros que describen los modelos algebraicos de las condiciones de flujo: a) contenido de humedad residual (θ_r), b) contenido máximo de humedad del suelo (θ_s), c) m y n: parámetros del modelo de la curva de retención de humedad, para lo cual se emplea un proceso de optimización no lineal.

El proceso se realizó mediante el complemento Solver del software Excel, el cual es una herramienta para resolver y optimizar ecuaciones mediante el uso de métodos numéricos, permitiendo identificar buscar el valor óptimo a partir de una función objetivo. Este software, permite realizar la solución del problema inverso, en el cual es posible obtener el conjunto de parámetros óptimos: a) θ_r : contenido de humedad residual, b) θ_s : contenido máximo de humedad del suelo, c) m y n: parámetros del modelo de la curva de retención de humedad, d) α : parámetro empírico.

Para lograr esta solución se parten de los valores promedio de conductividad hidráulica y retención de agua en el suelo definidos para los 11 grupos texturales mayores del suelo de acuerdo definidos por Rawls y colaboradores, citado por (van Genuchten, Leij, & Yates, 1991). Estos valores permiten determinar valores de retención de humedad (curvas teóricas), las cuales se contrastarán con los resultados obtenidos en el laboratorio (curvas de retención reales), que, para este caso, esas curvas se determinaron a tres (3) presiones diferentes, 0, 33 y 1500 kPa, valores que se presentan en la **Tabla 4.3-34**.

Tabla 4.3-34 Parámetros físicos asociados al flujo del agua del suelo

Perfil	Hte (cm)	Textura	Densidad aparente	0 atm	0,3 atm	15 atm
CAL-VERT-PVB-04	0-8	F	1,45	38,3	29,5	15,9
	8-37	F	1,42	39,4	30,2	15,4
	37-100	F-Ar	1,46	35,4	27,3	14,7
CAL-VERT-PVA-03	0-34	F	1,36	35,3	27,4	14,6
	34-70	F-Ar	1,49	35,6	27,4	13,8
	70-100	F-Ar	1,41	34,5	26,5	14,3
CAL-VERT-RVG-05	0-14	F-Ar	1,42	37,9	29,3	15,8
	14-100	F-Ar-L	1,45	42,7	32,3	19,4
CAL-VERT-LVJ-14	0-12	F-Ar-A	1,78	31,9	20,8	11,2
	12-44	F-Ar-A	1,7	26,3	13,7	7,42
	44-84	F-Ar-A	1,6	12,7	9,06	4,90
	84-100	F-A	1,47	10,4	8,09	3,47
CAL-CAR-AVC- 01	0-14	F-Ar-A	1,15	35,9	25,60	13,90
	14-40	F-Ar-A	1,11	36,5	28,60	15,40
	40-100	F-Ar-A	1,06	36,3	27,30	14,70

Fuente: GessiG SAS, 2026

Los resultados obtenidos arrojan los valores de los parámetros de flujo de agua en el suelo, requeridos por el software Hydrus 1D para la modelación, así como el valor medio del error al cuadrado MSE, estos se presentan en la **Tabla 4.3-35**, donde se observa que para todos los horizontes y perfiles el porcentaje del error es inferior al 1%.

Tabla 4.3-35 Valores optimizados de los parámetros de flujo de agua en el suelo

Perfil	Hte (cm)	ThetaR	ThetaS	Alpha	n	Kd (cm ³ /mg)	Error R2
CAL-VERT-PVB-04	0-8	0	0,38	0,002665	2,22	0,004299	1,08E-12
	8-37	0	0,39	0,002689	2,23	0,004183	5,51E-13
	37-100	0	0,35	0,002638	2,29	0,003023	2,07E-12
CAL-VERT-PVA-03	0-34	0	0,35	0,002613	2,25	0,003642	1,73E-12
	34-70	0	0,36	0,002671	2,21	0,004055	1,12E-12
	70-100	0	0,34	0,002678	2,23	0,003727	7,21E-13
CAL-VERT-RVG-05	0-14	0	0,38	0,002619	2,32	0,002932	1,75E-12
	14-100	0	0,43	0,002741	2,31	0,003301	2,25E-13
CAL-VERT-LVJ-14	0-12	0	0,32	0,003677	2,14	0,003334	1,35E-12
	12-44	0	0,26	0,005625	1,96	0,003731	3,09E-13
	44-84	0	0,13	0,003569	1,81	0,005132	7,18E-13
	84-100	0	0,10	0,002798	1,86	0,004201	3,38E-12
CAL-CAR-AVC- 01	0-14	0	0,36	0,003084	2,25	0,003031	2,94E-13
	14-40	0	0,36	0,002546	2,32	0,002984	2,15E-13
	40-100	0	0,36	0,002781	2,28	0,003105	2,03E-13

Fuente: GessiG SAS, 2026

✓ *Datos climáticos y justificación del periodo de simulación*

Con el propósito de observar el comportamiento del flujo del agua y de los solutos tanto en periodos secos como lluviosos, se escogió un periodo de simulación hidrológica de un año. Los datos de precipitación y evapotranspiración diaria incluidos en HYDRUS 1D son promedios diarios multianuales de 1980 a 2024. Esto permite aminorar la influencia de la variabilidad climática interanual en las series, obteniendo valores representativos de las condiciones climáticas promedio del área del proyecto.

El apartado completo en donde se exponen las microcuencas seleccionadas y los parámetros utilizados para la presente modelación se expusieron en el numeral Análisis de los elementos climáticos de este mismo capítulo. Adicional a esto, se resalta que la información empleada se extrajo de caracterización ambiental presentada en el **Numeral 3.2.9.1 Clima** del presente estudio.

✓ *Resultados de la modelación*

Con HYDRUS 1D se modelaron los flujos de agua y el comportamiento de los solutos cloruros, sulfatos, grasas y aceites e hidrocarburos, para las cinco (5) unidades cartográficas de suelo aptas bajo tres escenarios diferentes (**Anexo 4.3-1e_Memorias_modelo**):

- I. Escenario 1: Considerando únicamente la precipitación (flujo actual) como flujo de agua de entrada al sistema. Este es el escenario natural que se presenta en cada unidad cartográfica de suelo sin realizar vertimiento de aguas residuales tratadas.
- II. Escenario 2: Considerando la precipitación y la lámina de riego (flujo potencial) como flujo neto de entrada al sistema con una operación optima del sistema de tratamiento de aguas

residuales. En este escenario el agua residual doméstica y no doméstica ha sido previamente tratada para cumplir con la normativa Decreto 1594 de 1984 compilado por el Decreto 1076 del 2015. De esta manera, las concentraciones de cloruro en 347 mg/L, sulfato en 34,8 mg/L, grasas y aceites en 0,739 mg/L, e hidrocarburos en 0,337 mg/L en la lámina de riego, que corresponden a los resultados de la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales presentadas en **Anexo 4.3-1h_Caract_AR**.

- III. Escenario 3: Considerando la precipitación y la lámina neta de riego (flujo potencial) como flujo neto de entrada al sistema. Este es un escenario de condiciones extremas en el que el sistema de tratamiento falla y el agua residual dispuesta en el suelo no ha sido previamente tratada. De acuerdo con la caracterización presentada para vertimientos sin tratamiento y consignada en el **Anexo 4.3-1h_Caract_AR**, se adoptaron los siguientes valores para la lámina de riego: cloruro 624 mg/L, sulfatos 246 mg/L, grasas y aceites 15 mg/L, e hidrocarburos 3,25 mg/L.

Cabe mencionar que los valores de concentración de los solutos evaluado corresponden a los resultados de monitoreo del POZO HALCON 1X, que evaluó el agua tratada (escenario 2) y sin tratar (escenario 3) y se presenta en el **Anexo 4.3-1h_Caract_AR**.

Tal como se expuso anteriormente, se espera encontrar las concentraciones de los solutos modelados en contacto con los acuíferos someros o niveles freáticos y contrastarlas con la normatividad legal vigente (**Tabla 4.3-25, Tabla 4.3-26 y Tabla 4.3-27**) para comprobar que no habrá riesgos de contaminación de acuíferos o al ambiente.

Dicha modelación permitió concluir que en todos los escenarios de modelación el flujo de agua es dominado por las condiciones climáticas precipitación y evapotranspiración, las cuales fueron incluidas a nivel diario y con una periodicidad anual. Sólo en los escenarios 2 y 3 existe una entrada de agua y de solutos extra al sistema que es la lámina de riego, cuya magnitud varía para cada unidad de suelo de la siguiente manera:

Dicha modelación permitió concluir que en todos los escenarios de modelación el flujo de agua es dominado por las condiciones climáticas precipitación y evapotranspiración, las cuales fueron incluidas a nivel diario y con una periodicidad anual. Sólo en los escenarios 2 y 3 existe una entrada de agua y de solutos extra al sistema que es la lámina de riego, cuya magnitud varía para cada unidad de suelo de la siguiente manera:

1. Consociación AVC; Perfil modal: CAL-VERT-AVC01 – 8,47 mm/d y frecuencia de aplicación cada 2 días.
2. Consociación PVA; Perfil modal: CAL-VERT-PVA03 – 11,36 mm/d y frecuencia de aplicación cada 3 días.
3. Asociación PVB; Perfil modal: CAL-VERT-PVB04 – 10,44 mm/d y frecuencia de aplicación cada 2 días.

4. Consociación RVG; Perfil modal: CAL-VERT-RVG05 – 12,41 mm/d y frecuencia de aplicación cada 3 días.
5. Consociación LVJ; Perfil modal: CAL-VERT-LVJ14 – 7,91 mm/d y frecuencia de aplicación cada 2 días.

A continuación, se presentan los resultados generados por el modelo, los cuales se dividen en un análisis de tres puntos de observación (N), colocados equidistantemente a lo largo del perfil del suelo, y un análisis del movimiento de los solutos en todo el perfil a través del tiempo.

- Consociación AVC Typic Hapludox, Familia Franco areno arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-AVC01

El perfil modelado para la unidad de suelo AVC es de 1,70 m de profundidad (promedio de la profundidad de los acuíferos someros en la unidad hidrogeológica asociada a la unidad de suelo) tomando las características de los horizontes de suelo de la calicata CAL-VERT-AVC01, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 14 cm (N1), 40 cm (N2) y 170 cm (N3) (**Figura 4.3-27**), que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el **numeral 4.3.3.6**.

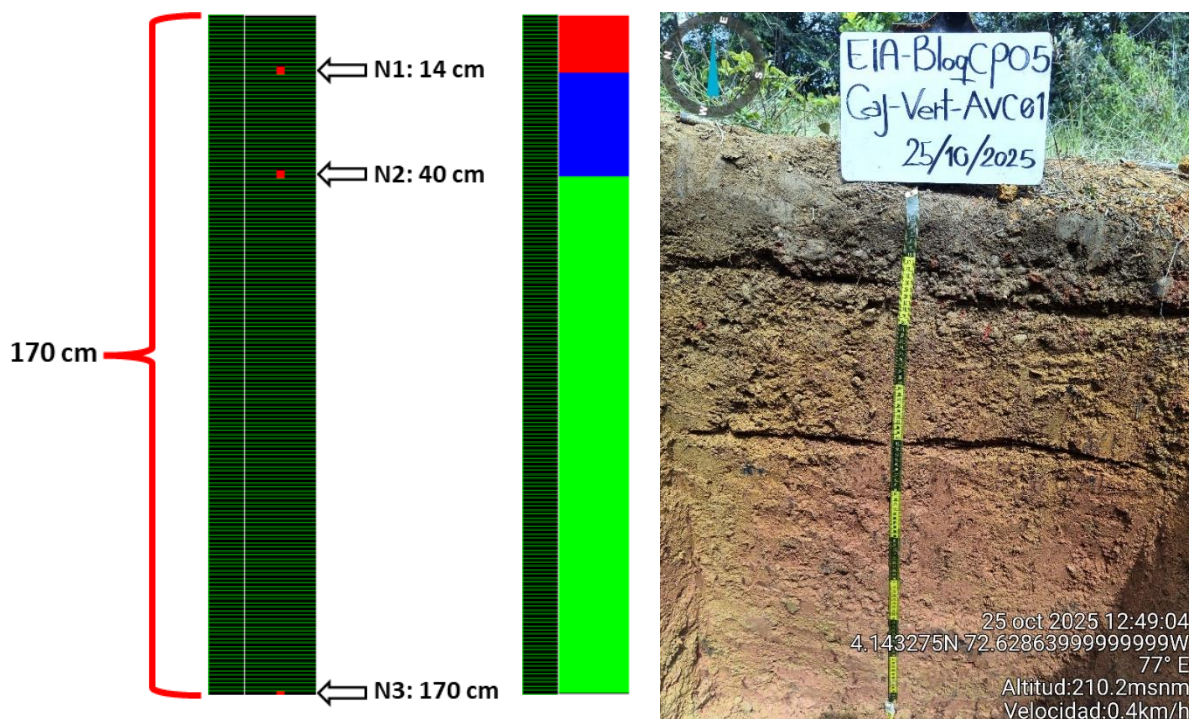


Figura 4.3-27 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-AVC01, Unidad de suelo AVC

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Condiciones naturales:

En la Figura 4-27 se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal CAL-VERT-AVC01 (unidad AVC), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta se puede evidenciar que el flujo del agua en el perfil cambia en función de la profundidad, siendo el N1 donde se evidencia mayormente el efecto de la precipitación, no solo por presentar un mayor flujo, sino porque su variabilidad en el tiempo es más marcada con respecto a los otros dos nodos. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-28**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,04 cm/d en el día 139. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 0,955 y 0,837 cm/d, respectivamente.

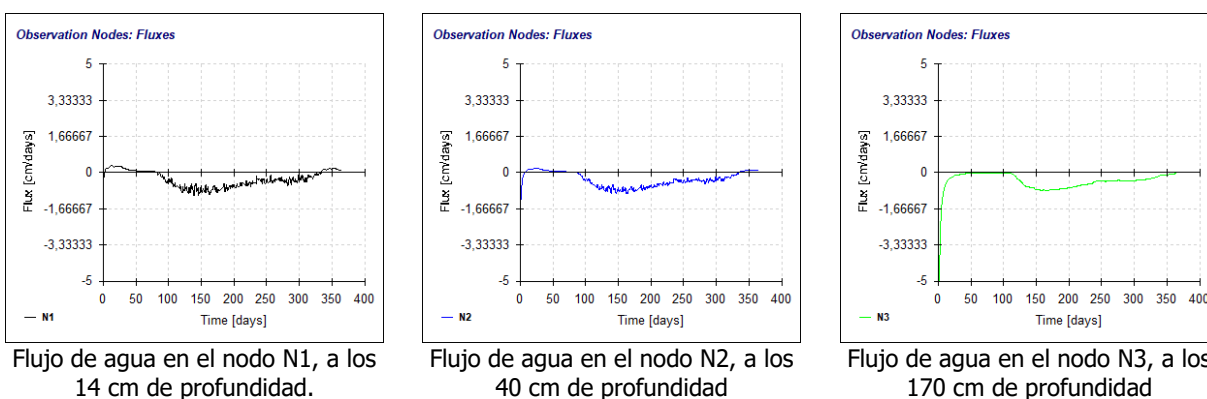


Figura 4.3-28 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo AVC. Escenario 1

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Escenario 2-3:

En la **Figura 4.3-29** se observan los flujos de agua en los nodos de observación, bajo las condiciones de los escenarios dos y tres. Estas modelaciones permiten estimar que pasaría en el perfil modal, si se aplicase la lámina de riego del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. La lámina de riego para la unidad de suelo será de 8,47 cm y se aplicará cada 2 días. Los nodos de observación se mantuvieron a las profundidades definidas en el escenario uno.

En primer lugar, es clara la entrada extra de agua al sistema natural, que corresponde a la lámina de vertimiento de aguas residuales. Bajo las condiciones de riego de los escenarios dos y tres, se esperaría que a los 14 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 1,859 cm/d, que representa un aumento de más de 0,8 cm/d con respecto al escenario 1. Los nodos N2 y N3, también presentan incrementos cercanos a 0,7 cm/d con respecto al escenario anterior, con valores 1,74 y 1,304 cm/d.

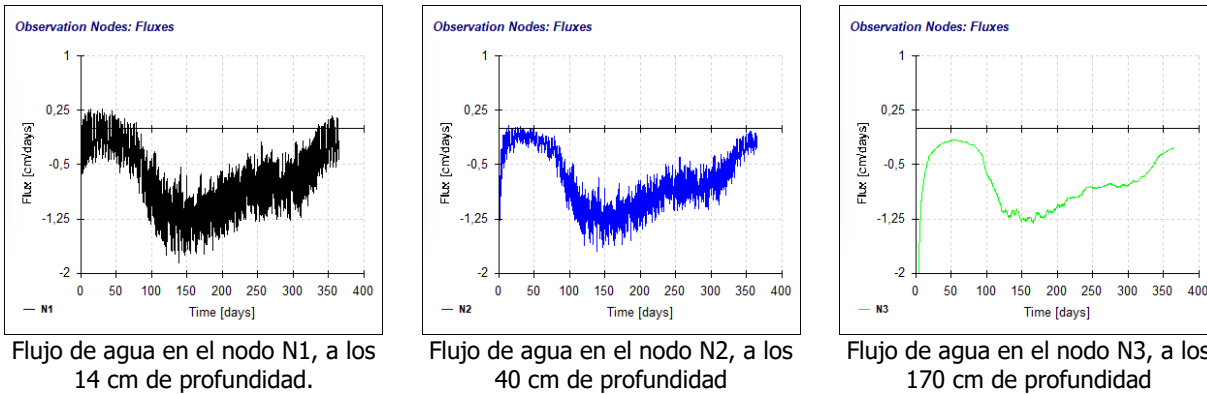


Figura 4.3-29 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo AVC. Escenarios 2 y 3:

Fuente: GessiG SAS, 2026

Escenario 2: Flujo de cloruro (347 mg/L), sulfato (34,8 mg/L), grasas y aceites (0,739 mg/L) e hidrocarburos (0,337 mg/L)

En la **Figura 4.3-30** se presenta la concentración de cloruro en los puntos de control N1, N2 y N3 durante el año modelado, en esta también se incluye la distribución del cloruro en el perfil de suelo para diferentes tiempos, siendo T1 el día 60, T2 el día 120, T3 el día 180, T4 día 240, T5 día 300, y T6 último día del año de modelación (365). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de cloruro de 347 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) las concentraciones del soluto se distribuyen descendientemente hasta los 115 cm. Posterior a esto y a partir del T2, esta se distribuye a lo largo de todo el perfil, en respuesta del aumento de la precipitación para esta época. Para los 170 cm, la concentración mayor ocurre en el T2 con un valor de 0,175 mg/cm³, mientras que en el resto del año, los valores fluctúan entre 0,052 a 0,081 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 49 días para el N1 con un valor de 0,418 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos. Posterior a estos picos, las concentraciones tienen a estabilizarse para los tres nodos en una concentración cercana a 0,1 mg/cm³, con un ligero aumento en los N1 y N2 al finalizar el año, con un valor final de 0,265 mg/cm³.

En la **Figura 4.3-31** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 34,8 mg/L.

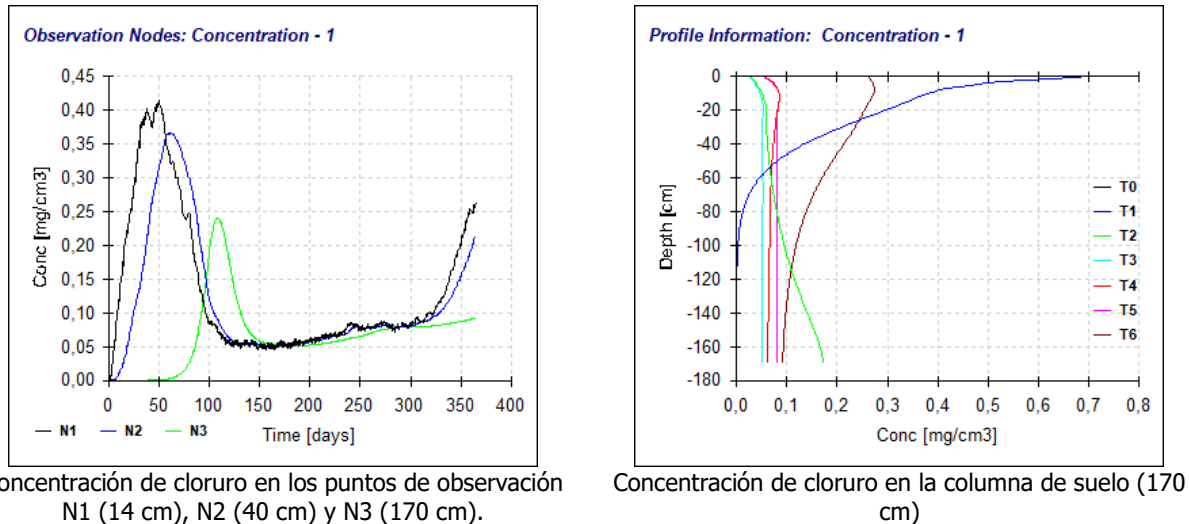


Figura 4.3-30 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

De acuerdo con los resultados obtenidos con HYDRUS 1D, la evolución del perfil de concentración de sulfato sería muy similar a la del cloruro. Es importante mencionar que hasta el T2, las concentraciones del sulfato son irregulares a lo largo del perfil y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos a lo largo de toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,063 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 49 días del inicio del vertimiento con valor de 0,096 mg/cm³, para N2 0,085 mg/cm³ a los 60 días y en N3 0,056 mg/cm³ a los 108 días de modelación.

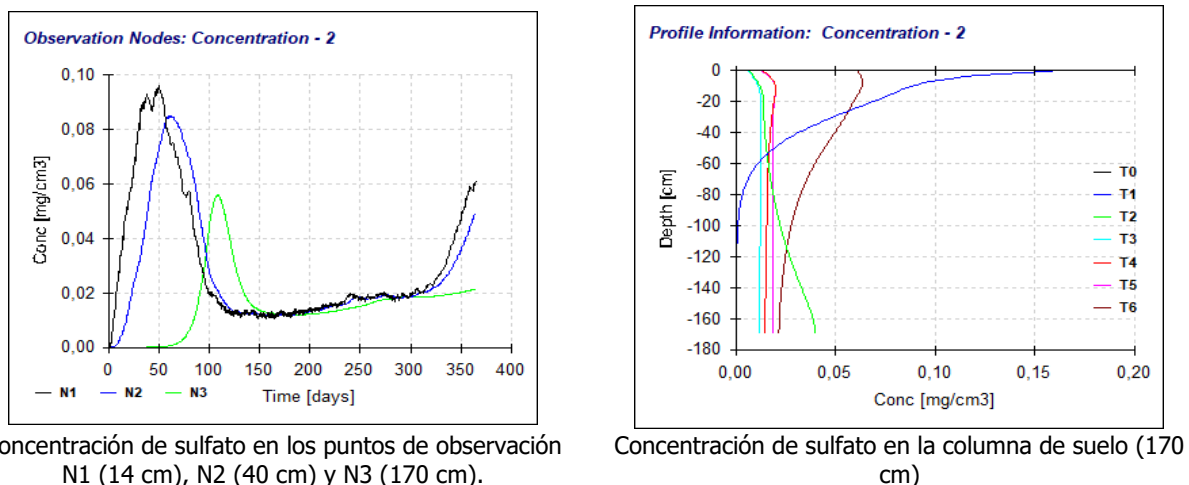


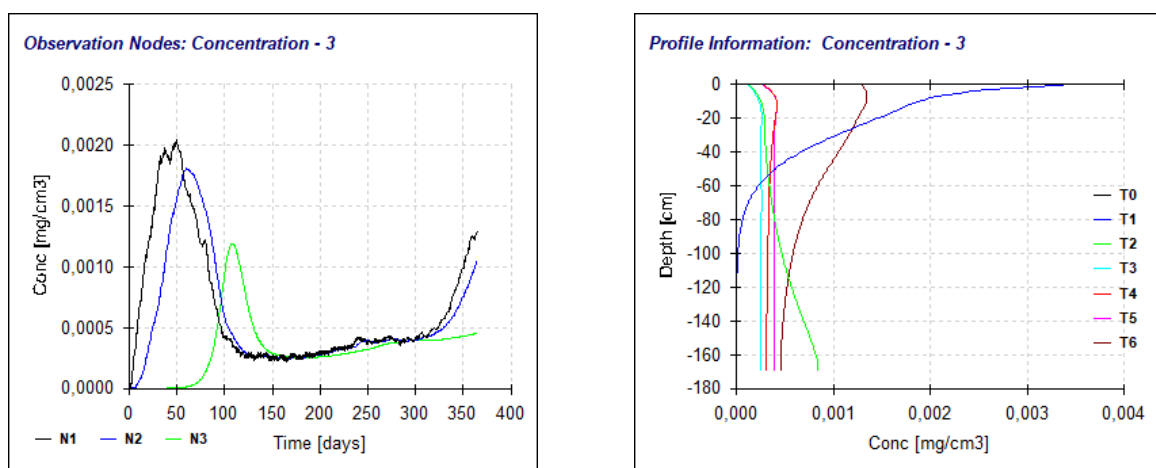
Figura 4.3-31 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-32** se presenta la concentración del grasas y aceites en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de grasas de 0,739 mg/L.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, se evidencia que a partir del T3 (180 días) se alcanza una concentración homogénea a lo largo de todo el perfil. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $1,348 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.

Los resultados evidencian que los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 49 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $2,045 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$, a los 60 días para N2 con una concentración de $1.807 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y a los 108 días de modelación en N3 con un valor de $1,187 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).

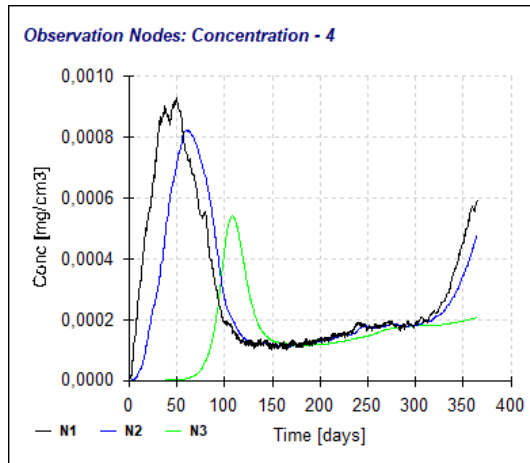
Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-32 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2

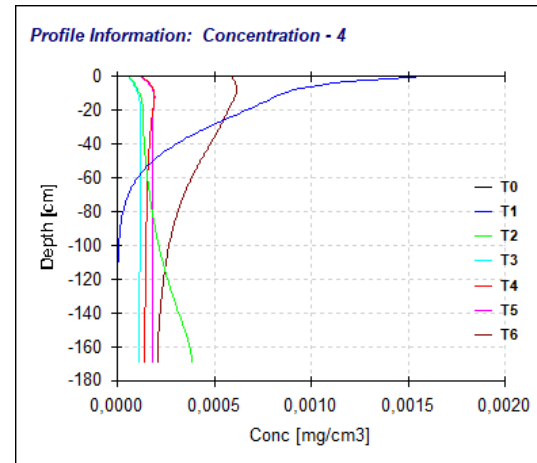
Fuente: GessiG SAS, 2026

La **Figura 4.3-33** presenta la concentración de hidrocarburos en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 170 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de hidrocarburos de 0,337 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones se evidencia la mayor acumulación a los 30 días (T1) en los primeros 5 cm del perfil. Posterior a esto, las concentraciones comienzan a distribuirse a través de todo el perfil donde el soluto se distribuye en todo el perfil a partir del día 180, presentado su mayor concentración los días 49, 60 y 108 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $5,311 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ a los 14 cm (N1), $8,233 \text{ e}^{-4} \text{ mg/cm}^3$ a los 40 cm (N2) y $5,41 \text{ e}^{-4} \text{ mg/cm}^3$ a los 170 cm (N3).



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-33 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

Escenario 3: Flujo de cloruro (24 mg/L), sulfato (246 mg/L), grasas y aceites (15 mg/L) e hidrocarburos (3,25 mg/L)

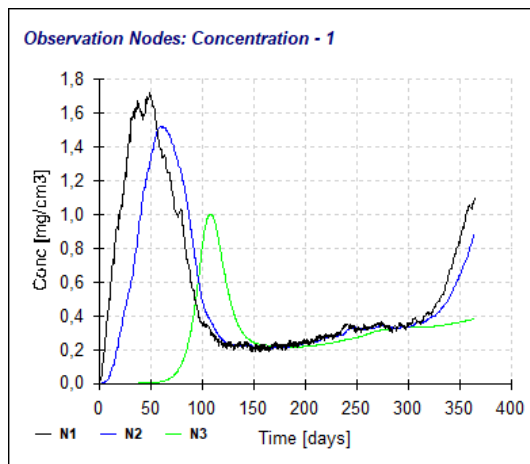
El escenario 3 comprende el análisis del flujo de agua y contaminantes en el suelo en caso de una falla del sistema de tratamiento, lo que implicaría que la disposición de aguas residuales no tratadas. Se espera una concentración de cloruro de 624 mg/L, de sulfato de 246 mg/L, grasas de 15 mg/L e hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-34**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 2,933 mg/cm³ en los primeros 10 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 170 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 120 días de la modelación del orden de 0,7136 mg/cm³.

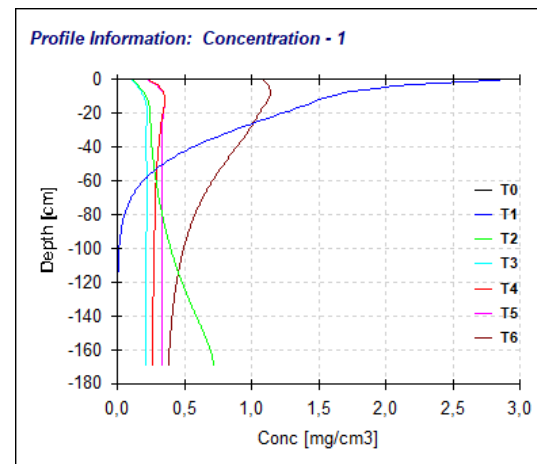
Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 49 días para el N1 con un valor de 1,726 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 1,525 mg/cm³ y el N3 1,002 mg/cm³, en los días 60 y 108, respectivamente.

En la **Figura 4.3-35** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 246 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 1,155 mg/cm³, lo cual ocurre en el T. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,68 mg/cm³, para N2 de 0,60 mg/cm³ y en N3 de 0,395 mg/cm³.



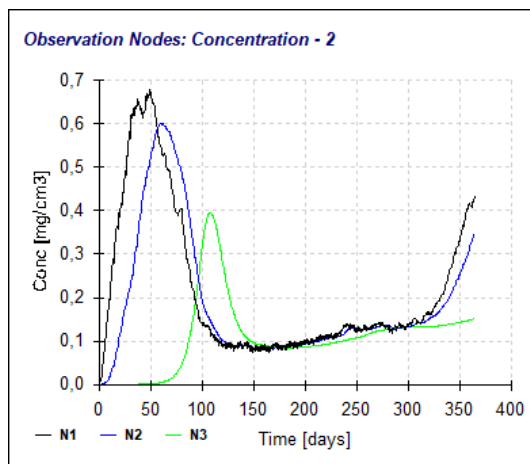
Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).



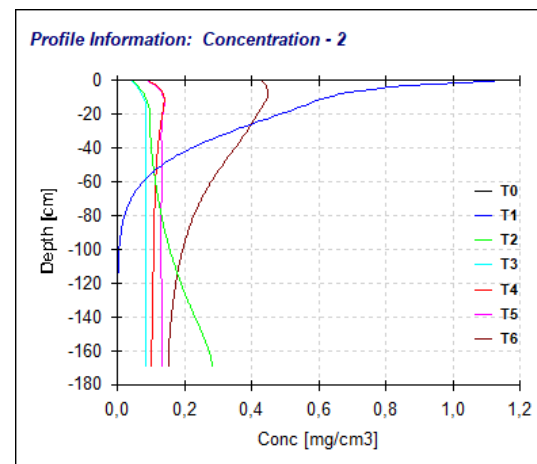
Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-34 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026



Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).



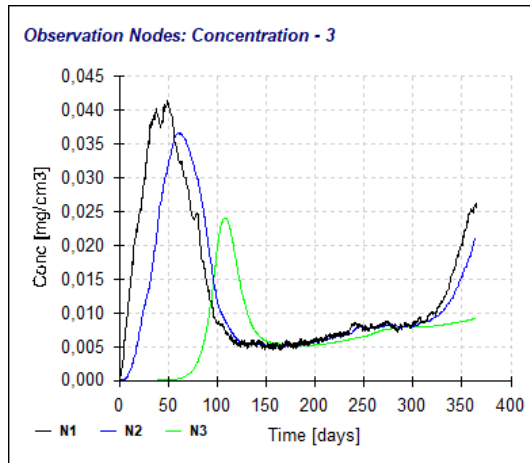
Concentración de sulfato en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-35 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3

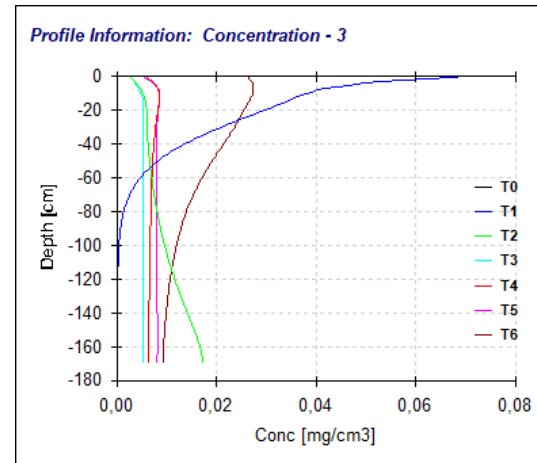
Fuente: GessiG SAS, 2026

Se presenta en la **Figura 4.3-36** la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 15 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de grasas presenten un valor de 0,274 mg/cm³, en los primeros 7 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 0,042 mg/cm³ para N1, un valor de 0,037 mg/cm³ en N2 y 0,024 mg/cm³ para N3.



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).



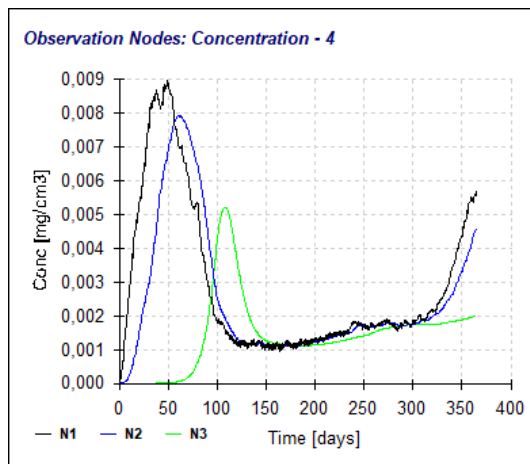
Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-36 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3

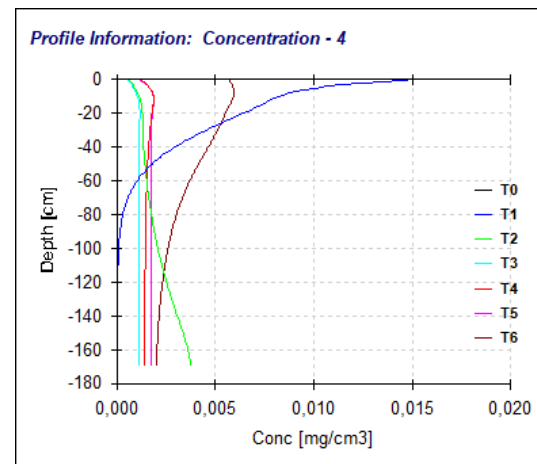
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-37** se enseñan la concentración de hidrocarburos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,015 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 8,99 e⁻³ mg/cm³, para N2 de 7,94 e⁻³ mg/cm³ y en N3 de 5,22 e⁻³ mg/cm³.



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (14 cm), N2 (40 cm) y N3 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-37 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

- Consociación RVG Oxic Dystrudepts, Familia Franco arcillosa fina, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-RVG05.

El perfil modelado para la unidad de suelo RVG es de 1,70 m de profundidad (promedio de la profundidad de los acuíferos someros en la unidad hidrogeológica asociada a la unidad de suelo) tomando las características de los horizontes de suelo de la calicata CAL-VERT-RVG05, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 14 cm (N1), y 170 cm (N2) (**Figura 4.3-38**), que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el **numeral 4.3.3.6**.

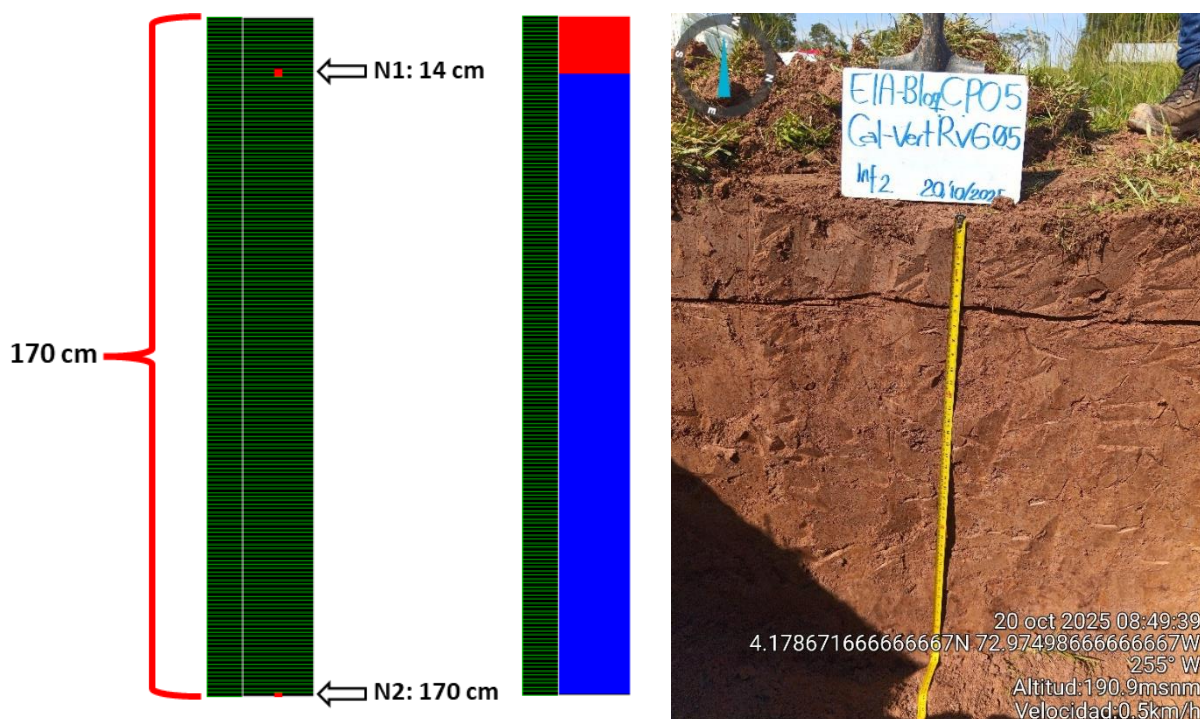


Figura 4.3-38 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-RVG05, Unidad de suelo RVG

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Condiciones naturales:

En la **Figura 4.3-39** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal CAL-VERT-RVG05 (unidad RVG), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta se puede evidenciar que el flujo del agua en el perfil cambia en función de la profundidad, siendo el N1 donde se evidencia mayormente el efecto de la precipitación, no solo por presentar un mayor flujo, sino porque su variabilidad en el tiempo es más marcada con respecto a los otros dos nodos. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-39**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,03 cm/d en el día 146. En cuanto al nodo N2 el valor máximo reportado es de 0,812 cm/d.

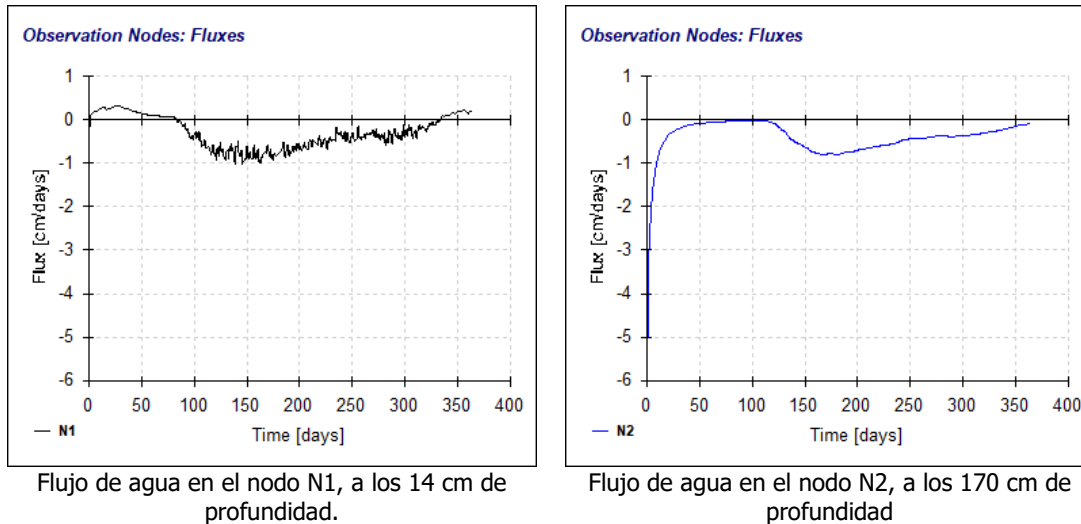


Figura 4.3-39 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RVG. Escenario 1

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Escenario 2-3:

En la **Figura 4.3-40** se observan los flujos de agua en los nodos de observación, bajo las condiciones de los escenarios dos y tres. Estas modelaciones permiten estimar que pasaría en el perfil modal, si se aplicase la lámina de riego del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. La lámina de riego para la unidad de suelo RVG será de 1,136 cm y se aplicará cada 3 días. Los nodos de observación se mantuvieron a las profundidades definidas en el escenario uno.

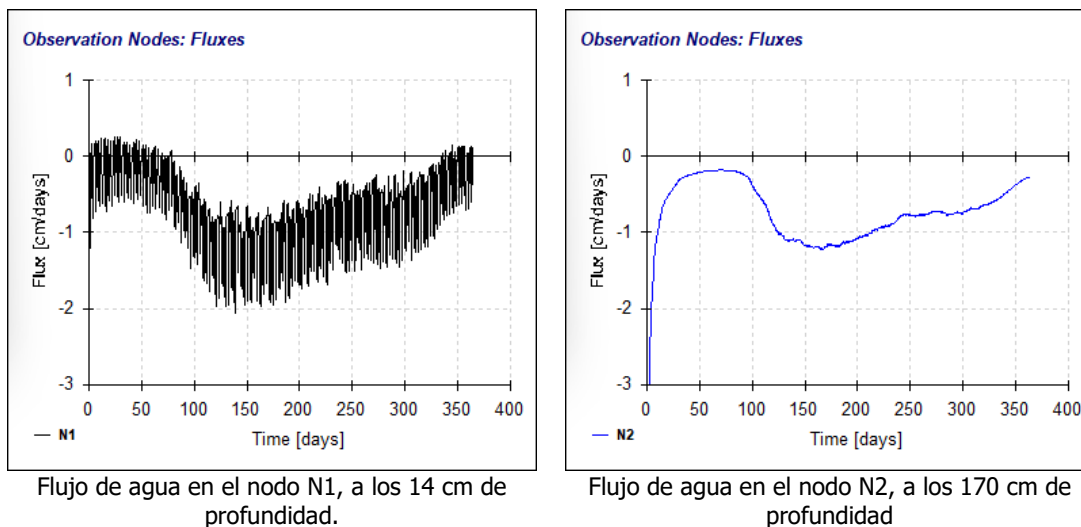


Figura 4.3-40 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RVG. Escenarios 2 y 3:

Fuente: GessiG SAS, 2026

En primer lugar, es clara la entrada extra de agua al sistema natural, que corresponde a la lámina de vertimiento de aguas residuales. Bajo las condiciones de riego de los escenarios dos y tres, se esperaría que a los 14 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 2,069 cm/d, que representa un aumento de más de 1 cm/d con respecto al escenario 1. El nodo N2, también presenta incremento cercano a 0,4 cm/d con respecto al escenario anterior, con valor de 1,222 cm/d.

Escenario 2: Flujo de cloruro (347 mg/L), sulfato (34,8 mg/L), grasas y aceites (0,739 mg/L) e hidrocarburos (0,337 mg/L)

En la **Figura 4.3-41** se presenta la concentración de cloruro en los puntos de control N1, N2 y N3 durante el año modelado, en esta también se incluye la distribución del cloruro en el perfil de suelo para diferentes tiempos, siendo T1 el día 60, T2 el día 120, T3 el día 180, T4 día 240, T5 día 300, y T6 último día del año de modelación (365). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de cloruro de 347 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) las concentraciones del soluto se distribuyen descendientemente hasta los 80 cm. Posterior a esto y a partir del T2, esta se distribuye a lo largo de todo el perfil, en respuesta del aumento de la precipitación para esta época. Para los 170 cm, la concentración mayor ocurre en el T2 con un valor de 0,137 mg/cm³, mientras que en el resto del año.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 49 días para el N1 con un valor de 0,363 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima el otro nodo. Posterior a estos picos, las concentraciones tienen a estabilizarse para los dos nodos en una concentración cercana a 010 mg/cm³, con un ligero aumento en el N1 al finalizar el año, con un valor final de 0,245 mg/cm³.

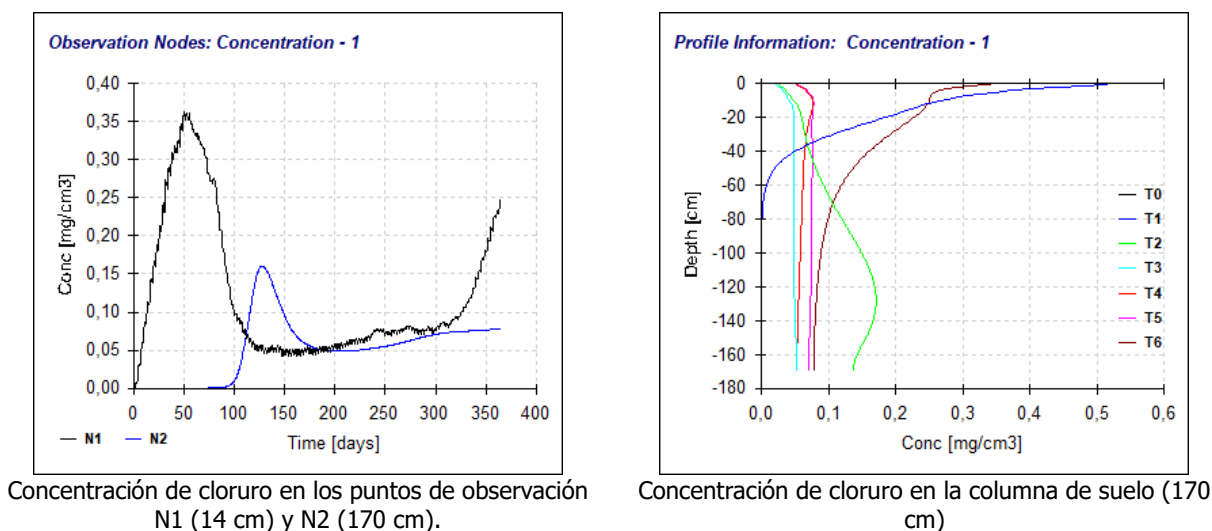


Figura 4.3-41 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-42** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 34,8 mg/L.

De acuerdo con los resultados obtenidos con HYDRUS 1D, la evolución del perfil de concentración de sulfato sería muy similar a la del cloruro. Es importante mencionar que hasta el tiempo 2, las concentraciones del sulfato son irregulares a lo largo del perfil y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos a lo largo de toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,082 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 49 días del inicio del vertimiento con valor de 0,084 mg/cm³ y para N2 0,037 mg/cm³ a los 127 días de modelación.

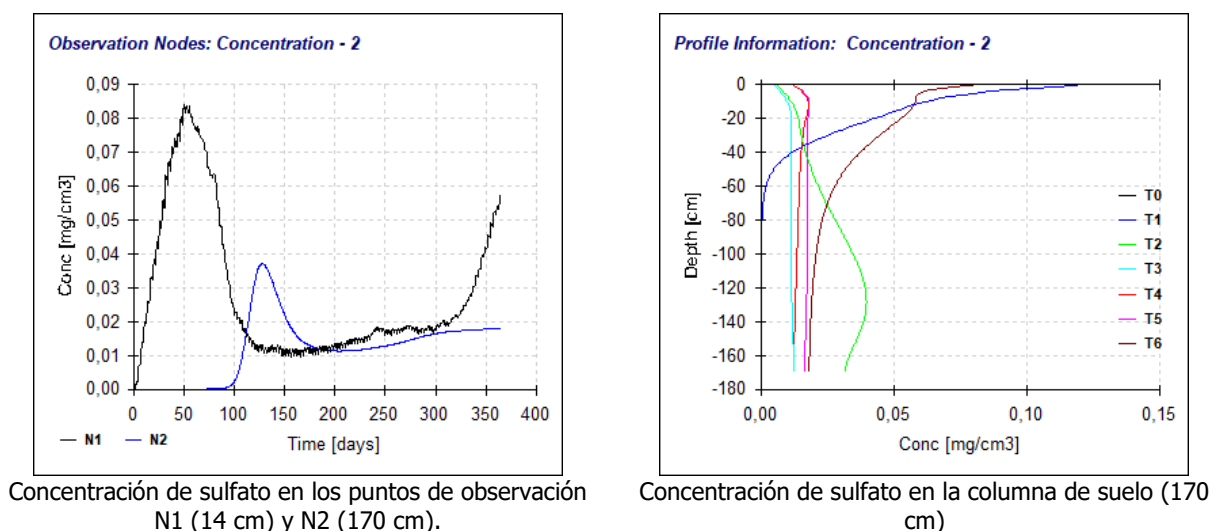
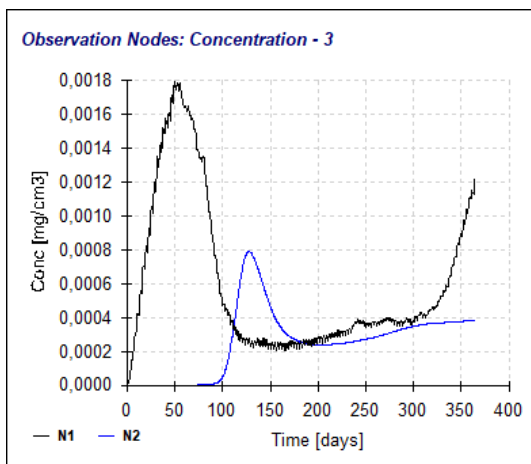


Figura 4.3-42 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2

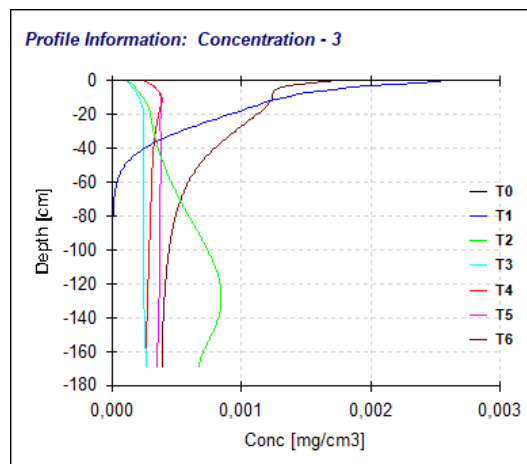
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-43** se presenta la concentración del grasas y aceites en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de grasas de 0,739 mg/L. De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, se evidencia que a partir del T2 (120 días) se alcanza una concentración homogénea a lo largo de todo el perfil. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 1,75 e⁻³ mg/cm³.

Los resultados evidencian que los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 49 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,79 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y a los 127 días para N2 con una concentración de $7,89 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$.



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (14 cm) y N2 (170 cm).

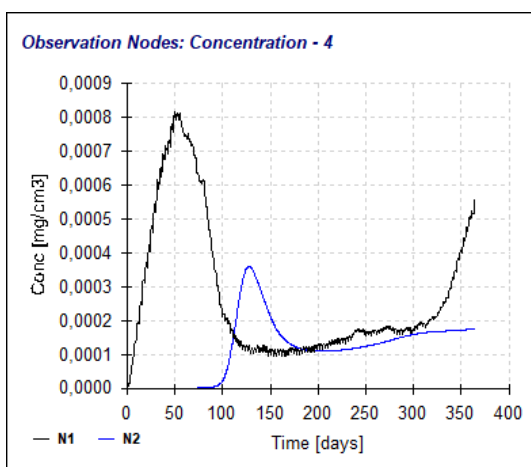


Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

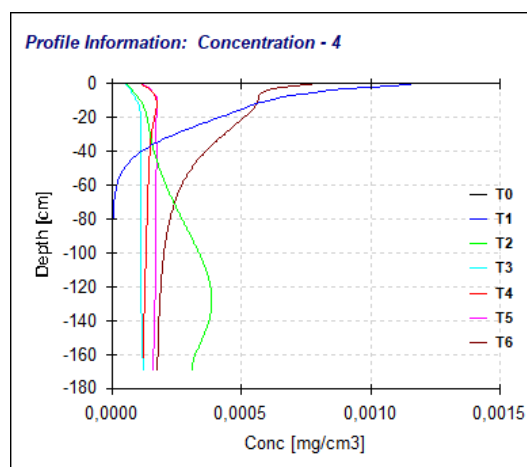
Figura 4.3-43 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

La **Figura 4.3-44** presenta la concentración de hidrocarburos en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 170 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de hidrocarburos de 0,337 mg/L.



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (14 cm) y N2 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-44 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

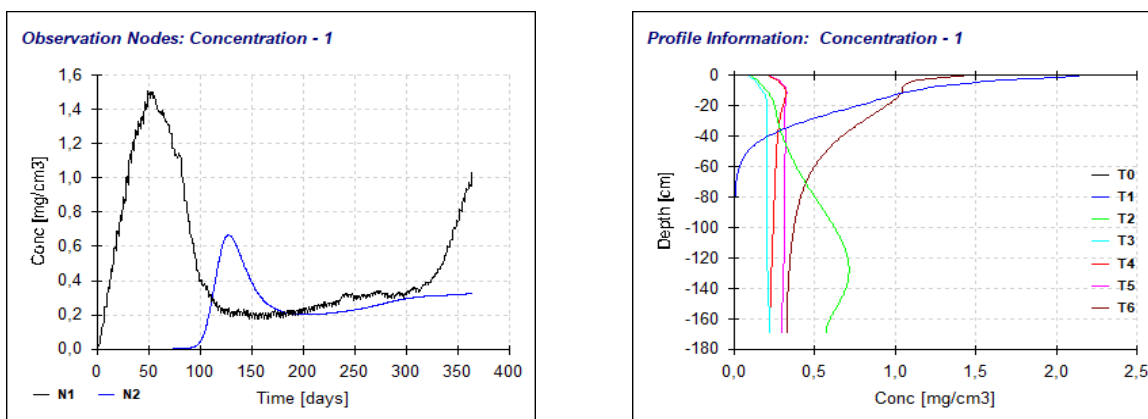
De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T) en los primeros 10 cm del perfil. Posterior a esto, las concentraciones comienzan a distribuirse a través de todo el perfil donde el soluto se distribuye en todo el perfil a partir del día 120, presentado su mayor concentración los días 49 y 127 en los nodos N1 y N2, respectivamente, con concentraciones de $8,16 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ (N1) y $3,59 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^3$ (N2).

Escenario 3: Flujo de cloruro (24 mg/L), sulfato (246 mg/L), grasas y aceites (15 mg/L) e hidrocarburos (3,25 mg/L)

El escenario 3 comprende el análisis del flujo de agua y contaminantes en el suelo en caso de una falla del sistema de tratamiento, lo que implicaría que la disposición de aguas residuales no tratadas. Se espera una concentración de cloruro de 624 mg/L, de sulfato de 246 mg/L, grasas de 15 mg/L e hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-45**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de $2,189 \text{ mg/cm}^3$ en los primeros 10 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 170 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 120 días de la modelación del orden de $0,569 \text{ mg/cm}^3$.

Las concentraciones máximas de cloruro para los dos nodos se registran a los 49 días para el N1 con un valor de $1,511 \text{ mg/cm}^3$ y el N2 reporta un valor de $0,666 \text{ mg/cm}^3$ en el día 127.



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (14 cm) y N2 (170 cm).

Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-45 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-46** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 246 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $0,86 \text{ mg/cm}^3$, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de $0,594 \text{ mg/cm}^3$ y para N2 de $0,262 \text{ mg/cm}^3$.

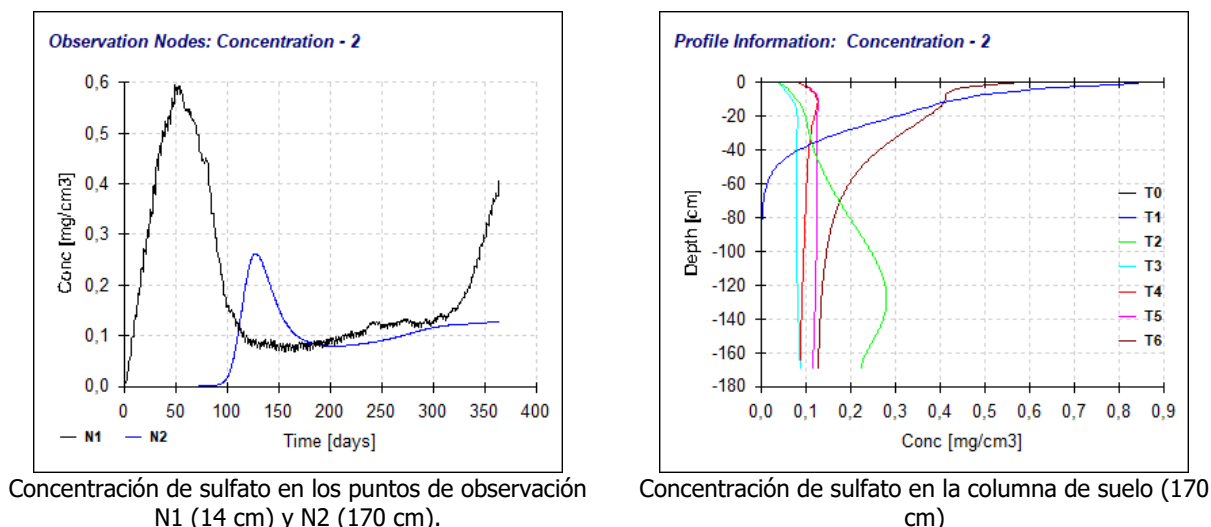


Figura 4.3-46 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3

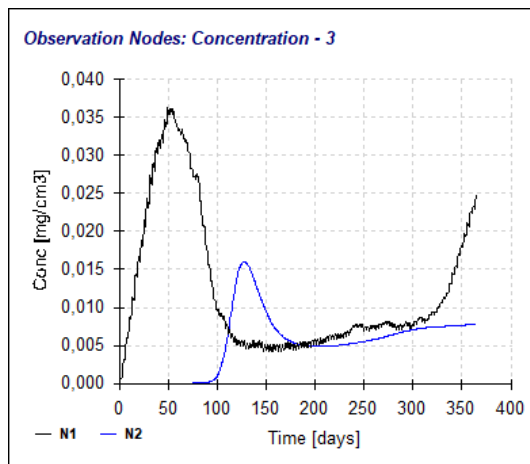
Fuente: GessiG SAS, 2026

Se presenta en la **Figura 4.3-47** la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 15 mg/L .

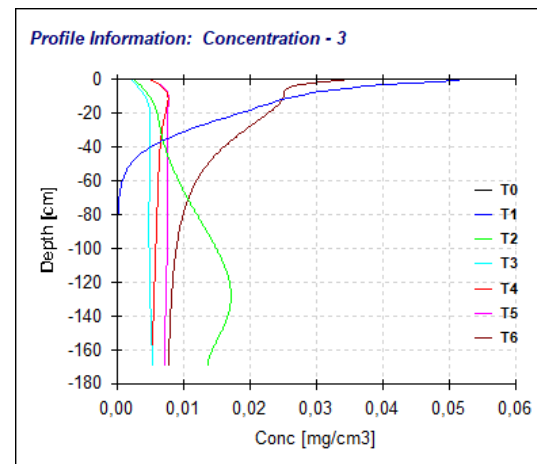
Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de grasas presenten un valor de $0,035 \text{ mg/cm}^3$, en los primeros 5 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a $0,036 \text{ mg/cm}^3$ para N1 y un valor de $0,016 \text{ mg/cm}^3$ en N2.

En la **Figura 4.3-48** se enseñan la concentración de hidrocarburos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de hidrocarburos de $3,25 \text{ mg/L}$.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $0,011 \text{ mg/cm}^3$, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de $7,866 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y para N2 de $3,47 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.



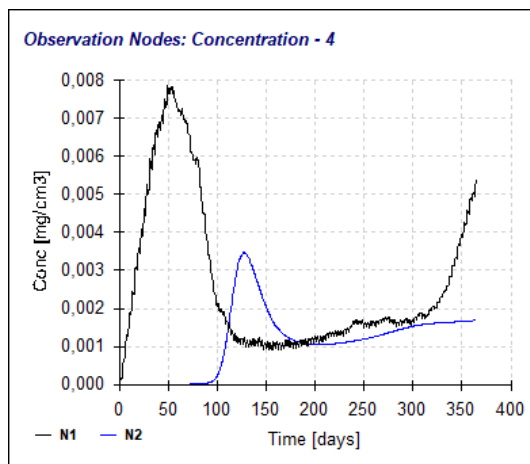
Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (14 cm) y N2 (170 cm).



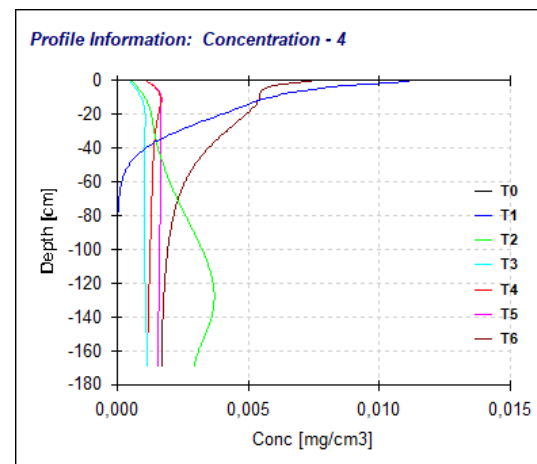
Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-47 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (14 cm) y N2 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-48 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

- Consociación PVA Typic Hapludox, Familia Franco arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-PVA03.

El perfil modelado para la unidad de suelo PVA es de 1,70 m de profundidad (promedio de la profundidad de los acuíferos someros en la unidad hidrogeológica asociada a la unidad de suelo) tomando las características de los horizontes de suelo de la calicata CAL-VERT-PVA03, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 34 cm (N1), 70 cm (N2) y 170 cm (N3) (**Figura 4.3-49**), que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el **numeral 4.3.3.6**.

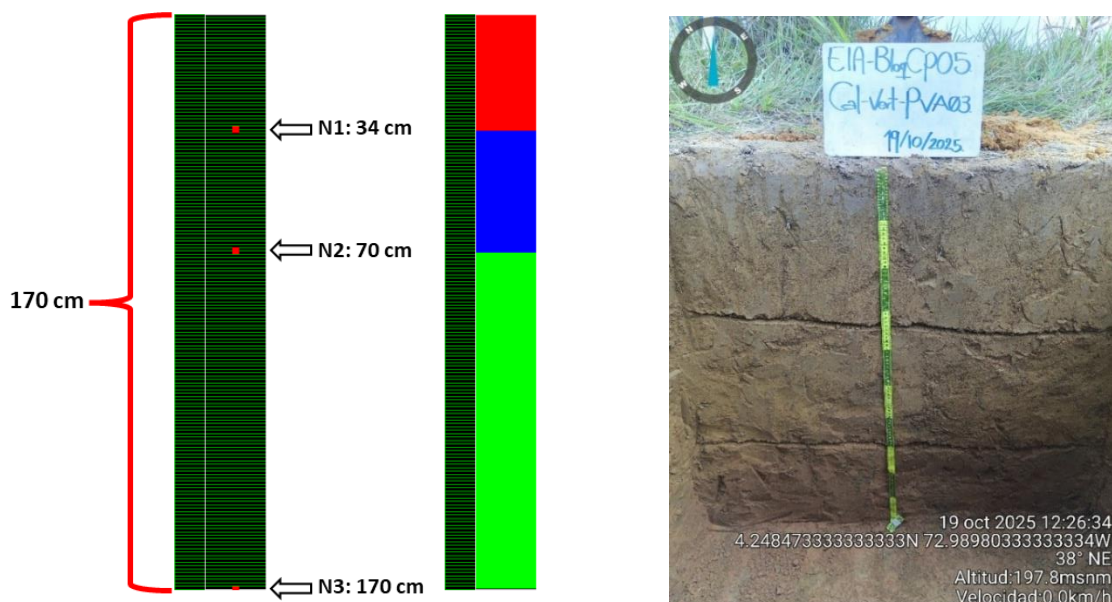


Figura 4.3-49 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-PVA03, Unidad de suelo PVA

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Condiciones naturales:

En la **Figura 4.3-50** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal CAL-VERT-PVA03 (unidad PVA), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta se puede evidenciar que el flujo del agua en el perfil cambia en función de la profundidad, siendo el N1 donde se evidencia mayormente el efecto de la precipitación, no solo por presentar un mayor flujo, sino porque su variabilidad en el tiempo es más marcada con respecto a los otros dos nodos. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-50**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 0,964 cm/d en el día 139. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 0,914 y 0,832 cm/d, respectivamente.

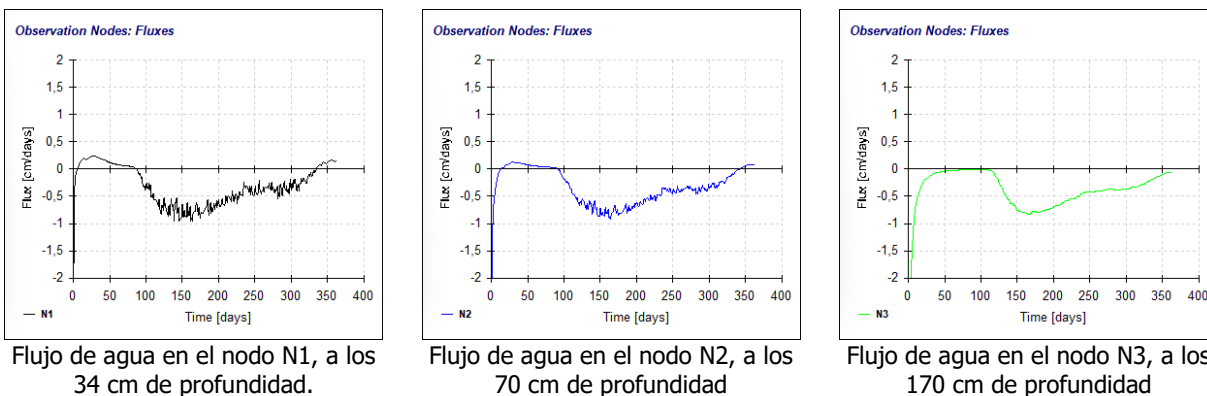


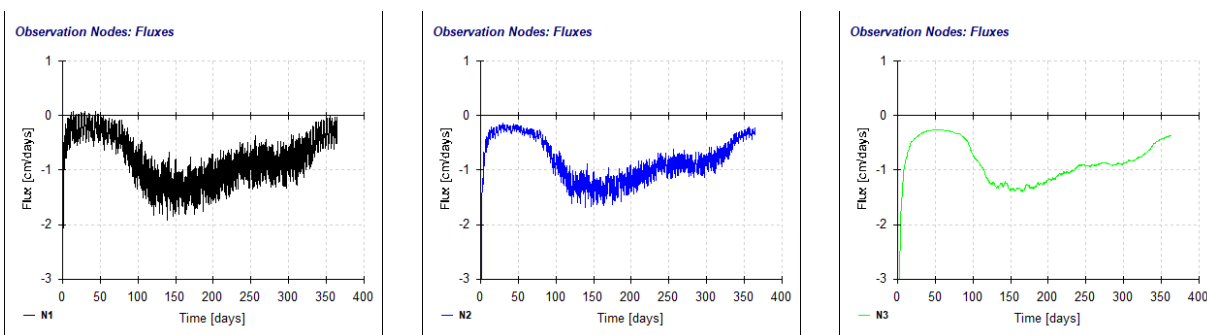
Figura 4.3-50 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVA. Escenario 1

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Escenario 2-3:

En la **Figura 4.3-51** se observan los flujos de agua en los nodos de observación, bajo las condiciones de los escenarios dos y tres. Estas modelaciones permiten estimar que pasaría en el perfil modal, si se aplicase la lámina de riego del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. La lámina de riego para la unidad de suelo 1,044 será de cm y se aplicará cada 2 días. Los nodos de observación se mantuvieron a las profundidades definidas en el escenario uno.

En primer lugar, es clara la entrada extra de agua al sistema natural, que corresponde a la lámina de vertimiento de aguas residuales. Bajo las condiciones de riego de los escenarios dos y tres, se esperaría que a los 34 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 1,20 cm/d, que representa un aumento de más de 1 cm/d con respecto al escenario 1. Los nodos N2 y N3, también presentan incrementos cercanos a 0,6 cm/d con respecto al escenario anterior, con valores 1,69 y 1,40 cm/d.



Flujo de agua en el nodo N1, a los 34 cm de profundidad.

Flujo de agua en el nodo N2, a los 70 cm de profundidad

Flujo de agua en el nodo N3, a los 170 cm de profundidad

Figura 4.3-51 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVA. Escenarios 2 y 3:

Fuente: GessiG SAS, 2026

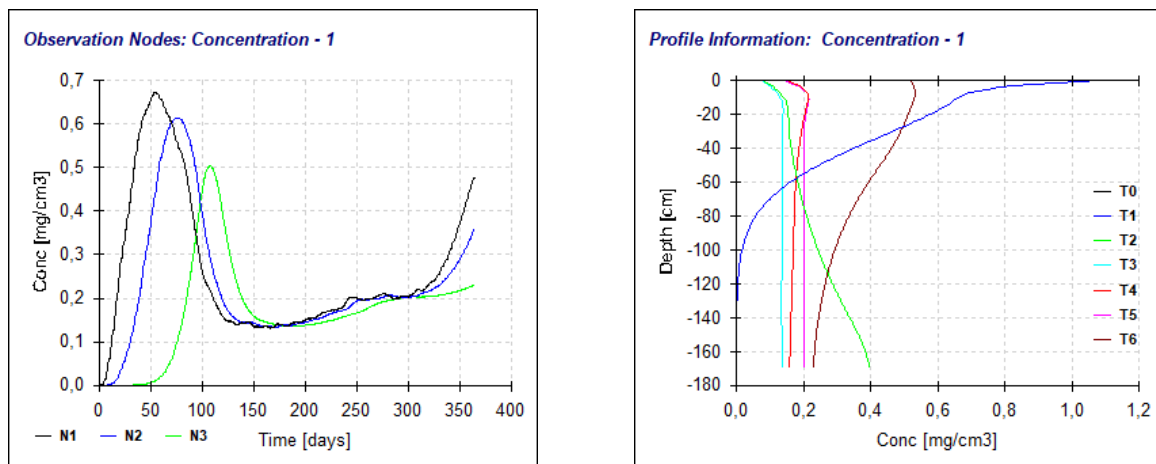
Escenario 2: Flujo de cloruro (347 mg/L), sulfato (34,8 mg/L), grasas y aceites (0,739 mg/L) e hidrocarburos (0,337 mg/L)

En la **Figura 4.3-52** se presenta la concentración de cloruro en los puntos de control N1, N2 y N3 durante el año modelado, en esta también se incluye la distribución del cloruro en el perfil de suelo para diferentes tiempos, siendo T1 el día 60, T2 el día 120, T3 el día 180, T4 día 240, T5 día 300, y T6 último día del año de modelación (365). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de cloruro de 347 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) las concentraciones del soluto se distribuyen descendientemente hasta los 130 cm. Posterior a esto y a partir del T2, esta se distribuye a lo largo de todo el perfil, en respuesta del aumento de la precipitación para esta época. Para los 170 cm, la concentración mayor ocurre en el T2 con un valor de 0,394 mg/cm³, mientras que, en el resto del año, los valores fluctúan entre 0,159 a 0,231 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 55 días para el N1 con un valor de 0,674 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde

al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos. Posterior a estos picos, las concentraciones tienen a estabilizarse para los tres nodos en una concentración cercana a $0,2 \text{ mg/cm}^3$, con un ligero aumento en el N1 al finalizar el año, con un valor final de $0,479 \text{ mg/cm}^3$.



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (34 cm), N2 (70 cm) y N3 (170 cm).

Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-52 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-53** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de $34,8 \text{ mg/L}$.

De acuerdo con los resultados obtenidos con HYDRUS 1D, la evolución del perfil de concentración de sulfato sería muy similar a la del cloruro. Es importante mencionar que hasta el tiempo 2, las concentraciones del sulfato son irregulares a lo largo del perfil y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos a lo largo de toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $0,052 \text{ mg/cm}^3$.

Las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 55 días del inicio del vertimiento con valor de $0,068 \text{ mg/cm}^3$, para N2 $0,062 \text{ mg/cm}^3$ a los 76 días y en N3 $0,051 \text{ mg/cm}^3$ a los 108 días de modelación.

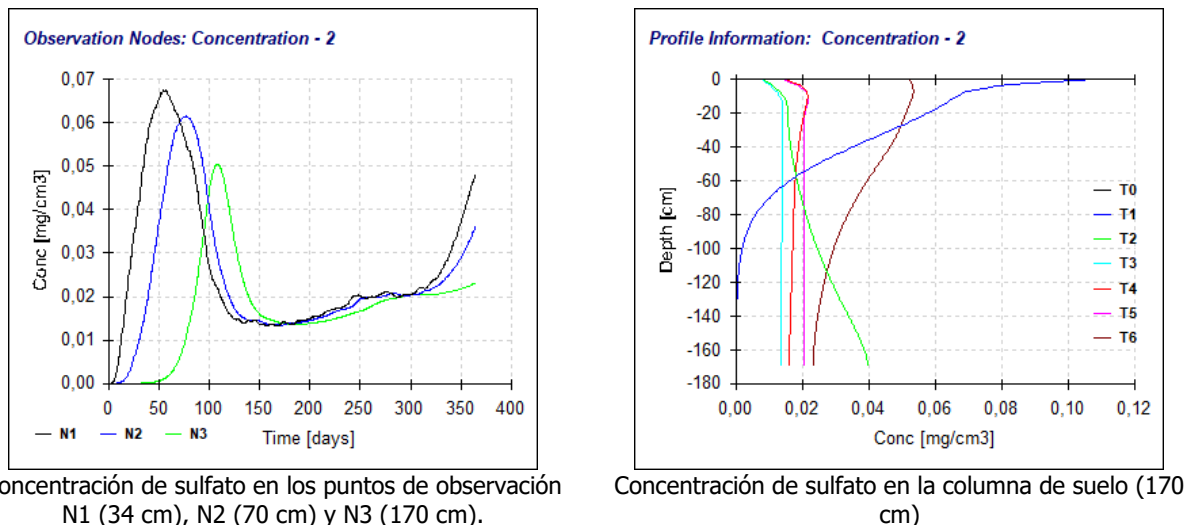


Figura 4.3-53 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

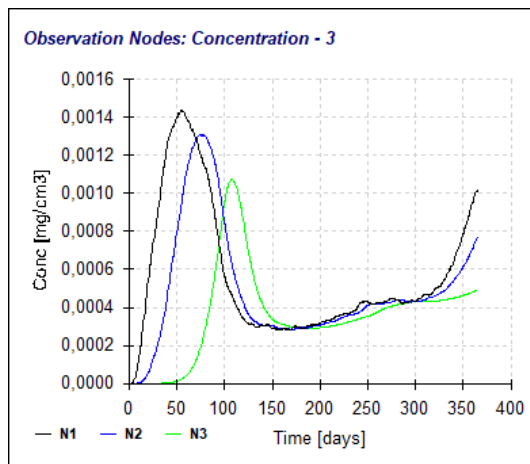
En la **Figura 4.3-54** se presenta la concentración del grasas y aceites en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de grasas de 0,739 mg/L.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, se evidencia que a partir del T2 (120 días) se alcanza una concentración homogénea a lo largo de todo el perfil. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $2,30 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.

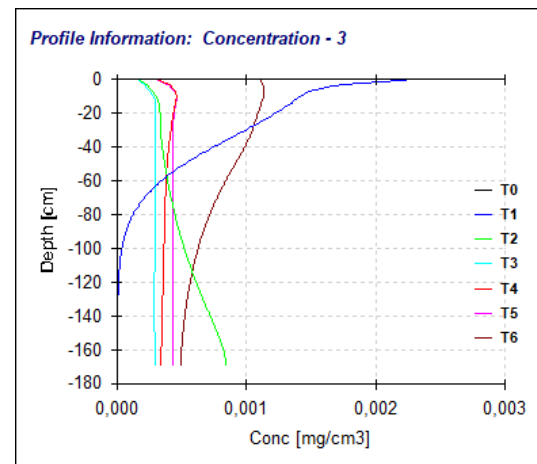
Los resultados evidencian que los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 55 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,44 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$, a los 76 días para N2 con una concentración de $1,31 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y a los 107 días de modelación en N3 con un valor de $1,07 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.

La **Figura 4.3-55** presenta la concentración de hidrocarburos en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 170 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de hidrocarburos de 0,337 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T1) en los primeros 5 cm del perfil. Posterior a esto, las concentraciones comienzan a distribuirse a través de todo el perfil donde el soluto se distribuye en todo el perfil a partir del día 120, presentado su mayor concentración los días 55, 76 y 107 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $5,97 \text{ e}^{-4} \text{ mg/cm}^3$ (N1), $6,55 \text{ e}^{-4} \text{ mg/cm}^3$ (N2) y $4,89 \text{ e}^{-4} \text{ mg/cm}^3$ (N3).



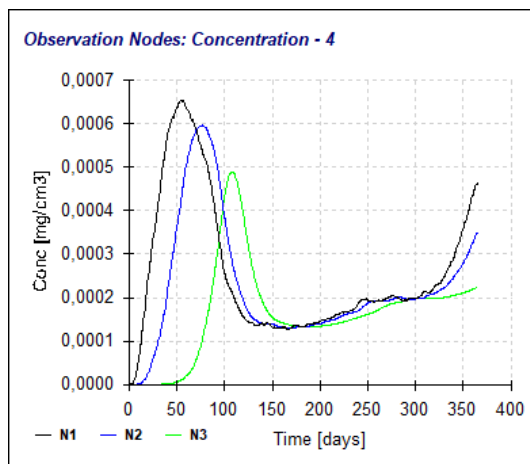
Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (34 cm), N2 (70 cm) y N3 (170 cm).



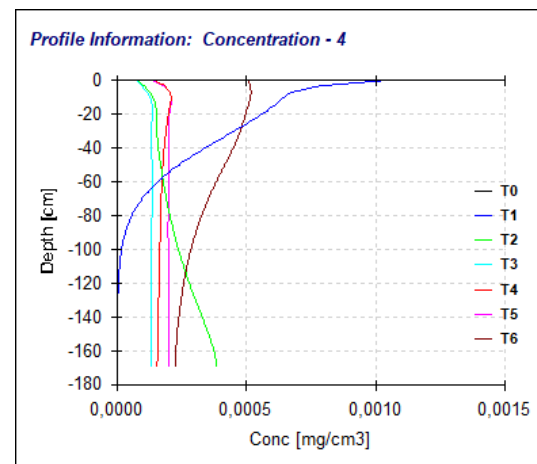
Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-54 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (34 cm), N2 (70 cm) y N3 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-55 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

Escenario 3: Flujo de cloruro (24 mg/L), sulfato (246 mg/L), grasas y aceites (15 mg/L) e hidrocarburos (3,25 mg/L)

El escenario 3 comprende el análisis del flujo de agua y contaminantes en el suelo en caso de una falla del sistema de tratamiento, lo que implicaría que la disposición de aguas residuales no tratadas. Se espera una concentración de cloruro de 624 mg/L, de sulfato de 246 mg/L, grasas de 15 mg/L e hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-56**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 1,942 mg/cm³ en los primeros 10 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 170 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 120 días de la modelación del orden de 0,710 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 55 días para el N1 con un valor de 1,21 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 1,11 mg/cm³ y el N3 0,91 mg/cm³, en los días 76 y 108, respectivamente.

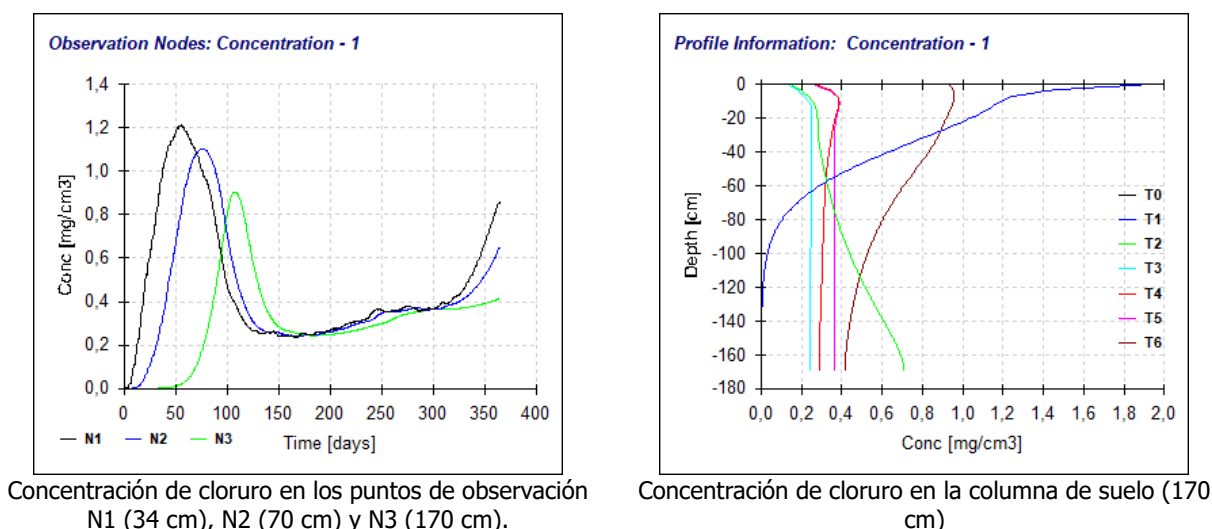
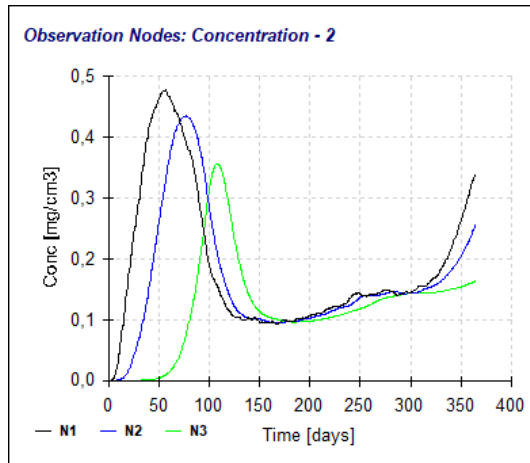


Figura 4.3-56 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3

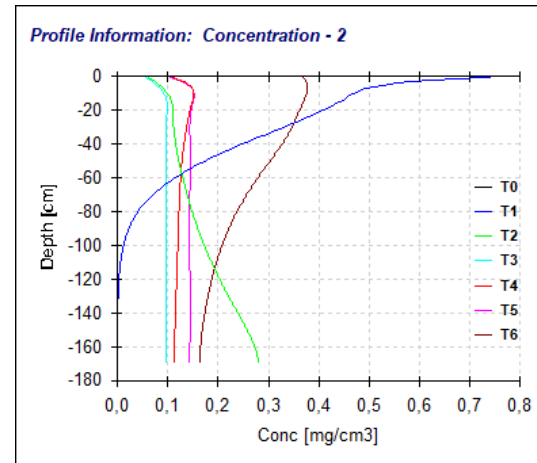
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-57** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 246 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,765 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,478 mg/cm³, para N2 de 0,465 mg/cm³ y en N3 de 0,357 mg/cm³.



Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (34 cm), N2 (70 cm) y N3 (170 cm).



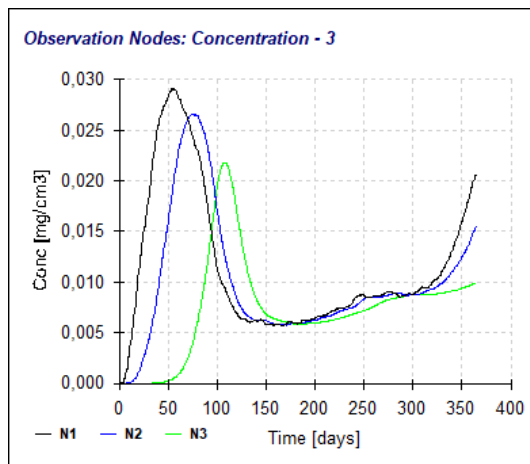
Concentración de sulfato en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-57 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3

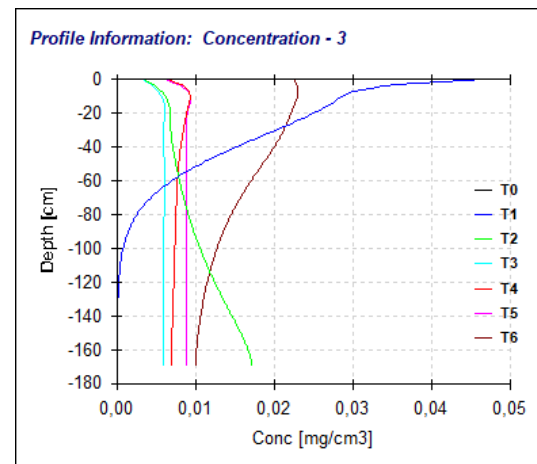
Fuente: GessiG SAS, 2026

Se presenta en la **Figura 4.3-58** la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 15 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de grasas presenten un valor de 0,047 mg/cm³, en los primeros 5 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 0,029 mg/cm³ para N1, un valor de 0,027 mg/cm³ en N2 y 0,022 mg/cm³ para N3.



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (34 cm), N2 (70 cm) y N3 (170 cm).



Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-58 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-59** se enseñan la concentración de hidrocarburos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,010 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 6,31 e⁻³ mg/cm³, para N2 de 5,76 e⁻³ mg/cm³ y en N3 de 4,72 e⁻³ mg/cm³.

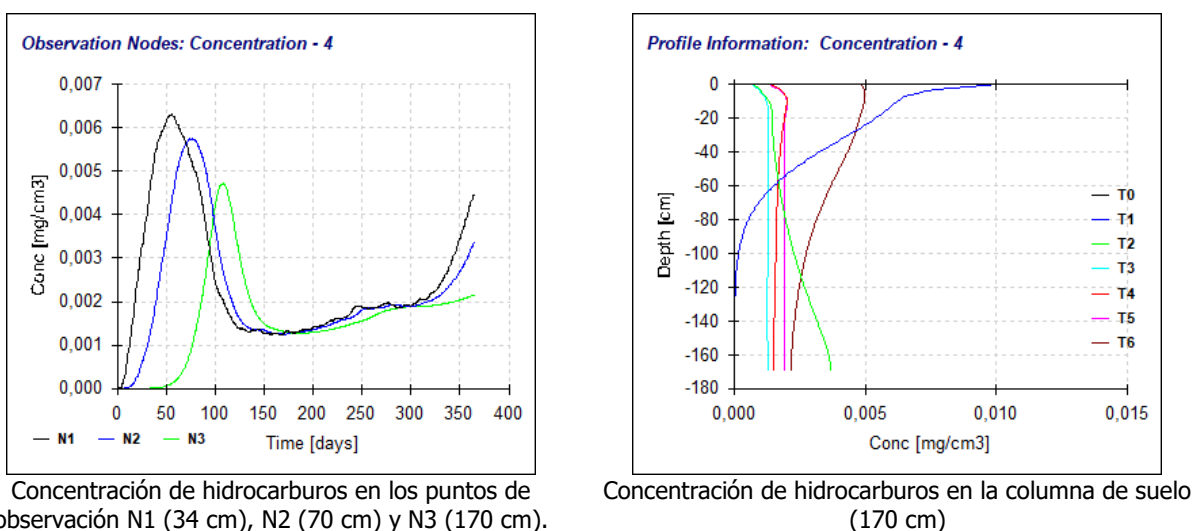


Figura 4.3-59 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

- Asociación PVB Oxic Dystrudepts (75 %) – Plinthic Petraquepts (25 %), Familias Franca, Mixtas, Isohipertérmicas; Perfil modal: CAL-VERT-PVB04.

El perfil modelado para la unidad de suelo PVB es de 1,70 m de profundidad (promedio de la profundidad de los acuíferos someros en la unidad hidrogeológica asociada a la unidad de suelo) tomando las características de los horizontes de suelo de la calicata CAL-VERT-PVB04., por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 8 cm (N1), 37 cm (N2) y 170 cm (N3) (**Figura 4.3-60**), que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el **numeral 4.3.3.6**.

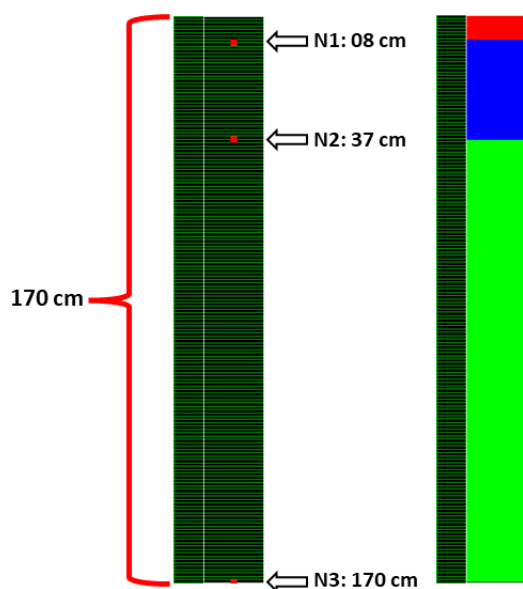
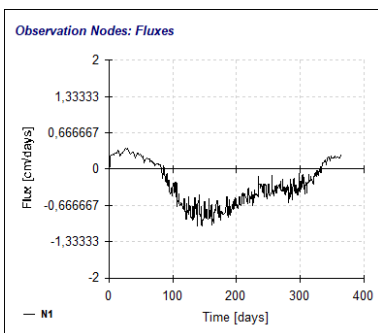


Figura 4.3-60 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-PVB04, Unidad de suelo PVB

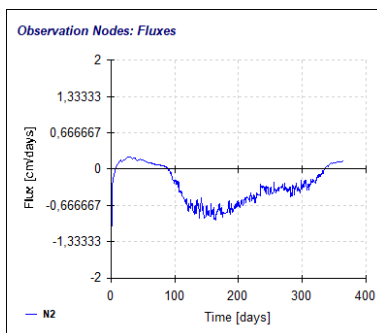
Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Condiciones naturales:

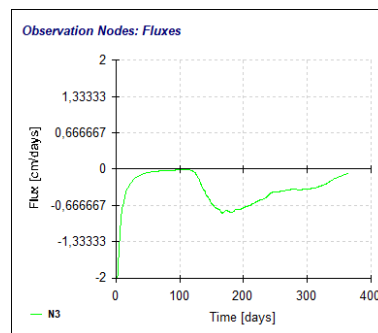
En la **Figura 4.3-61** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal CAL-VERT-PVB04 (unidad PVB), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta se puede evidenciar que el flujo del agua en el perfil cambia en función de la profundidad, siendo el N1 donde se evidencia mayormente el efecto de la precipitación, no solo por presentar un mayor flujo, sino porque su variabilidad en el tiempo es más marcada con respecto a los otros dos nodos. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-61**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,05 cm/d en el día 145. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 0,943 y 0,804 cm/d, respectivamente.



Flujo de agua en el nodo N1, a los 8 cm de profundidad.



Flujo de agua en el nodo N2, a los 37 cm de profundidad



Flujo de agua en el nodo N3, a los 170 cm de profundidad

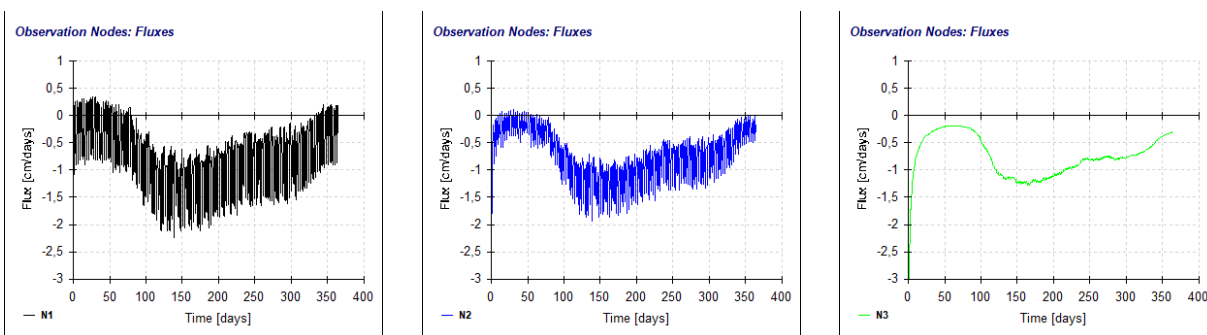
Figura 4.3-61 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVB. Escenario 1

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Escenario 2-3:

En la **Figura 4.3-62** se observan los flujos de agua en los nodos de observación, bajo las condiciones de los escenarios dos y tres. Estas modelaciones permiten estimar que pasaría en el perfil modal, si se aplicase la lámina de riego del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. La lámina de riego para la unidad de suelo 1,241 será de cm y se aplicará cada 3 días. Los nodos de observación se mantuvieron a las profundidades definidas en el escenario uno.

En primer lugar, es clara la entrada extra de agua al sistema natural, que corresponde a la lámina de vertimiento de aguas residuales. Bajo las condiciones de riego de los escenarios dos y tres, se esperaría que a los 8 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 2,241 cm/d, que representa un aumento de más de 1 cm/d con respecto al escenario 1. Los nodos N2 y N3, también presentan incrementos cercanos a 0,5 cm/d con respecto al escenario anterior, con valores 1,934 y 1,284 cm/d.



Flujo de agua en el nodo N1, a los 8 cm de profundidad.

Flujo de agua en el nodo N2, a los 37 cm de profundidad

Flujo de agua en el nodo N3, a los 170 cm de profundidad

Figura 4.3-62 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PVB. Escenarios 2 y 3:

Fuente: GessiG SAS, 2026

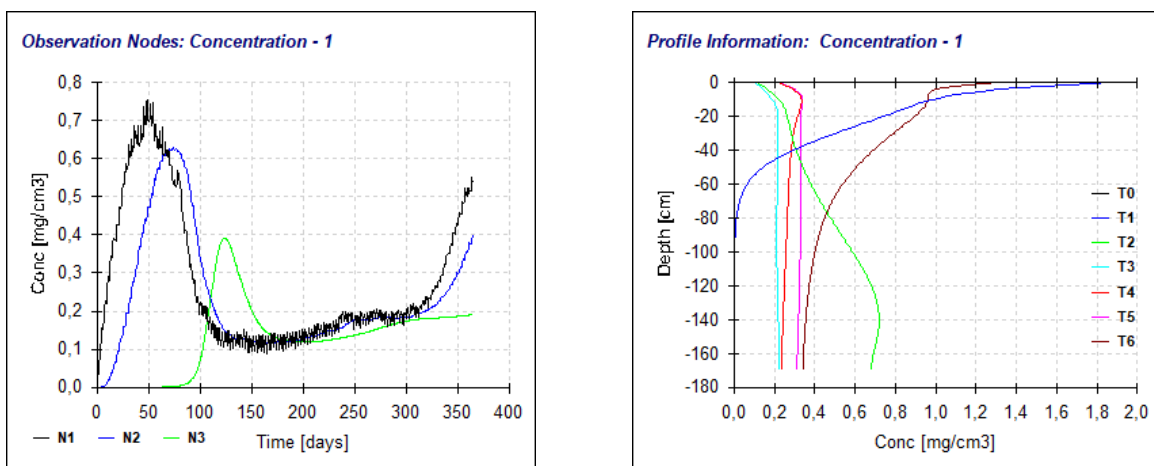
Escenario 2: Flujo de cloruro (347 mg/L), sulfato (34,8 mg/L), grasas y aceites (0,739 mg/L) e hidrocarburos (0,337 mg/L)

En la **Figura 4.3-63** se presenta la concentración de cloruro en los puntos de control N1, N2 y N3 durante el año modelado, en esta también se incluye la distribución del cloruro en el perfil de suelo para diferentes tiempos, siendo T1 el día 60, T2 el día 120, T3 el día 180, T4 día 240, T5 día 300, y T6 último día del año de modelación (365). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de cloruro de 347 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) las concentraciones del soluto se distribuyen descendientemente hasta los 90 cm. Posterior a esto y a partir del T2, esta se distribuye a lo largo de todo el perfil, en respuesta del aumento de la precipitación para esta época. Para los 170 cm, la concentración mayor ocurre en el T2 con un valor de 0,378 mg/cm³, mientras que, en el resto del año, los valores fluctúan entre 0,125 a 0,191 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 48 días para el N1 con un valor de 0,76 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde

al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos. Posterior a estos picos, las concentraciones tienen a estabilizarse para los tres nodos en una concentración cercana a 0,2 mg/cm³, con un ligero aumento en el N1 al finalizar el año, con un valor final de 0,54 mg/cm³.



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (8 cm), N2 (37 cm) y N3 (170 cm).

Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-63 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-64** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 34,8 mg/L.

De acuerdo con los resultados obtenidos con HYDRUS 1D, la evolución del perfil de concentración de sulfato sería muy similar a la del cloruro. Es importante mencionar que hasta el tiempo 2, las concentraciones del sulfato son irregulares a lo largo del perfil y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos a lo largo de toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,103 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 48 días del inicio del vertimiento con valor de 0,076 mg/cm³, para N2 0,063 mg/cm³ a los 73 días y en N3 0,039 mg/cm³ a los 123 días de modelación.

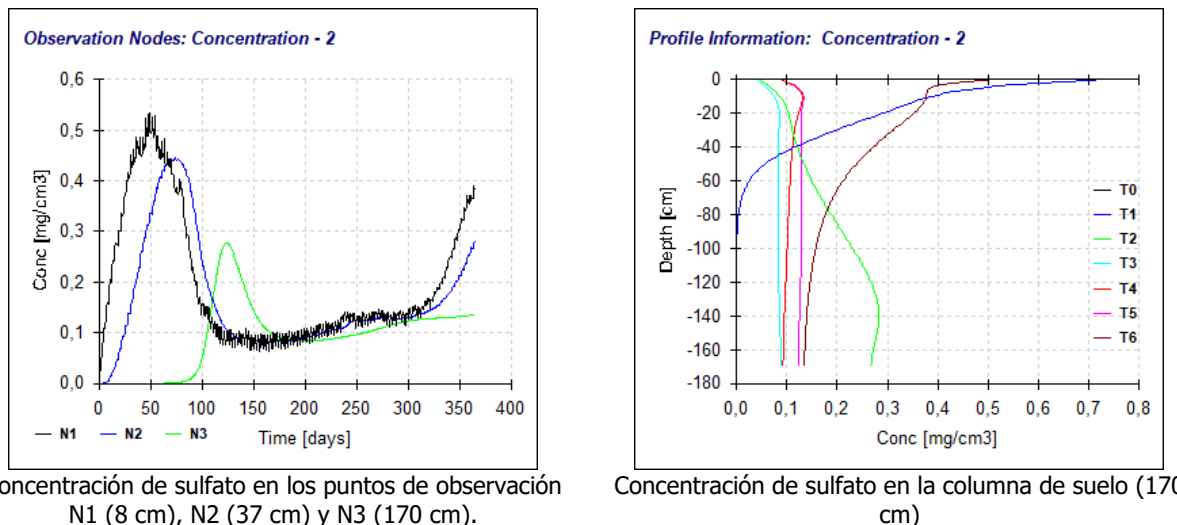


Figura 4.3-64 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2

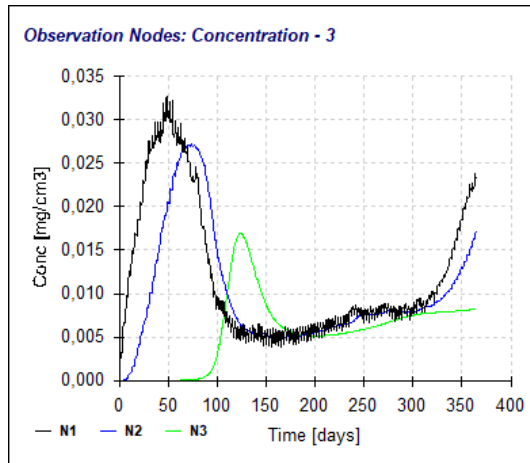
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-65** se presenta la concentración del grasas y aceites en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de grasas de 0,739 mg/L. De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, se evidencia que a partir del T2 (120 días) se alcanza una concentración homogénea a lo largo de todo el perfil. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $1,56 \times 10^{-3}$ mg/cm³.

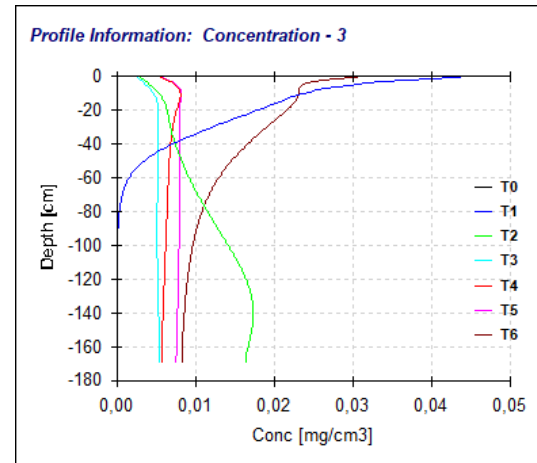
Los resultados evidencian que los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 48 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,61 \times 10^{-3}$ mg/cm³, a los 73 días para N2 con una concentración de $1,34 \times 10^{-3}$ mg/cm³ y a los 123 días de modelación en N3 con un valor de $8,34 \times 10^{-4}$ mg/cm³.

La **Figura 4.3-66** presenta la concentración de hidrocarburos en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 170 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de hidrocarburos de 0,337 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T) en los primeros 10 cm del perfil. Posterior a esto, las concentraciones comienzan a distribuirse a través de todo el perfil donde el soluto se distribuye en todo el perfil a partir del día 120, presentado su mayor concentración los días 48, 74 y 123 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $7,33 \times 10^{-4}$ mg/cm³ (N1), $6,11 \times 10^{-4}$ mg/cm³ (N2) y $3,80 \times 10^{-4}$ mg/cm³ (N3).



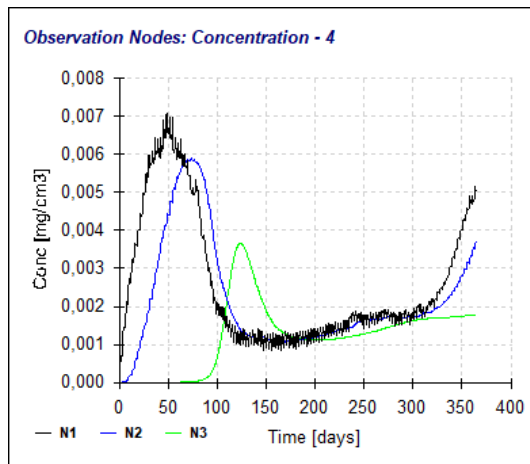
Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (8 cm), N2 (37 cm) y N3 (170 cm).



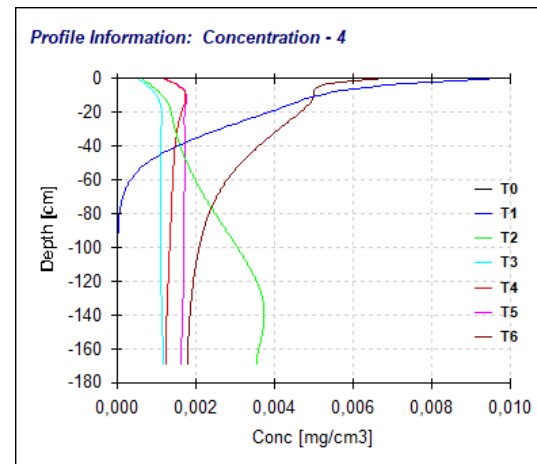
Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-65 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (8 cm), N2 (37 cm) y N3 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-66 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

Escenario 3: Flujo de cloruro (24 mg/L), sulfato (246 mg/L), grasas y aceites (15 mg/L) e hidrocarburos (3,25 mg/L)

El escenario 3 comprende el análisis del flujo de agua y contaminantes en el suelo en caso de una falla del sistema de tratamiento, lo que implicaría que la disposición de aguas residuales no tratadas. Se espera una concentración de cloruro de 624 mg/L, de sulfato de 246 mg/L, grasas de 15 mg/L e hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-67**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 1,313 mg/cm³ en los primeros 10 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 170 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 120 días de la modelación del orden de 0,680 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 48 días para el N1 con un valor de 1,358 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 1,131 mg/cm³ y el N3 0,703 mg/cm³, en los días 73 y 123, respectivamente.

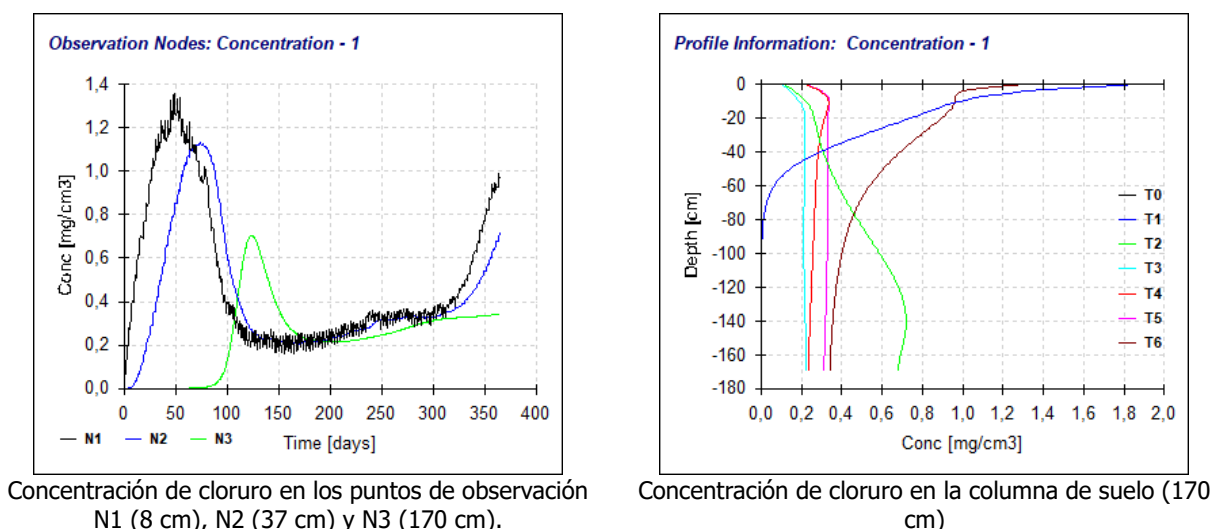


Figura 4.3-67 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-68** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 246 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,734 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,535 mg/cm³, para N2 de 0,445 mg/cm³ y en N3 de 0,277 mg/cm³.

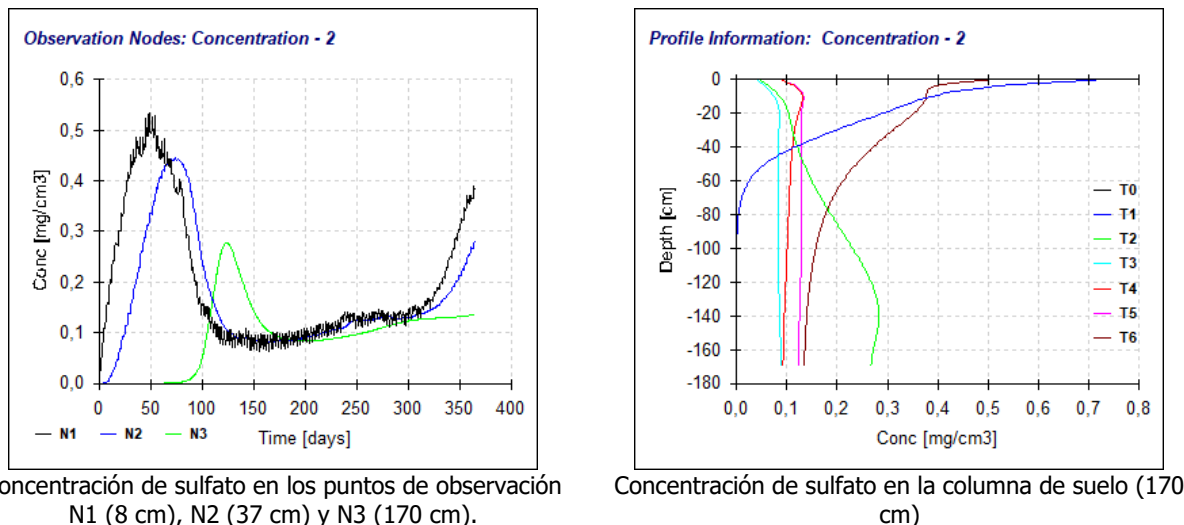


Figura 4.3-68 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

Se presenta en la **Figura 4.3-69** la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 15 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de grasas presenten un valor de 0,032 mg/cm³, en los primeros 5 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 0,033 mg/cm³ para N1, un valor de 0,027 mg/cm³ en N2 y 0,017 mg/cm³ para N3.

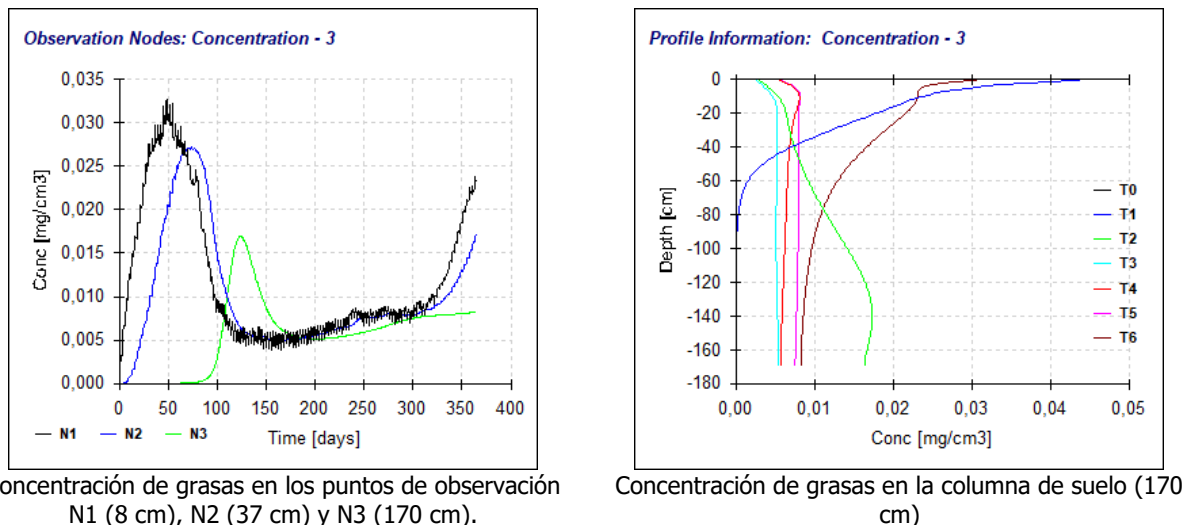


Figura 4.3-69 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-70** se enseñan la concentración de hidrocarburos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $9,72 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de $7,07 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$, para N2 de $5,89 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y en N3 de $3,66 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.

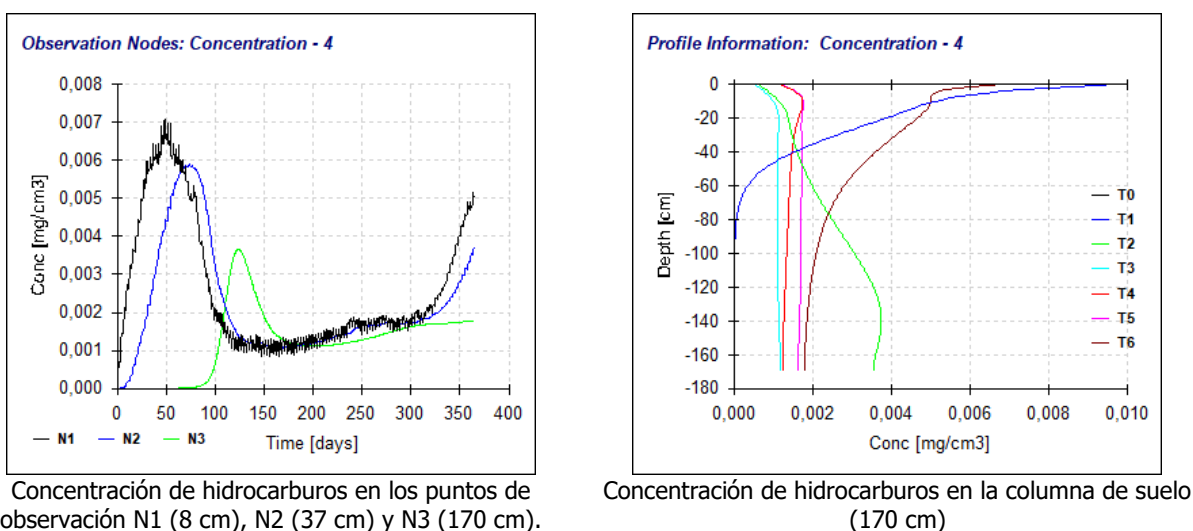


Figura 4.3-70 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

- Consociación LVJ Typic Dystrudepts, Familia Franco arenosa arcillosa, Mixta, Isohipertérmica; Perfil modal: CAL-VERT-LVJ14.

El perfil modelado para la unidad de suelo LJ es de 1,70 m de profundidad (promedio de la profundidad de los acuíferos someros en la unidad hidrogeológica asociada a la unidad de suelo) tomando las características de los horizontes de suelo de la calicata CAL-VERT-AVC01, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 12 cm (N1), 44 cm (N2), 84 cm (N3) y 170 cm (N4) **Figura 4.3-71**, que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el **numeral 4.3.3.6**.

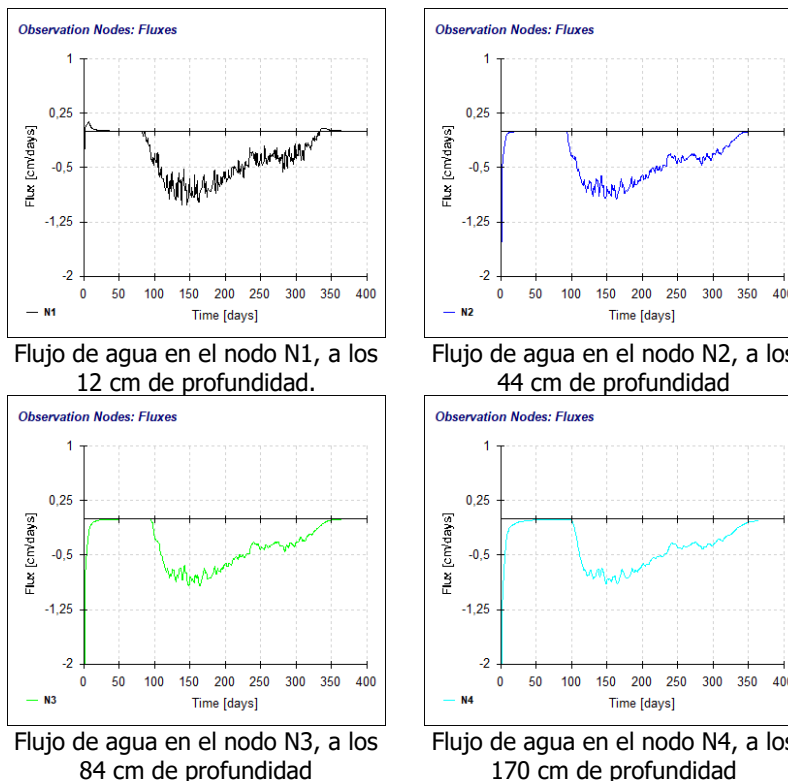


Figura 4.3-71 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL-VERT-LVJ14, Unidad de suelo LVJ

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Condiciones naturales:

En la **Figura 4.3-72** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal CAL-VERT-LVJ14 (unidad LVJ), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta se puede evidenciar que el flujo del agua en el perfil cambia en función de la profundidad, siendo el N1 donde se evidencia mayormente el efecto de la precipitación, no solo por presentar un mayor flujo, sino porque su variabilidad en el tiempo es más marcada con respecto a los otros dos nodos. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-72**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,02 cm/d en el día 146. En cuanto a los nodos N2, N3 y N4, los valores máximos reportados son de 0,94, 0,92 y 0,90 cm/d, respectivamente.



Flujo de agua en el nodo N1, a los 12 cm de profundidad.

Flujo de agua en el nodo N2, a los 44 cm de profundidad

Flujo de agua en el nodo N3, a los 84 cm de profundidad

Flujo de agua en el nodo N4, a los 170 cm de profundidad

Figura 4.3-72 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo LVJ. Escenario 1

Fuente: GessiG SAS, 2026

Flujo de agua – Escenario 2-3:

En la **Figura 4.3-73** se observan los flujos de agua en los nodos de observación, bajo las condiciones de los escenarios dos y tres. Estas modelaciones permiten estimar que pasaría en el perfil modal, si se aplicase la lámina de riego del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. La lámina de riego para la unidad de suelo será de 0,791 cm y se aplicará cada 2 días. Los nodos de observación se mantuvieron a las profundidades definidas en el escenario uno.

En primer lugar, es clara la entrada extra de agua al sistema natural, que corresponde a la lámina de vertimiento de aguas residuales. Bajo las condiciones de riego de los escenarios dos y tres, se esperaba que a los 12 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 1,768 cm/d, que representa un aumento de más de 0,7 cm/d con respecto al escenario 1. Los nodos N2, N3 y N4, también presentan incrementos cercanos a 0,5 cm/d con respecto al escenario anterior, con valores 1,516, 1,433 y 1,355 cm/d.

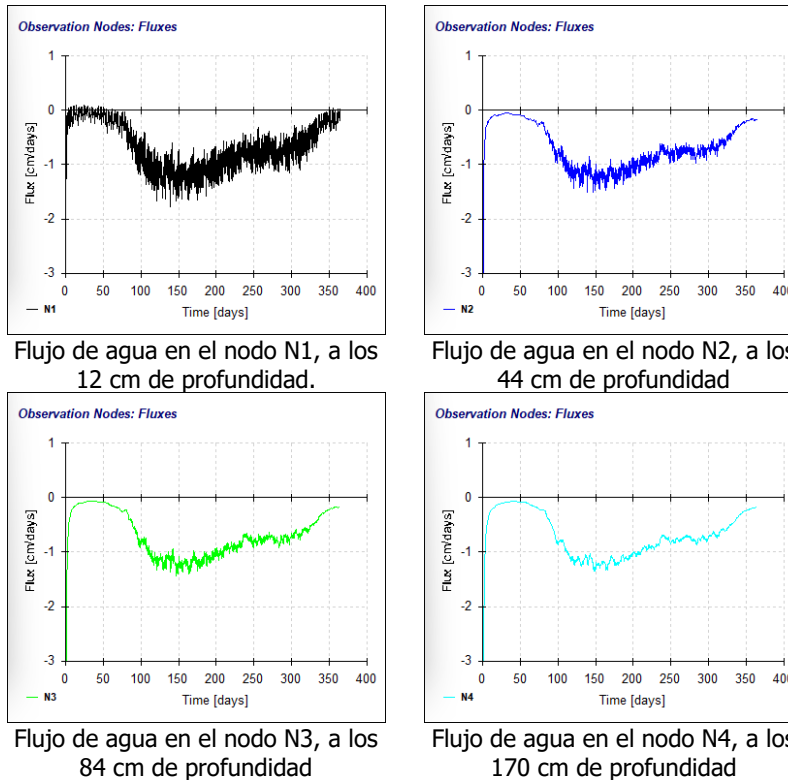


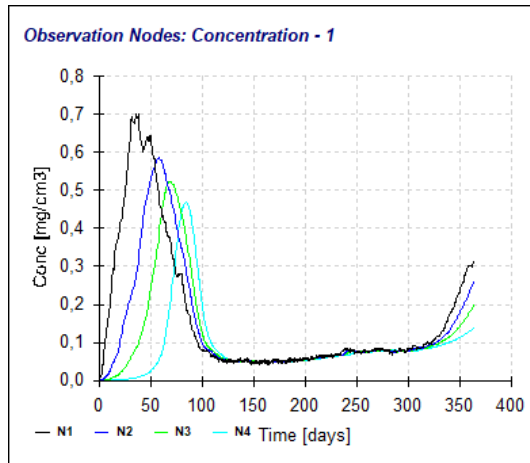
Figura 4.3-73 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo LVJ. Escenarios 2 y 3:

Fuente: GessiG SAS, 2026

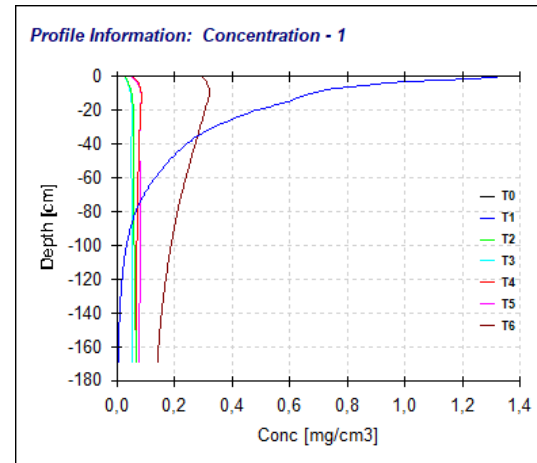
Escenario 2: Flujo de cloruro (347 mg/L), sulfato (34,8 mg/L), grasas y aceites (0,739 mg/L) e hidrocarburos (0,337 mg/L)

En la **Figura 4.3-74** se presenta la concentración de cloruro en los puntos de control N1, N2 y N3 durante el año modelado, en esta también se incluye la distribución del cloruro en el perfil de suelo para diferentes tiempos, siendo T1 el día 60, T2 el día 120, T3 el día 180, T4 día 240, T5 día 300, y T6 último día del año de modelación (365). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de cloruro de 347 mg/L. Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) las concentraciones del soluto se distribuyen descendientemente hasta los 160 cm. Posterior a esto y a partir del T2, esta se distribuye a lo largo de todo el perfil, en respuesta del aumento de la precipitación para esta época. Para los 170 cm, la concentración mayor ocurre en el T6 con un valor de 0,141 mg/cm³, mientras que, en el resto del año, los valores fluctúan entre 0,05 a 0,08 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 35 días para el N1 con un valor de 0,702 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos. Posterior a estos picos, las concentraciones tienen a estabilizarse para los tres nodos en una concentración cercana a 0,01 mg/cm³, con un ligero aumento en el N1 al finalizar el año, con un valor final de 0.310 mg/cm³.



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-74 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-75** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 34,8 mg/L. De acuerdo con los resultados obtenidos con HYDRUS 1D, la evolución del perfil de concentración de sulfato sería muy similar a la del cloruro. Es importante mencionar que hasta el tiempo 2, las concentraciones del sulfato son irregulares a lo largo del perfil y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos a lo largo de toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,069 mg/cm³.

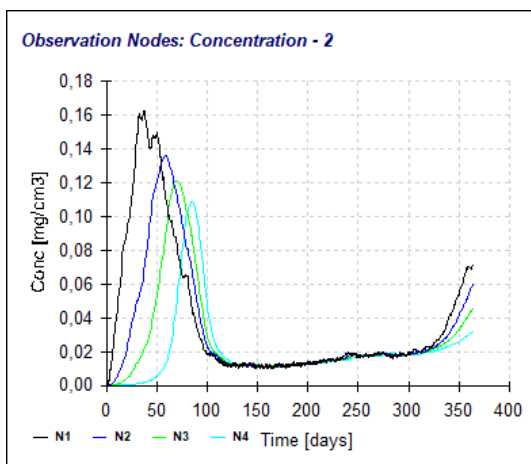
Las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 35 días del inicio del vertimiento con valor de 0,163 mg/cm³, para N2 0,136 mg/cm³ a los 58 días, en N3 0,121 mg/cm³ a los 69 días y en N4 0,109 mg/cm³ a los 84 días de modelación.

En la **Figura 4.3-76** se presenta la concentración del grasas y aceites en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de grasas de 0,739 mg/L.

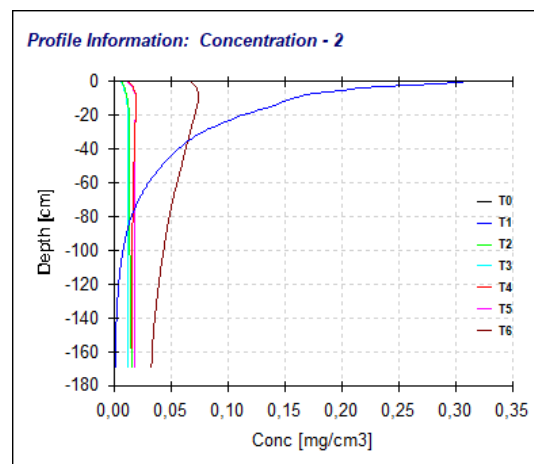
De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, se evidencia que a partir del T2 (120 días) se alcanza una concentración homogénea a lo largo de todo el perfil. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 1,45 e⁻³ mg/cm³.

Los resultados evidencian que los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 35 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de 3,46 e⁻³ mg/cm³, a los 58

días para N2 con una concentración de $2,90 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$, a los 69 días de modelación en N3 con un valor de $2,57 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ y a los 84 días de modelación en N4 con un valor de $2,31 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$.



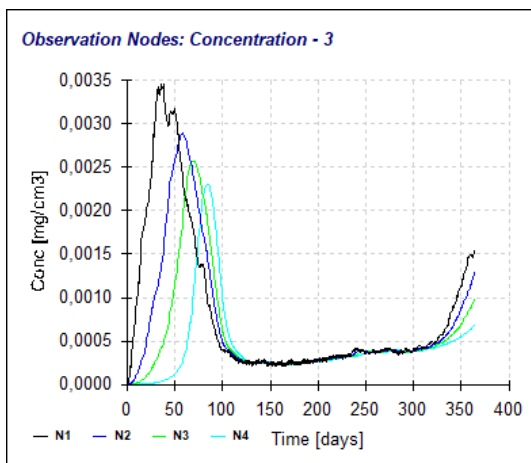
Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



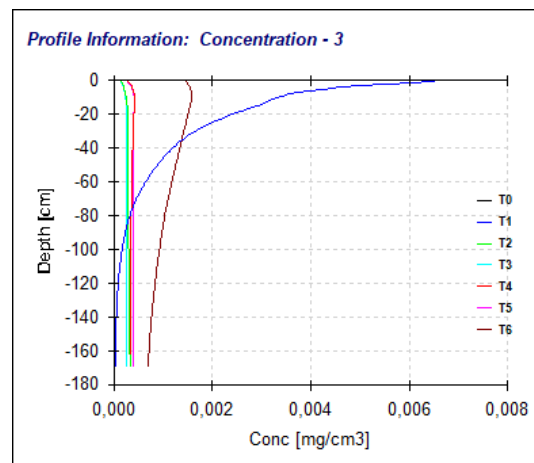
Concentración de sulfato en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-75 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



Concentración de grasas en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-76 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 2

Fuente: GessiG SAS, 2026

La **Figura 4.3-77** presenta la concentración de hidrocarburos en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 170 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de hidrocarburos de $0,337 \text{ mg/L}$. De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T) en los primeros 5 cm del perfil. Posterior a esto, las concentraciones comienzan a distribuirse a través de todo el perfil donde el soluto se distribuye

en todo el perfil a partir del día 120, presentado su mayor concentración los días 35, 58, 69 y 84 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $1,58 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ (N1), $1,32 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ (N2), $1,17 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ (N3) y $1,05 \text{ e}^{-3} \text{ mg/cm}^3$ (N4).

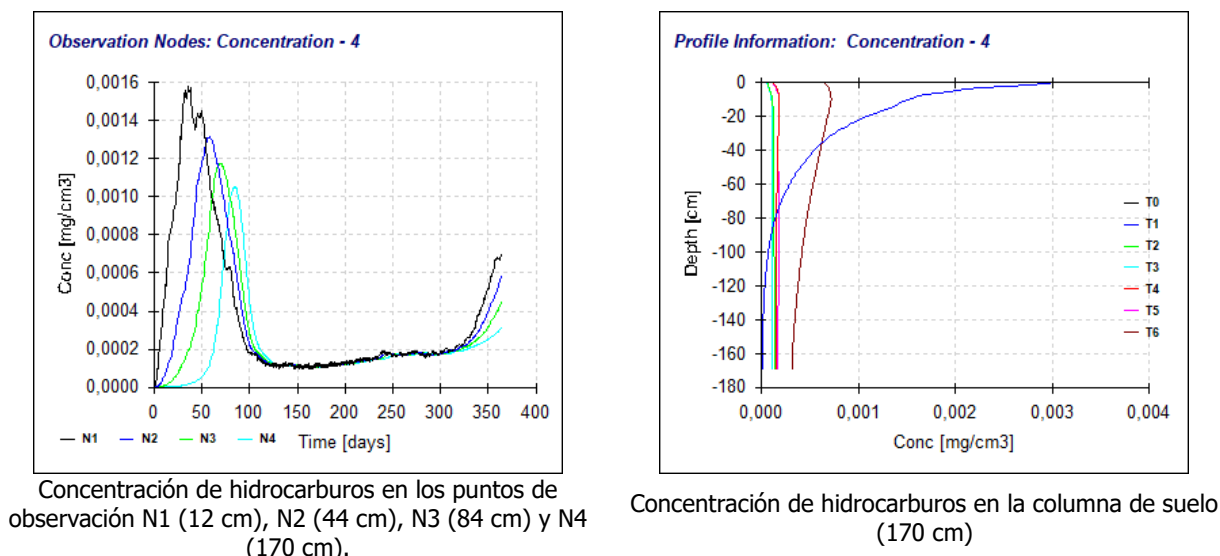


Figura 4.3-77 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 2

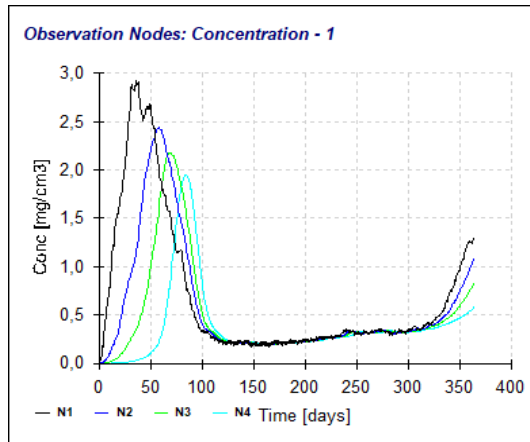
Fuente: GessiG SAS, 2026

Escenario 3: Flujo de cloruro (24 mg/L), sulfato (246 mg/L), grasas y aceites (15 mg/L) e hidrocarburos (3,25 mg/L)

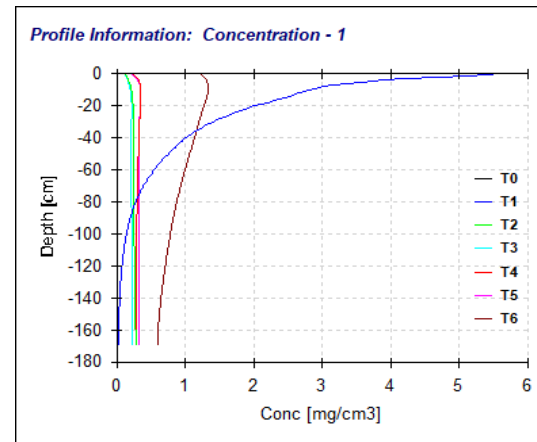
El escenario 3 comprende el análisis del flujo de agua y contaminantes en el suelo en caso de una falla del sistema de tratamiento, lo que implicaría que la disposición de aguas residuales no tratadas. Se espera una concentración de cloruro de 624 mg/L, de sulfato de 246 mg/L, grasas de 15 mg/L e hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-78**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 1,229 mg/cm³ en los primeros 5 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 170 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 365 días de la modelación del orden de 0,588 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los cuatro nodos se registran a los 35 días para el N1 con un valor de 2,922 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 2,445 mg/cm³, el N3 2,173 mg/cm³, y el N4 0,195 mg/cm³, respectivamente.



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



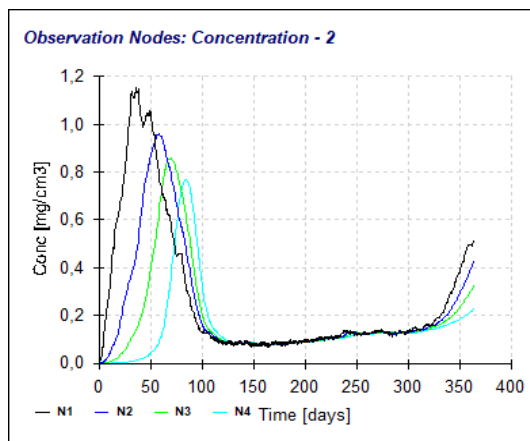
Concentración de cloruro en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-78 Concentraciones de cloruro. Escenario de modelación número 3

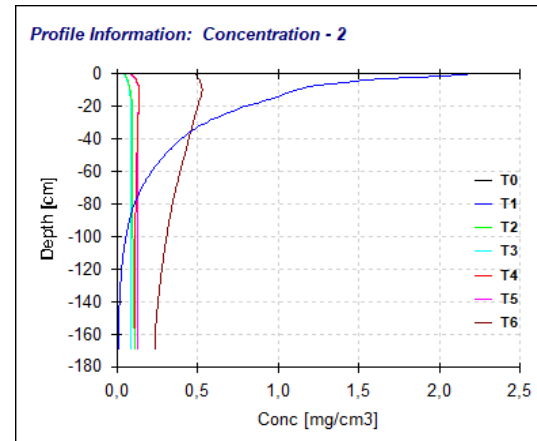
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-79** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 246 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en los primeros 5 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 2,218 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 1,151 mg/cm³, para N2 de 0,964 mg/cm³, en N3 de 0,857 mg/cm³ y para N4 de 0,769 mg/cm³.



Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



Concentración de sulfato en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-79 Concentraciones de sulfatos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

La **Figura 4.3-80** muestra la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 15 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de grasas presenten un valor de 0,030 mg/cm³, en los primeros 05 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los cuatro nodos corresponden a 0,070 mg/cm³ para N1, un valor de 0,09 mg/cm³ en N2, 0,052 mg/cm³ para N3 y 0,047 mg/cm³ para N4.

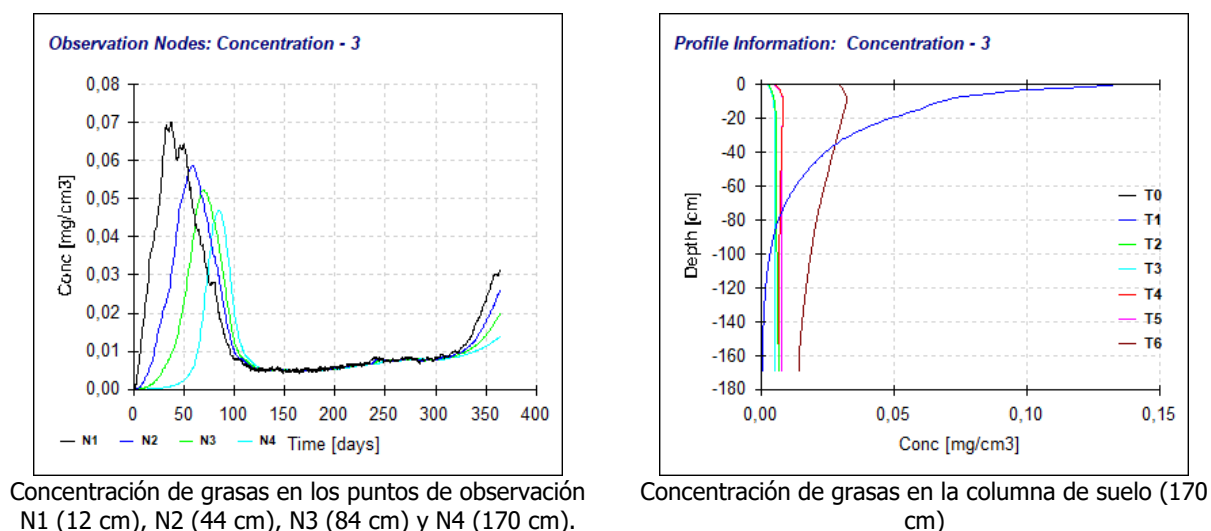
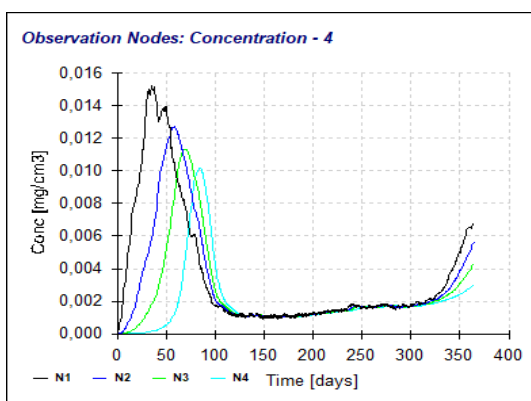


Figura 4.3-80 Concentraciones de grasas. Escenario de modelación número 3

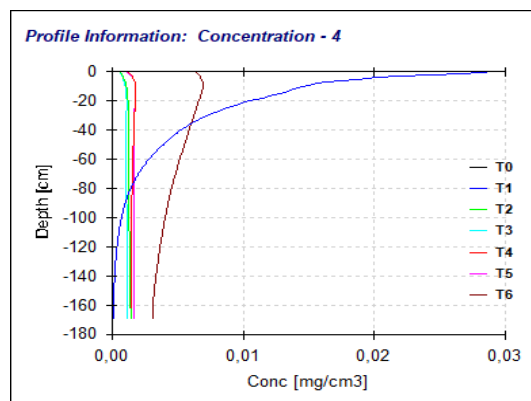
Fuente: GessiG SAS, 2026

En la **Figura 4.3-81** se enseñan la concentración de hidrocarburos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 170 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de hidrocarburos de 3,25 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,029 mg/cm³, lo cual ocurre en el T1. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,015 mg/cm³, para N2 de 0,012 mg/cm³, en N3 de 0,011 mg/cm³ y para N4 de 0,010 mg/cm³.



Concentración de hidrocarburos en los puntos de observación N1 (12 cm), N2 (44 cm), N3 (84 cm) y N4 (170 cm).



Concentración de hidrocarburos en la columna de suelo (170 cm)

Figura 4.3-81 Concentraciones de hidrocarburos. Escenario de modelación número 3

Fuente: GessiG SAS, 2026

✓ *Conclusión de la modelación con Hydrus 1-D*

Teniendo en cuenta los resultados presentados para el escenario 2 y escenario 3, se concluye que, tras un año de vertimiento, las aguas residuales domésticas e industriales tratadas penetrarían en su totalidad la zona vadosa de los perfiles modales representativos de las unidades de suelo: AVG, RVG, PVA, PVB, LVJ.

Igualmente, el modelo predice transporte y concentraciones de cloruro, sulfato, grasas y aceites, e hidrocarburos (provenientes de los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales tratadas), en todos los perfiles modales; lo cual se explicaría por las texturas medias (francas) y medianamente finas (franco arcillosas y franco arcillo limosas) de los horizontes de cada unidad. Asimismo, se prevé que, al finalizar el año de vertimiento de aguas residuales tratadas, las mayores concentraciones de los solutos moderados en los cinco perfiles modales ocurrirían muy cerca de la superficie en los primeros 10 cm de profundidad.

En la **Tabla 4.3-36** y la **Tabla 4.3-37** se presentan las concentraciones de los solutos en el agua (mg/L) almacenada en los límites inferiores de los perfiles modales (170 cm) al final del periodo de la modelación (365 días).

Tabla 4.3-36 Concentraciones finales previstas para el límite inferior de los perfiles modales, tras un año de vertimiento de aguas residuales escenario de modelación 2

Concentraciones finales Límite inferior perfil modal	Escenario 2					Criterios de calidad (límites)
	Vertimiento de aguas residuales tratadas.					
	AVC	RVG	PBA	PVB	LVJ	
	CAL-CAR-AVC-01	CAL-VERT-RVG-05	CAL-VERT-PVA-03	CAL-VERT-PVB-04	CAL-VERT-LVJ-14	
Cloruro	0,09	0,08	0,23	0,19	0,14	500 mg/L
	mg/cm3					
	92,48	77,94	231,00	190,70	141,30	
	ma/l					

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Concentraciones finales Límite inferior perfil modal	Escenario 2					Criterios de calidad (límites)
	Vertimiento de aguas residuales tratadas.					
	AVC	RVG	PBA	PVB	LVJ	
	CAL-CAR-AVC-01	CAL-VERT-RVG-05	CAL-VERT-PVA-03	CAL-VERT-PVB-04	CAL-VERT-LVJ-14	
Sulfato	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	500 mg/L
	mg/cm3					
	21,46	18,08	23,17	19,12	32,78	
	mg/l					
Grasas y aceites	0,00046	0,00038	0,00049	0,00041	0,00070	15 mg/L
	mg/cm3					
	0,46	0,38	0,49	0,41	0,70	
	mg/l					
Hidrocarburos	0,00021	0,00016	0,00022	0,00019	0,00032	10 mg/L
	mg/cm3					
	0,21	0,16	0,22	0,19	0,32	
	mg/l					

*Criterios de calidad máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas a hidrocarburos, Artículo 11, Resolución 631 de 2015.
Fuente: GessiG SAS, 2026

Tabla 4.3-37 Concentraciones finales previstas para el límite inferior de los perfiles modales, tras un año de vertimiento de aguas residuales escenario de modelación 3

Concentraciones finales Límite inferior perfil modal	Escenario 3					Criterios de calidad (límites*)
	Vertimiento de aguas residuales tratadas.					
	AVC	RVG	PBA	PVB	LVJ	
	CAL-CAR-AVC-01	CAL-VERT-RVG-05	CAL-VERT-PVA-03	CAL-VERT-PVB-04	CAL-VERT-LVJ-14	
Cloruro	0,38	0,32	0,42	0,34	0,59	500 mg/L
	mg/cm3					
	384,70	324,20	415,40	342,80	587,70	
	mg/l					
Sulfato	0,15	0,13	0,16	0,14	0,23	500 mg/L
	mg/cm3					
	151,70	127,80	163,80	135,20	231,70	
	mg/l					
Grasas y aceites	0,00925	0,00779	0,00998	0,00824	0,01413	15 mg/L
	mg/cm3					
	9,25	7,79	9,98	8,24	14,13	
	mg/l					
Hidrocarburos	0,00200	0,00169	0,00216	0,00179	0,00306	10 mg/L
	mg/cm3					
	2,00	1,69	2,16	1,79	3,06	
	mg/l					

*Criterios de calidad máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas a hidrocarburos, Artículo 11, Resolución 631 de 2015.
Fuente: GessiG SAS, 2026

Como puede apreciarse en la **Tabla 4.3-36** y la **Tabla 4.3-37**, las concentraciones finales de los solutos modelados , bajo las condiciones del escenario 2 y escenario 3 de las aguas de origen

doméstico e industrial vertidas al momento de contacto con los acuíferos someros (Nivel freático), están por debajo de los límites de calidad establecidos para la destinación del agua para consumo humano doméstico, con excepción del perfil CAL-VERT-LVJ-14, el cual para el escenario 3 (Vertimiento sin tratamiento), las concentraciones de cloruros sobrepasan los valores permisibles por 87,70 mg/L, sin embargo, es importante señalar que este es un escenario de contingencia donde se evalúa los efectos de verter las aguas residuales directamente al suelo sin tener un proceso de tratamiento.

Por último, se reitera que como se presenta en la **Tabla 4.3-27** se puede observar que para el escenario 2 y 3, en el caso de los cinco perfiles modales, las concentraciones finales de los solutos en el agua almacenada en los límites de los perfiles modal, a excepción del caso mencionado anteriormente, no sobrepasan los límites admisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984, Artículo 38 (citado por el Decreto 1076 del 2015 Art. 2.2.3.3.9.3), ni lo reportado en el Artículo 11, Resolución 631 de 2015.

➤ *Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero asociado, a la salud humana y al ambiente*

Teniendo en cuenta que no existe normatividad colombiana homologable, se toma como referencia la Guía Técnica de Aplicación del RD 9/2005, del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, en la que se establece la relación entre actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados⁵, "Se entiende por riesgo la posibilidad de sufrir un daño por la exposición a un peligro, en este caso, a una sustancia."

En este estudio se evaluaron el riesgo de contaminación del acuífero asociado, por medio de la determinación del riesgo a la salud humana y el riesgo de contaminación del ambiente. Para estimar dichos riesgos, se consideró: a) la amenaza que representan las concentraciones de cloruros, sulfatos, nitratos y grasas en el límite inferior de los perfiles modales (modelación con HYDRUS-1D) y b) la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación de sus aguas. A continuación, se presentan los resultados.

✓ *Amenaza por Contaminación*

Siguiendo la metodología de Foster e Hirata (1988) las amenazas por contaminación teniendo como parámetros trazadores el cloruro y sulfato se evaluaron independientemente, a partir de cuatro características: clase de contaminante - A (**Figura 4.3-82**), intensidad de la contaminación - B (**Figura 4.3-83**), modo de disposición del contaminante - C (**Figura 4.3-84**) y tiempo de aplicación de la carga contaminante - D (**Figura 4.3-85**). A cada característica se le asignó un valor de 0 a 1, de acuerdo con las caracterizaciones obtenidas con las gráficas que se presentan a continuación:

⁵ Tomado de: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/suelos-contaminados/guia_tecnica_contaminantes_suelo_declaracion_suelos_tcm7-3204.pdf

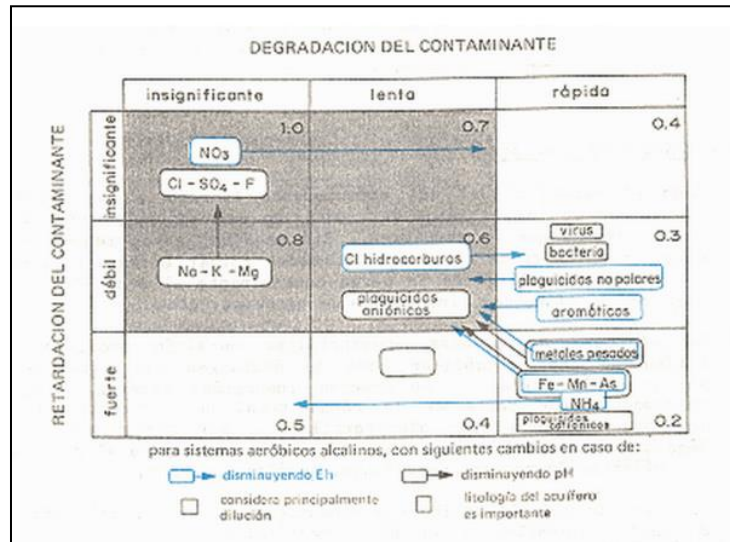


Figura 4.3-82 Clase de contaminante (A).

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

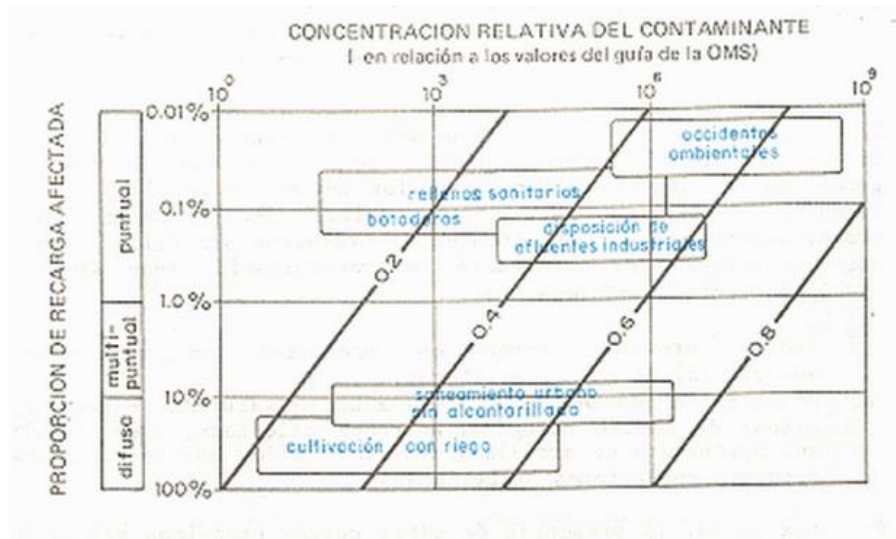


Figura 4.3-83 Intensidad de contaminante (B).

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

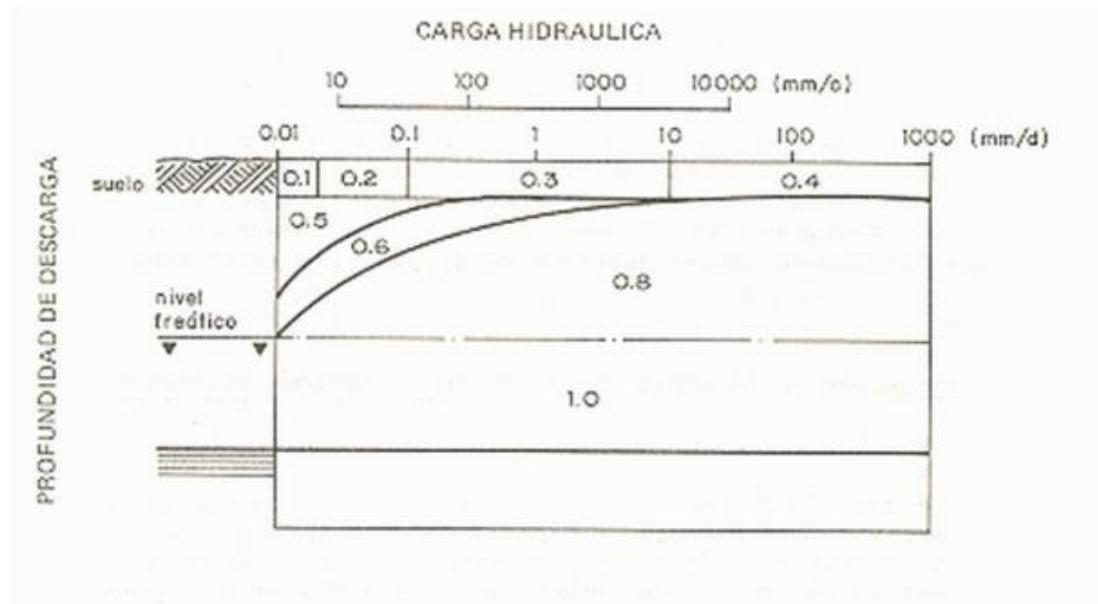


Figura 4.3-84 Modo de disposición de contaminante (C).

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

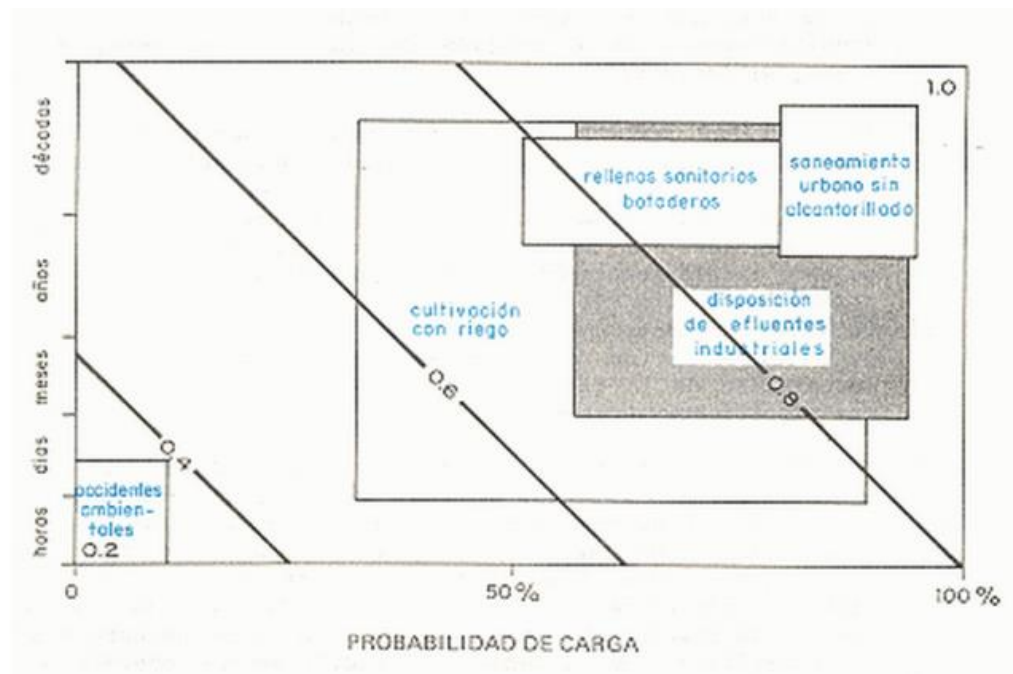


Figura 4.3-85 Tiempo de aplicación de la carga contaminante (D).

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

El índice final de amenaza o Potencial de Contaminación se obtuvo promediando los índices A a D. Los resultados se presentan en la **Tabla 4.3-38**. De acuerdo con los resultados obtenidos y los rangos de clasificación del método de Foster e Hirata (1988), la amenaza o potencial de contaminación de las aguas subterráneas a causa de vertimiento de aguas residuales tratadas en suelo, sería moderada.

Tabla 4.3-38 Evaluación índice de amenaza o potencial de contaminación, método de Foster e Hirata (1988)

Posible contaminante	Clase de contaminación A	Intensidad de contaminación B	Modo de disposición de contaminante C	Duración carga contaminante D	Potencial de contaminación
Cloruros	1,0	0,2	0,4	0,7	0,57 Moderada
Sulfatos	1,0				
Grasas	0,6				0,47 Moderada
Hidrocarburos	0,6				

Fuente: GessiG S.A.S., 2026.

✓ *Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (método cualitativo)*

De acuerdo con los resultados de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, presentada en el **Capítulo 3.2.7 Hidrogeología**, el área de influencia del proyecto presenta clasificaciones muy bajas a moderadas.

En la **Tabla 4.3-39** se presenta la relación de área de las UCS objeto de la solicitud de vertimiento con respecto a la calificación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. En esta se puede apreciar que a nivel general se presentan categorías desde muy baja a moderada vulnerabilidad para cuatro de las cinco unidades (AVG, RVG, PVA y PVB), la principal categoría de vulnerabilidad es la moderada, la cual presenta una mayor cobertura de área, mientras que la categoría baja presenta un área menor.

En cuanto a la unidad LVJ, predominan las áreas con clasificación baja, seguidas de aquellas con categoría moderada y adicionalmente, es la única unidad cartográfica de suelos que presenta áreas con clasificación muy baja.

Tabla 4.3-39 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos obtenida para el Bloque CPO-5

Unidad de suelo	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos asociales a las unidades de suelo Método Drastic	Área dentro del Bloque CPO-5
		(ha)
AVC	Baja	12.282,48
	Moderada	44.795,27
RVG	Baja	340,72
	Moderada	5.937,20
PBA	Baja	835,68
	Moderada	5.931,79

Unidad de suelo	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos asociales a las unidades de suelo Método Drastic	Área dentro del Bloque CPO-5
		(ha)
PVB	Baja	144,64
	Moderada	10.117,96
LVJ	Muy Baja	51,87
	Baja	11.219,26
	Moderada	141,76

Fuente: GessiG SAS, 2026

✓ *Riesgo de contaminación de acuíferos*

El riesgo de contaminación de acuíferos por vertimiento de aguas residuales tratadas a suelo se evaluó siguiendo la metodología de Foster e Hirata (1988), en la cual se define el riesgo como la interacción entre la vulnerabilidad del acuífero y la amenaza debido a las características de la carga contaminante aplicada en la zona vadosa o nivel freático. En la **Figura 4.3-86** se aprecia la relación vulnerabilidad versus amenaza por la carga de contaminante y el producto del riesgo de contaminación.

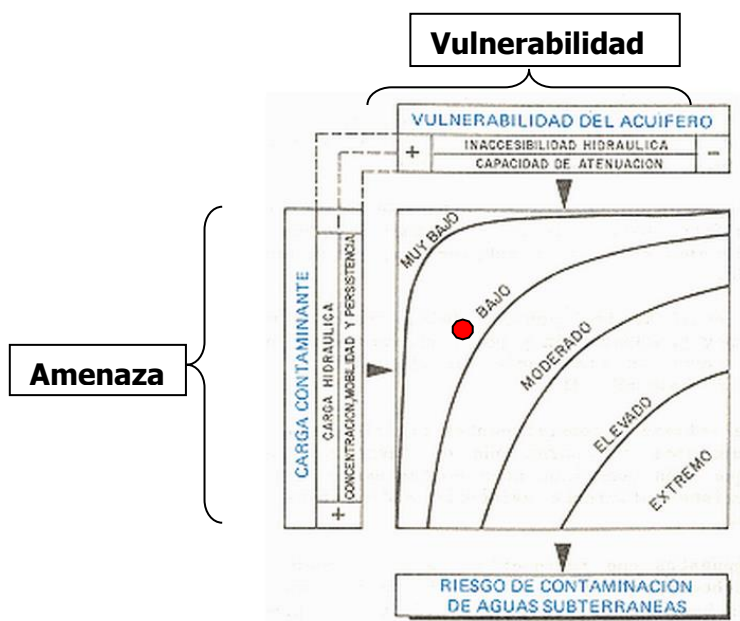


Figura 4.3-86 Relación vulnerabilidad del acuífero, amenaza por carga contaminante y riesgo de contaminación.

Riesgo de contaminación para las unidades: AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ.

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

✓ *Conclusión de la evaluación del riesgo por la realización del vertimiento en suelo*

En el caso del área de influencia del Bloque CPO-5, la vulnerabilidad predominante de las unidades hidrogeológicas es moderada a baja y la amenaza por carga contaminante también es moderada (por vertimiento de aguas residuales tratadas); de esta manera se concluye que el riesgo de contaminación a los acuíferos por los vertimientos realizados sería moderado para las unidades: AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ, de los acuíferos reflejadas en sus valores de vulnerabilidad.

Según lo anterior, las 5 unidades cartográficas son aptas para realizar la actividad pues no existe un riesgo considerable de contaminación a los acuíferos ni al suelo por la realización de la actividad de vertimiento en suelo de aguas residuales domésticas y no domésticas (industriales) tratadas, siempre y cuando, se sigan las acciones de manejo planteadas en la ficha **AB-SU06 Manejo de residuos líquidos** dentro del programa de manejo del recurso suelo CPO-5-AB-SU Programa de Manejo del Suelo operando cada sistema de aspersión y tratamiento de aguas correctamente. Además, se debe monitorear con piezómetros instalados en cada campo de aspersión, la altura de la tabla de agua, de manera que sólo se dispongan aguas residuales cuando el nivel freático se encuentre por debajo de 1,7 m de profundidad.

4.3.3.9.5 Manejo de residuos asociados a la gestión del vertimiento.

El manejo de los residuos asociados a la gestión del vertimiento se realizará de forma integral y en conjunto con los demás residuos generados por las actividades dentro del Bloque CPO-5, las cuales se detallan en el **numeral 4.8 Residuos Sólidos** del presente EIA.

4.3.3.9.6 Descripción y valoración de los impactos generados por el vertimiento y las medidas para prevenir, mitigar, corregir y compensar dichos impactos al cuerpo de agua o al suelo.

De acuerdo con la modelación no se evidencia afectación al recurso suelo ni los acuíferos, sin embargo, para el desarrollo de las actividades de vertimiento a suelo dentro del Bloque CPO-5 y a fin de minimizar el impacto sobre el recurso suelo y aguas subterráneas se seguirán las medidas indicadas en la ficha: AB-SU06 Manejo de residuos líquidos, con su correspondiente ficha de seguimiento y monitoreo a la tendencia del medio. Las medidas allí descritas buscan asegurar el adecuado manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domésticas y no domésticas (industriales) generadas a partir de las actividades en el Bloque CPO-5 y evitar la afectación a los recursos suelo y aguas subterráneas.

Es de aclarar que las actividades relacionadas con la disposición de residuos líquidos tratados al suelo no generarán conflictos de usos del suelo, ya que no pretende modificar el uso del suelo. Esto se sustenta en los siguientes hechos: Las ZODAR hacen parte de la distribución de áreas solicitada para las locaciones y facilidades de producción, por lo tanto, se ubicarán en cumplimiento de la zonificación de manejo ambiental establecida en la licencia ambiental.

4.3.3.9.7 Posible incidencia del proyecto, obra o actividad en la calidad de la vida o en las condiciones económicas, sociales y culturales de los habitantes del sector o de la región en donde pretende desarrollarse, y medidas que se adoptarán para evitar o minimizar efectos negativos de orden sociocultural que puedan derivarse de la misma

De acuerdo con la modelación no se evidencia afectación al recurso suelo y los acuíferos, por lo que no se presentarán conflictos de uso con la comunidad con relación al recurso suelo ni de aguas subterráneas. Sin embargo, dentro del alcance del desarrollo de las medidas de manejo, se cuenta con el programa de manejo del medio socioeconómico, en el cual se incluye el subprograma de manejo CPO5-SE-PIPC Programa de información y participación comunitaria con su ficha CPO5-SE-PIPC01 Información y Participación Comunitaria con el fin de establecer un canal de comunicación efectivo con las comunidades del área de influencia directa del proyecto, con el fin de recepcionar y atender oportunamente inquietudes o reclamos asociados al proyecto; fortaleciendo los procesos de participación ciudadana local y evitando conflictos durante el desarrollo del proyecto.

4.3.3.10 *Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 050 Art. 6*

A continuación, se presentan los requerimientos relacionados en el Decreto 050 del 2018 en su artículo 6, en cuanto a la solicitud del permiso de vertimiento de aguas residuales no domesticas en suelo:

4.3.3.10.1 Línea base del suelo

Tal como se ha expuesto en todo el presente **numeral 4.3.3** la solicitud de permiso de vertimiento se realiza por unidad cartográfica de suelo apta y de interés para el proyecto. Por lo cual la caracterización y línea base de los suelos para satisfacer el decreto 050 del 2018 se realizó por unidad cartográfica por medio del laboratorio CHEMICAL LABORATORY S.A.S. con acreditación IDEAM resolución N° 1042 del 26 de septiembre del 2024 para su análisis de los parámetros solicitados en el presente numeral. La determinación de estas unidades de suelo aptas y de interés para realizar vertimiento a suelo se determinó mediante el monitoreo de las unidades de suelos de interés y aptas para realizar el vertimiento, es así que para satisfacer el ítem de línea base del decreto 050, y los resultados se expusieron en el **numeral 4.3.3.3** del presente capítulo para los parámetros físicos, químicos y biológicos (**Tabla 4.3-12** y **Tabla 4.3-13**), adicionalmente los resultados de los laboratorios originados por Chemilab se encuentran en el **Anexo 4.3-1f_Resultados_lab**.

4.3.3.10.2 Línea base del agua subterránea

De igual forma para la caracterización y línea base de las aguas subterráneas para satisfacer los términos de referencia (HI-TER-1-03) y la Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales, Se seleccionaron 29 puntos, que incluyen 23 pozos con profundidades entre 6,5 y 150 m, dos (2) aljibes someros con profundidades de 8,62 y 9,35 m y cuatro (4) manantiales, los puntos se destinan 11 puntos para abastecimiento público, los demás para uso

doméstico y pecuario, siendo de uso frecuente (productivos – en uso) o de uso ocasional (reserva – sin uso); las muestras se tomaron entre los días 15 al 27 de junio de 2023 en periodo climático lluvioso por el Laboratorio Cima acreditado ante el IDEAM mediante Resolución 0046 del 15 de enero de 2021. Los puntos captan el acuífero de la Formación Guayabo Miembro Superior - intervalos arenoso (N2-Sc-ar) y arcilloso (N2-Sc-arc), los Depósitos de Llanura Aluvial (Q2-Ila), Depósitos de Llanura de Inundación (Q2-III) y Depósitos Aluviales Recientes (Q2-alr). La selección de la red de monitoreo se presenta en el **Anexo 3.2-7d_Selecc_red_monitoreo_asub**. En la **Tabla 4.3-40** y **Figura 3 68** se presenta los puntos monitoreados. Se puede complementar con lo presentado en el Cap 3.2.7 Hidrogeología del presente estudio.

4.3.3.10.3 Sistema de disposición de los vertimientos.

A continuación, se presenta la información concerniente al sistema de disposición de los vertimientos:

- *Modelación numérica del flujo y transporte de solutos en el suelo, teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas, hidrogeológicas, meteorológicas y climáticas, identificando el avance del vertimiento en el perfil del suelo.*

La modelación numérica del flujo y los solutos se realizó por medio del software Hydrus 1-D, para el cual se tuvo en cuenta información agrologica, hidrogeológica y climática, la cual se desarrolló completamente en el **Numeral 4.3.3.9.4**.

- *Análisis hidrológico – Área de vertimiento*

En análisis hidrológico y en general el climático que se realizó para la determinación del diseño del sistema de riego se presentó en el **Numeral 4.3.3.4**, adicionalmente, la determinación del área de vertimiento se presentó en el **Numeral 4.3.3.9**, el cual tuvo en cuenta las características físicas de las unidades cartográficas de suelo incluyendo la capacidad de infiltración determinada por medio de las pruebas de infiltración realizadas en campo y que se presentaron en el **Numeral 4.3.3.5.1**.

- *Descripción del sistema y equipos para el manejo de la disposición al suelo del agua residual tratada.*

Los sistemas y equipos necesarios para la implementación de los sistemas de riego se presentaron en el **Numeral 4.3.3.9** Diseño de los sistemas de riego por aspersión tipo de las unidades de suelo de interés y aptas para vertimiento, en el cual se exponen los componentes típicos de un sistema de riego por aspersión.

- *Determinación de la variación del nivel freático*

Este ítem se presentó en el **Numeral 4.3.3.6**, en el cual se realizó un análisis del nivel freático con base en el capítulo de hidrogeología para el estudio en el área de influencia del EIA Bloque CPO-5.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

➤ *Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos asociados al Bloque CPO-5 se realizó por el método DRASTIC y se presentó en el **Numeral 4.3.3.10.3**.

4.3.3.10.4 Área de disposición del vertimiento

Debido a que en la instancia en la cual se presenta el Estudio de Impacto Ambiental para la evaluación de la solicitud de licencia ambiental del Bloque CPO-5, no se han determinado los lugares específicos donde se realizara el vertimiento, pues solo se proponen unidades cartográficas aptas y de interés para realizarlo, por esta razón el estudio de suelos escala 1:5.000 está fuera del alcance, sin embargo, se realizó un estudio escala 1:25.000 de todo el AI del Bloque CPO-5 el cual es el presentado en el **Capítulo 3, Numeral 3.1.4** Suelos y usos de la tierra. El estudio a escala 1:5000 se presentará en los Planes de Manejo Ambiental específicos cuando se definan las ZODAR a realizar y las áreas en las cuales se implementarán.

4.3.3.10.5 Plan de monitoreo

El plan de monitoreo se presentó en el **numeral 4.3.3.9.6**, el cual se remite a las medidas adoptadas en la ficha de manejo: AB-SU006 Manejo de residuos líquidos con su correspondiente ficha de seguimiento y monitoreo presentadas en el Cap. 8. Dentro de las medidas allí descritas están la realización de pruebas de infiltración en la localización de los ZODAR definitivos que sustenten la capacidad de percolación de los suelos a las ARD y ARnD tratadas, entre otros, los cuales buscan asegurar el adecuado manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domésticas e industriales generadas a partir de las actividades en el Bloque CPO-5 y evitar la afectación a los recursos suelo y aguas subterráneas.

4.3.3.10.6 Plan de cierre y abandono del área de disposición del vertimiento

El Plan de cierre y abandono el cual incluye las áreas de disposición de vertimiento se presenta de forma completa en el Capítulo 10_Plan_Desmantelamiento_Abandono, sin embargo, a continuación, se realiza un esquema de este plan.

➤ *Plan de abandono y restauración para la ZODAR*

Una vez terminado el desarrollo de las actividades operativas definiendo el cierre y abandono del sistema de vertimiento en suelo para los ZODAR implementados dentro del Bloque CPO-5; ONGC VIDESH plantea procedimientos para el dismantelamiento y abandono de equipos, recuperación de áreas intervenidas y cierre del plan de gestión social de acuerdo con sus políticas ambientales. Estos procedimientos son elaborados con el fin de mantener el medio en condiciones similares a las encontradas inicialmente.

Se debe aclarar que ONGC VIDESH logrará esta recuperación ambiental, pretendiendo mantener las condiciones adecuadas en todas las áreas utilizadas para el vertimiento en suelo en el Bloque CPO-5, independientemente del resultado de la actividad.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

De igual forma, el proceso de abandono y restauración está orientado a lograr el restablecimiento de las condiciones de cobertura vegetal y de calidad paisajística preexistente o condiciones similares, para lo cual se adelantarán labores de reconformación morfológica y revegetalización en caso de requerirse, mediante la aplicación de las medidas específicas y el uso de especies vegetales adecuadas. El objetivo de este plan es crear las medidas que permitan devolver el sitio, a las condiciones encontradas a través del mejoramiento de la composición, estructura y función de los diferentes componentes del ecosistema que se vean alterados.

Las actividades propuestas están dirigidas a las áreas intervenidas de forma directa, en los que se tratan de considerar los escenarios más probables, con base en el Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015 y el Decreto 050 del 16 de enero de 2018, como lo estipula y se aprecia en la **Figura 4.3-87**.



Figura 4.3-87 Plan de desmantelamiento y abandono

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

✓ *Objetivos*

- Establecer un plan que permita el desmantelamiento ordenado del proyecto de vertimiento de agua residual doméstica y no doméstica o industrial tratada en suelo, o de sus partes, y la reparación de los efectos causados por las diferentes actividades desarrolladas por el desmonte de estas.
- Definir objetivos de calidad para la recuperación que tiene que adelantar el operador del campo petrolero.
- Dar cumplimiento a la normatividad ambiental vigente refiriéndose al Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con relación al tema de desmantelamiento y abandono.
- Dar cumplimiento Decreto 050 del 16 de enero de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con relación al tema de desmantelamiento y abandono.
- Realizar una caracterización o diagnóstico de los elementos que deben ser objeto de la recuperación, para definir las acciones a seguir de acuerdo con los procedimientos establecidos.
- Plantear estrategias para la recuperación paisajística y del componente agroológico del área intervenida del proyecto mediante la ejecución de procesos de revegetalización y emproadización para acciones de recuperación.
- Ejecutar el cierre del Plan de Gestión Social para el abandono de la infraestructura usada para esta actividad que integre a las comunidades vecinas en un proceso educativo, participativo, comunicativo y de cumplimiento de compromisos entre las partes; además de la atención de inquietudes, pasivos sociales, reclamaciones y/o sugerencias de la comunidad para el cierre del proyecto, direccionando actividades que los sensibilicen y les permitan formular estrategias hacia el fortalecimiento de las actividades económicas tradicionales.

✓ *Selección de alternativas*

Una vez finalizadas las labores de vertimiento en suelo para las ZODAR implementadas dentro del Bloque CPO-5 se debe iniciar la etapa de abandono y recuperación final, en la cual se ejecutarán las labores de desmantelamiento y abandono que tradicionalmente se manejan en la industria petrolera bajo las siguientes opciones (Ver **Tabla 4.3-40**).

Tabla 4.3-40 Labores de desmantelamiento y abandono

Instalaciones	Opciones
Válvulas, accesorios y cableados	Desmontaje y/o venta de los equipos
Equipos auxiliares, Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, campamentos temporales y/o generadores de energía	Se retirarán de los sitios
Tanques de almacenamiento	Manejo para entrega a terceros para reciclaje y/o se retirarán de los sitios
Aspersores	Manejo para entrega a terceros para reciclaje y/o se retirarán de los sitios
Vías de acceso	Adecuación para entrega a la comunidad

Fuente: GessiG SAS, 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

En caso de que alguna estructura construida sea de beneficio para la comunidad y/o para el medio ambiente, no se clausurará ni se demolerá, sino que se propone realizar un acuerdo para entregar estas estructuras bajo responsabilidad, cuidado y mantenimiento de la comunidad, previa verificación por parte de la empresa de las condiciones de limpieza.

✓ *Propuesta final*

La terminación de las actividades de vertimiento en suelo en los ZODAR implementados en el Bloque CPO-5 puede darse por algunas circunstancias, como la terminación por parte de ONGC VIDESH ante la ausencia de buenos resultados (éxito de la actividad), o por finalización del contrato con la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

En este último caso se presenta así mismo dos escenarios, uno relacionado con la no operatividad posterior de las infraestructuras instaladas ante lo cual se deberá hacer abandono definitivo y entrega del área. Por otra parte, si se mantienen operables las infraestructuras, éstas pueden seguir a cargo de ONGC VIDESH en caso tal que el contrato sea extendido, o pasar a manos del estado u otra operadora, ante lo cual se debe garantizar la operatividad de las infraestructuras, las cuales, se localizan dentro del Bloque CPO-5.

✓ *Etapas de adecuaciones y construcción*

El abandono de las áreas intervenidas por las actividades de adecuación y construcción debe incluir la clasificación y manejo de residuos generados y la ejecución de las siguientes acciones:

- Retiro de materiales de construcción sobrantes como: recibos, afirmados, cemento, aceros, maderas, entre, otros.
- Retiro de equipos, maquinaria y herramientas de construcción que ya no son requeridos.
- Desmonte y retiro de instalaciones temporales adecuadas para las labores de la actividad.
- Revisión de taludes para verificar la estabilidad y de las áreas revegetalizadas, de tal forma que, si es necesario, se lleven a cabo ajustes y nuevas empradizaciones donde inicialmente no fueron exitosas.
- Reparación de estructuras o elementos de terceros como cercas, líneas eléctricas, obras de arte y demás, que hayan sido afectados durante las actividades constructivas.
- Finalmente, se lleva a cabo una limpieza general de las áreas intervenidas y retiro de los residuos generados.

✓ *Inventario de áreas intervenidas*

En el abandono de las áreas intervenidas para la construcción y operación del proyecto de vertimiento en suelo en el Bloque CPO-5, se realizará un inventario general que incluya todas las áreas que contengan infraestructura civil, mecánica, petrolera, eléctrica, de apoyo y facilidades, incluyendo las ZODAR construidas durante la operación.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

Se deberán inventariar:

- Las obras que contengan residuos, áreas para almacenaje de residuos sólidos, suelos contaminados, zonas que requieran reacondicionamiento de patrones de drenaje, control de escorrentía, y áreas que requieran de recuperación geomorfológica y estabilidad geotécnica.
- Obras para el transporte de fluidos (agua residual doméstica y no doméstica o industrial tratada) como líneas de flujo.
- Obras mecánicas como manifolds, Medidores Coriolis, etc.
- Identificación de vías y obras complementarias para su mantenimiento, retiro o entrega a la comunidad.
- Facilidades e infraestructura civil asociada (diques, cunetas, zonas de tanques, etc.).
- Infraestructura eléctrica construida para la generación, transferencia y distribución de energía eléctrica para el proyecto.
- Obras relacionadas con las líneas de flujo instaladas.
- Obras civiles asociadas a la construcción, adecuación, mantenimiento de accesos viales del proyecto.

✓ *Obras civiles (cimentaciones, facilidades, infraestructura, etc.)*

Obras civiles asociadas a la construcción, adecuación, mantenimiento de estaciones de tratamiento, locaciones, facilidades, entre otros; los elementos que involucran las labores de restauración en las áreas del proyecto de vertimiento en suelo en los ZODAR implementados dentro del Bloque CPO-5 serán aplicables las actividades de manejo presentadas en la **Tabla 4.3-41**.

Tabla 4.3-41 Infraestructuras predominantes del abandono y restauración en locaciones

Infraestructura	Descripción de actividades
Cimentaciones y/o placas de equipos	Se realizará la demolición de las estructuras en concreto que se encuentren en las áreas de ZODAR o de vertimiento en suelo dentro del Bloque CPO-5, los escombros se llevarán a un sitio designado para tal fin y que cuente con los respectivos permisos vigentes. Las excavaciones realizadas por la demolición serán rellenadas y reconvertidas. El concreto no reforzado podrá ser utilizado en la reconformación de excavaciones y/o como relleno estructural para otras obras.
Cunetas perimetrales	En caso de ser requerido se realiza la demolición de las cunetas perimetrales que estén construidas en concreto y los escombros (RCD) se llevarán a un sitio autorizado por La autoridad Ambiental para finalmente proceder con la reconformación del terreno.
Mallas de cerramientos	Una vez realizado el desmonte de estas, se procederá con su almacenaje en sitios de acopio designados por a ONGC VIDESH para su posterior reutilización o reciclaje.
Facilidades, Campamentos	Se efectúa la limpieza del área, garantizando la no existencia de residuos aceitosos. Se realiza entonces, un análisis con el objeto de definir la implementación de actividades de reforestación en el área, procediendo con las tareas de revegetalización de conformidad con las medidas de manejo establecidas para esta actividad.

Fuente: GessiG SAS, 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

En la infraestructura construida con la finalidad de recolectar y tratar el agua residual no doméstica (industrial), se deben contemplar los manejos descritos en la **Tabla 4.3-42**.

Tabla 4.3-42 Elementos a dismantlar en estaciones de tratamiento de agua residual doméstica y no doméstica (industrial) y otra infraestructura

Infraestructura	Acciones
Equipos	Estos equipos se dismantlan de acuerdo con el inventario realizado previamente por un equipo técnicos que cuente con los permisos e infraestructura necesaria para realizar la labor. El material se almacenará temporalmente en un sitio que se genere para su posterior retiro. Los equipos inservibles serán entregados a terceros autorizados para el reciclaje de las piezas recuperables y chatarrización de las piezas no recuperables
Tanques	Los tanques se dismantlarán y se llevarán a los sitios designados por ONGC VIDESH, los cuales pueden ser predios de su propiedad, estaciones dismanteladas u otras áreas adecuadas para tal fin, posteriormente se decide el destino final de los tanques, ya sea para chatarrizarlos o utilizar en los sitios donde el crea conveniente.
Tuberías y aditamentos (Válvulas)	Se realiza el drenaje y limpieza de las tuberías, se dismantlan y se almacenan. Su disposición final podrá ser a través de un tercero autorizado, reutilización en estaciones existentes o proyectadas pertenecientes a ONGC VIDESH. En caso de que estos elementos no se puedan reutilizar, se almacenaran en sitios adecuados en el Bloque para su posterior manejo y disposición. Los residuos resultantes de los procesos de limpieza de tubería serán entregados a terceros autorizados para su manejo y la tubería será reutilizada por ONGC VIDESH. Se realizará una revisión y un inventario de accesorios como válvulas, cheques, piezómetros y todos los elementos asociados a las líneas, para tener un control al momento de dismantlarlos. Estos serán almacenados en un sitio autorizado por ONGC VIDESH y podrán ser reutilizados por la empresa.
Sistema de abastecimiento de agua residual doméstica y no doméstica (industrial) tratada	Previo al inicio de esta actividad, se consultará con la comunidad y autoridades si este recurso puede ser utilizado por las comunidades aledañas al área de estudio, si es así se hará entrega soportada mediante acta en la cual se anotará el estado de la infraestructura entregada y se aclara que el mantenimiento de los equipos y el tratamiento del agua estará a cargo de los entes municipales y/o JAC.
Estructuras Metálicas	Se incluyen acá las casetas de bombas principales, secundarias, sistemas contra incendio y todas las estructuras construidas con perfiles metálicos, y las que se encuentren en estado de abandono o desecho, elementos inoperantes. Etc. Estas se dismantlarán y los segmentos serán almacenados en el sitio dispuesto por ONGC VIDESH, ya sean predios de su propiedad, en bodegas, en acopios o en sitios adecuados dentro de las Estaciones
Estructura en concreto	Se dismantlará la infraestructura en estas áreas con el fin de reutilizar los materiales en otras instalaciones o se donaran a la comunidad que lo requiera con acta de entrega. Se demolerán todas las estructuras en concreto como, casetas, placas de equipos, bases de tanques, diques de contención, cunetas y todas las estructuras que en concreto que no posea material aprovechable, los escombros será dispuestos en el sitio autorizado por la Autoridad Ambiental. El concreto no reforzado podrá ser utilizado en la reconformación de excavaciones como piscinas y contrapozos. En caso de presentarse contaminación con hidrocarburos sobre concreto, estos residuos deberán ser entregados a terceros autorizados.
Campo de aspersión	Se hará limpieza de estos y se retirará la infraestructura existente (líneas de flujo, aspersores, etc.) en caso de requerirse.

Fuente: GessiG SAS, 2026

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

✓ *Infraestructura asociada al suministro de energía eléctrica*

Para el abandono de este tipo de infraestructura las acciones a desarrollar durante el proceso de abandono y restauración de áreas intervenidas por esta actividad son las siguientes:

Se desmantelarán y se almacenarán los equipos y accesorios en un área de acopio definida por ONGC VIDESH para su almacenaje y/o reutilización en otros proyectos, en casos de que los equipos y accesorios no puedan ser reutilizados, estos serán desmantelados, las partes reciclables serán entregadas a un tercero para su reincorporación a la cadena productiva y los elementos inservibles serán entregados a un tercero autorizado para su manejo y disposición final. En el caso que esta infraestructura sirva a la comunidad se hará entrega a las autoridades municipales (Alcaldía y JAC) correspondientes previo acuerdo de responsabilidad y con un acta de soporte.

✓ *Limpieza general y reconfiguración de áreas*

Se debe realizar limpieza general de las áreas, lo cual consiste en retirar todos los materiales que aún quedan después del desmantelamiento. Los suelos inertes serán dispuestos en las ZODME aprobados para el Bloque CPO-5. La misma inspección final servirá para detectar efectos ambientales producidos por la actividad y para evaluar la efectividad de las medidas de restauración realizadas.

En el área se realizará la recuperación morfológica, de tal manera que permita la conducción de aguas lluvias hacia los drenajes naturales, con el fin de evitar encharcamientos. De ser necesario, se construirán obras geotécnicas e hidráulicas para el control de procesos erosivos.

✓ *Manejo de pasivos ambientales y sociales*

Una vez terminadas las actividades de abandono, desmantelamiento y restauración final, se elaborará un inventario minucioso de los pasivos ambientales que posiblemente puedan generarse, tales como: contaminación en zonas de manejo de residuos líquidos y sólidos, infraestructura por desmantelar, estructuras enterradas, áreas geotécnicamente inestables, entre otros, igualmente se debe realizar el mismo inventario para los pasivos sociales, para lo cual se debe revisar cada uno de los compromisos pactados con la comunidad, propietarios, autoridades municipal y actas, entre otros. Una vez definido todos los pasivos tanto ambientales como sociales se debe generar un programa de monitoreo y seguimiento, estableciendo las acciones y responsabilidades pertinentes para su resolución final.

De igual manera, se verificará el cumplimiento de los requerimientos realizados por la Autoridad Ambiental mediante los actos administrativos que hayan surgido a lo largo del periodo de operación del Bloque CPO-5; todo ello con el fin de establecer el plan de acción que permita dar cumplimiento y cierre definitivo a las requisiciones que sobre esta materia se encuentren aún pendientes.

✓ *Consideraciones adicionales para la restauración de áreas intervenidas*

La restauración de un área intervenida es el resultado de la realización de las obras que aseguran el control de la erosión, la restitución de los flujos de agua y el mantenimiento de las obras

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

realizadas para mitigar el impacto ambiental y/o recuperar el área y la cobertura vegetal que ha sido modificada o alterada por construcciones civiles: vías, facilidades y demás estructuras.

El proceso de restauración comprende varias etapas:

- Adecuación y manejo del área intervenida que consiste en el retiro de los elementos que no formen parte integral del paisaje.
- Realización de las obras civiles de restauración que garanticen la estabilidad y el equilibrio geofísico del área intervenida.
- Recuperación de la cobertura vegetal garantizando la correcta restauración de las áreas intervenidas.
- Adelantar con posterioridad las actividades de control y monitoreo que permitan asegurar el éxito en el proceso de restauración.

✓ *Uso final del suelo posterior al desmantelamiento y abandono*

El desarrollo de cualquier actividad que implique la remoción parcial o total de suelo modifica el estado natural de este recurso, la recuperación del suelo en las etapas finales del proyecto o de abandono, se deben orientar a realizar manejos que puedan mitigar los efectos negativos que se hallan realizado sobre el suelo, pues se podrían haberse presentado deterioros físicos, químicos y biológicos. Así que con el uso final establecido al recurso se busca recuperar el estado inicial, su morfología, la capacidad de sostener vegetación, retención de humedad y servir de hábitat para la fauna edáfica.

Durante cualquier proceso, dentro de las actividades de ingeniería, y en la industria petrolera en campo, se presentan afectaciones en los suelos de diferente tipo, donde se presentan cambios en sus condiciones naturales, que, dependiendo de la actividad específica, en ocasiones se pueden considerar severas, cuando se presentan estas situaciones y llegando al final de su explotación o de abandono, es necesario recuperar lo afectado por esta actividad, sobre todo en los suelos.

Para lograr el mejoramiento de los suelos, se requerirá de tiempo en su recuperación, además de realizar prácticas para su adecuación mejorando sus propiedades físicas y químicas, que son las básicas en las características de la producción agrosilvopastoril que requiere la zona.

Se requiere de la participación de la mano de obra, involucrándola en los procesos de recuperación, mediante inducciones prácticas, talleres, ya que ellos serán los que deberán seguir y realizar la extensión, en pro de la conservación del recurso suelo para el desarrollo sostenible de la región.

La adecuación de los suelos es primordial y previa a la recuperación ambiental, para que así esta tenga éxito en la recuperación integral de toda la zona. Para la adecuación se requiere determinar los requerimientos en abonos, fertilizantes y enmiendas para el desarrollo de la revegetación, de maquinaria, equipos y mano de obra para la adecuación y aplicación de las sustancias requeridas por los suelos.

Debido a que, para la solicitud del permiso de vertimiento en suelo se determinaron 5 unidades cartográficas aptas y de interés para implementar las ZODAR (AVC, RVG, PVB, PVA y LVJ), se debe tener en cuenta que, dentro de las unidades cartográficas aprobadas por parte de la autoridad ambiental para realizar el vertimiento se utilizarán áreas que no tengan coberturas asociadas a actividades de conservación, forestal o de protección, además, que no se implementaran ZODAR en rondas hídricas que tengan características de inundabilidad, además, se emplearán zonas que tengan pendientes menores al 12% (fases a, b, c y d) con el fin de reducir el riesgo de generar procesos de erosión; adicionalmente, se tienen que excluir las unidades hidrogeológicas con vulnerabilidad muy alta, al igual que zonas que presenten niveles freáticos superficiales y finalmente se respetaran las rondas a la infraestructura social existente.

Teniendo en cuenta lo anterior, los usos que se deben implementar posterior al desmantelamiento y abandono de las áreas utilizadas para la implementación de las ZODAR, deben estar encaminados a la reutilización de las áreas en los usos que se tenían antes de ser intervenidos por el proyecto, y que no atenten contra los usos establecidos como reglamentarios por los instrumentos de ordenamiento territorial, por lo cual, se cruzaron las unidades cartográficas aptas y de interés para realizar vertimiento con los usos actuales que se tienen implementados para las UCS solicitadas para el permiso de vertimiento dentro del Bloque CPO-5 y se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 4.3-43 Usos actuales presentes en las unidades cartográficas de suelo aptas, de interés y solicitadas para realizar vertimiento dentro del Bloque CPO-5

Uso actual	Área (ha)
Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	49,70
Cultivos permanentes intensivos (CPI)	1130,25
Cultivos permanentes semi-intensivos (CPS)	23145,41
Cultivos transitorios semi-intensivos (CTS)	3775,70
Pastoreo extensivo (PEX)	55415,42
Producción-protección	2244,49
Sistema forestal productor (FPD)	4493,54
Sistemas forestales protectores (FPR)	1569,34

Fuente: GessiG SAS, 2026

Con lo cual se concluye que posterior al cierre y abandono de las áreas utilizadas como ZODAR, se tendrán que acondicionar los lugares para la implementación de las siguientes actividades: actividades ganaderas de tipo Pastoreo extensivo o en las áreas que se permita, cultivos transitorios o permanentes y sistemas forestales productores, los cuales son los usos mayoritarios y donde se planteara la implementación de las ZODAR.

4.3.4 Inyección y reinyección de agua

La Resolución 1690 del 24 de diciembre de 2015 expedida por el ANLA, que modifica la Resolución 600 del 31 de julio de 2012 del proyecto de Área de Perforación Exploratoria Bloque CPO-5; en su Artículo Segundo autoriza la perforación, adecuación y operación de hasta un (1) pozo inyector

en cada una de las plataformas autorizadas para un total de quince (15) pozos inyectoros, para la disposición de agua de formación generada en el proyecto, mediante reinyección en las unidades C1, C3, C5 y C7 de la Formación Carbonera en un caudal máximo de 20.000 BWPD y la instalación de las facilidades de reinyección requeridas. A la fecha el proyecto, no ha realizado reinyección en los pozos autorizados, con el agua tratada se hace riego en vías para control de polvo y también son entregadas a terceros autorizados.

En la etapa de Desarrollo (Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5) la compañía ONGC VIDESH LIMITED SUCURSAL COLOMBIA - ONGC-VL, contempla implementar la actividad de reinyección de agua asociada a producción, para disposición final en las formaciones Une, Guadalupe, Mirador y Carbonera (Miembros C1, C3, C5 y C7) e igualmente, planea reinyectar/inyectar agua asociada a producción tanto del Bloque CPO-5, como de terceros autorizados, para recobro mejorado en las mismas unidades en el caso que resulten productoras. No obstante, la ejecución de la actividad dependerá de los resultados que se obtengan con el avance de la perforación, del comportamiento del yacimiento y de las necesidades que vayan surgiendo del desarrollo de este.

Por lo tanto, ONGC VL, solicita a la autoridad ambiental, se amplie la actividad de inyección de agua autorizada mediante la Resolución 1690 del 24 de diciembre de 2015, en número de pozos, volumen de inyección y unidades receptoras, pasando de 15 pozos, a máximo 100 pozos inyectoros (dos pozos por cada plataforma), de 20.000 BWPD máximo por pozo, a un caudal por pozo que se estime como resultado de las pruebas de inyectividad y en función del permiso recibido por la Autoridad técnica competente (Ministerio de Minas y Energía, o Agencia Nacional de Hidrocarburos) sin sobrepasar la presión de fractura o la máxima presión admisible en cabeza (MAASP), el cual se estima será de hasta 20.000 BWPD en cada uno, para disposición o recobro mejorado en las formaciones Une, Guadalupe, Mirador y Carbonera (Miembros C1, C3, C5 y C7).

Se solicita que se permita la ubicación de dos (2) pozos inyectoros por plataforma, que podrían ser nuevos o convertirse a inyectoros, pozos que hayan resultado secos o con muy baja productividad. La inyección se podría hacer a través de una sola zona o múltiples zonas (inyección selectiva), o sea, el completamiento puede variar desde completos, sencillos o selectivos.

En la **Tabla 4.3-44** se presenta las solicitudes específicas para la actividad de inyección / reinyección de agua para disposición y recobro mejorado.

Tabla 4.3-44 Solicitudes específicas para la actividad de Inyección / reinyección de agua asociada para disposición y recobro mejorado Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5

Especificidad para actividades de inyección- reinyección	
Actividad Solicitada	Inyección / reinyección de agua para disposición y recobro mejorado
Fluido a Inyectar-Reinyectar	Agua asociada a producción (incluye agua de formación)
Proveniencia del fluido	Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5 y/u otros Bloques Licenciados
Formaciones Objeto de Inyección / reinyección de agua para disposición y recobro mejorado	Formaciones Une, Guadalupe, Mirador y Carbonera (Miembros C1, C3, C5 y C7)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

Especificidad para actividades de inyección- reinyección	
Cantidad máxima de pozos inyectores de agua	100 pozos (incluidos 15 pozos ya autorizados)
Volumen máximo de aguas a inyectar por pozo	Hasta 20.000 BWPD o el otorgado por la Autoridad técnica competente (Ministerio de Minas y Energía, o Agencia Nacional de Hidrocarburos).
Tipo de pozo a utilizar como inyector	Pozos nuevos perforados para dicha actividad, pozos productores o pozos secos convertidos a inyectores.
Localización de los pozos inyectores	Dentro de las 50 plataformas (8 existentes, 2 próximas a ser construidas y 40 proyectadas) de acuerdo con las necesidades del proyecto
Condiciona	Las actividades de inyección / reinyección de agua para disposición y recobro mejorado conforme a las disposiciones y autorizaciones de la normatividad, sin superar los volúmenes y las presiones autorizadas

Fuente: GessiG S.A.S., 2026

Con las pruebas de inyectividad en las formaciones Mirador y Une realizadas en los pozos Yarico-1X y Sol-1 en el A. P. Gangotri, que anteriormente pertenecía al Bloque CPO-5 y que se encuentra ubicado al noroeste del área en evaluación, se ha recolectado información acerca del potencial de inyectividad de las unidades en la zona que por su cercanía y continuidad permite ampliar hacia el Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5. Con la información base de las pruebas de inyectividad y con simulaciones de flujo (Software PIPESIM), se estimaron caudales de inyección entre 12.000 y 25.000 BWPD⁶ por pozo para la Formación Mirador, entre 23.000 y 25.000 BWPD para la Formación Une y entre 2.500 a 24.500 BWPD para la Formación Guadalupe y para los miembros arenosos de la Formación Carbonera los caudales de inyección pueden variar entre 9.000 a 21.000 BWPD estimados con información secundaria de pruebas de inyectividad de las unidades en otros campos dentro de la misma cuenca geológica, lo que muestra en general que todas las unidades propuestas tiene excelentes condiciones de recepción.

En el Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5 se tienen muy buenas condiciones geológicas que aseguran desconexión hidráulica entre las unidades receptoras y los acuíferos usados por la comunidad y adicionalmente mediante el análisis de integridad individual para cada pozo se garantizará la seguridad operacional de la inyección de agua, para no poner en riesgo los acuíferos someros usados por la comunidad o que pudieran usarse a futuro, ni a otra formación geológica.

Dicho análisis de integridad comprende la evaluación de:

- Barreras primarias: El revestimiento de cada sección del pozo y su calidad del cemento.
- Barreras secundarias: Rangos operacionales de la sarta de inyección, del cabezal de superficie, los equipos y accesorios instalados en el pozo, y también el fluido de completamiento dispuesto dentro del pozo.
- Barreras terciarias: Equipos adicionales instalados para el aseguramiento operacional (válvulas de superficie y subsuelo).

⁶ Barrels of water per day - Barriles de agua por día

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5	
	CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	

- Análisis petrofísico: Estudio de parámetros de las formaciones expuestas, como; permeabilidad, porosidad, presión de fractura, espesor y presión de formación.
- Plan de aseguramiento: Establece los criterios de operación e inspección de los pozos durante su vida operativa.

Las condiciones geológicas y el análisis de ubicación e integridad de cada pozo también mitigarán considerablemente el riesgo de microsismicidad inducida por la inyección de agua.

Se espera que los pozos propuestos tengan suficiente capacidad de admisión y puedan recibir los caudales que requiere el proyecto, no obstante, el caudal final de inyección estará supeditado a los resultados de admisión que muestre la prueba de inyectividad específica de cada pozo inyector, con la limitante de presión que no sobrepase la presión de fractura.

La cantidad de agua requerida para el recobro mejorado dependerá de la presión del yacimiento y su comportamiento durante la explotación, por lo tanto, no se conoce el caudal exacto de agua que demandará el yacimiento para este fin. No obstante, se contempla el uso principalmente de agua asociada a producción del mismo Proyecto de Desarrollo Bloque CPO-5 y si es necesario, se complementará con otras fuentes externas, mediante la adquisición de agua de campos petroleros aledaños que cuenten con autorización para entrega a terceros ya sea de la misma infraestructura operada por ONGC VIDESH o alguno de sus socios.

En el **Anexo 4.3-2_Inyeccion** se presenta el detalle del documento soporte de la actividad de reinyección/inyección, aunque no existen términos de referencia específicos, se presenta información de las condiciones y el proceso a implementar tomando como guía los apartes considerados en **numeral 4.3.** (Vertimientos – Disposición de aguas mediante inyección) de los términos de referencia para explotación de hidrocarburos HI- TER 1-03 (2010), los cuales han sido usados con anterioridad para solicitud de permiso de vertimiento, también se tiene en cuenta los Términos de referencia M-M-INA, 2014, en relación con la evaluación del análisis de riesgo de generar sismicidad inducida por inyección de fluidos.

4.3.5 Evaporación mecánica

Se solicita incorporar el tratamiento y la disposición final de las aguas residuales domésticas, industriales y de producción o formación mediante sistemas de evaporación (evaporación mediante tanques australianos y evaporación mecánica), al interior de las locaciones multipozo y CPF, en un caudal máximo de 6.000 BWPD, garantizando los siguientes parámetros: Temperatura mínima: 21.4°C, (3) Temperatura máxima: 33.2°C, (4) Humedad Relativa Mínima: 70% y (5) Humedad Relativa Máxima: 86%.

A continuación, se describen los detalles técnicos para la realización de dicha disposición.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

4.3.5.1 Objetivo

Implementar de manera eficiente el método de Evaporación Mecánica para llevar a cabo el tratamiento y la disposición final de las aguas residuales domésticas, industriales y de producción o formación en las operaciones del Bloque CPO-5. Este proceso implica la utilización de evaporadores mecánicos de última generación para atomizar el agua y lograr su evaporación controlada, asegurando así una gestión adecuada y sostenible de los recursos hídricos asociados a las actividades operativas del proyecto.

4.3.5.2 Descripción del proceso

La Evaporación Mecánica se da producto del impacto mecánico que se ejerce sobre una masa de agua que fluye constantemente contra el alabe de un rotor que gira a una velocidad de tres mil seiscientos (3.600) revoluciones por minuto. El choque que ocurre entre la masa de agua y el rotor es inelástico, lo cual tiene como consecuencia la atomización del agua en partículas de tamaño controlado. La aplicación de esta tecnología consiste en atomizar el agua en la atmósfera circundante, mediante el uso de equipos de última tecnología denominados Evaporadores Mecánicos, logrando una eficiencia hasta 14 veces mayor que la eficiencia de la evaporación natural del agua a temperatura ambiente.

La Evaporación Mecánica no requiere ningún tipo de calentamiento (como en los sistemas de evaporación térmica convencionales) y se genera debido a las condiciones termodinámicas favorables que tiene el medio ambiente circundante. El proceso de evaporación ocurre gracias a la capacidad del evaporador para atomizar el agua en millones de microgotas (gotitas de tamaño controlado en micrómetros), aumentando así el área superficial de la masa de agua millones de veces. Por ejemplo, un galón de agua atomizado en microgotas de un tamaño promedio de 150 μm , cubrirá la extensión de un área aproximada de 90 metros por 100 metros (9000 m^2). Como la evaporación natural ocurre cuando existe aire con déficit de humedad ($<100\%$) y una superficie de agua expuesta para saturarlo, este proceso junto con otros factores como la temperatura y la velocidad del viento, promueven el intercambio del agua a disponer con una gran masa de aire seco, haciendo posible que a temperatura ambiente el agua pase de fase líquida a fase de vapor antes de caer a la superficie.

El agua que se evaporará mediante la implementación de este sistema ya habrá sido tratada para eliminar los contaminantes (ver **numeral 4.3.1.5.2**).

La evaporación mecánica se da como producto de la atomización del agua en partículas de tamaño controlado. La aplicación de esta tecnología consiste en “pulverizar” el agua en la atmósfera circundante, mediante el uso de equipos de última tecnología denominados evaporadores mecánicos, logrando una eficiencia hasta 14 veces mayor que la eficiencia de la evaporación natural del agua a temperatura ambiente.



Figura 4.3-88 Diseños convencionales de evaporadores mecánicos

Fuente: ONGC VL, 2026

El sistema de evaporación mecánica está diseñado para evaporar grandes volúmenes de agua, en la **Figura 4.3-89** se muestra la capacidad de evaporación en función del déficit de humedad relativa. Para las condiciones encontradas a lo largo del territorio, se puede tomar como promedio un déficit de humedad del 25 %, y por lo tanto la capacidad de evaporación de este sistema es de alrededor de 1.500 BBL por cada millón de pies cúbicos de aire seco disponibles. También se puede observar que la capacidad de evaporación disminuye en un 3,5% cuando la humedad relativa del aire aumenta en un 1%.

Tasa de Evaporación mecánica del Agua
@ 0.65 MMSCF de Aire Seco

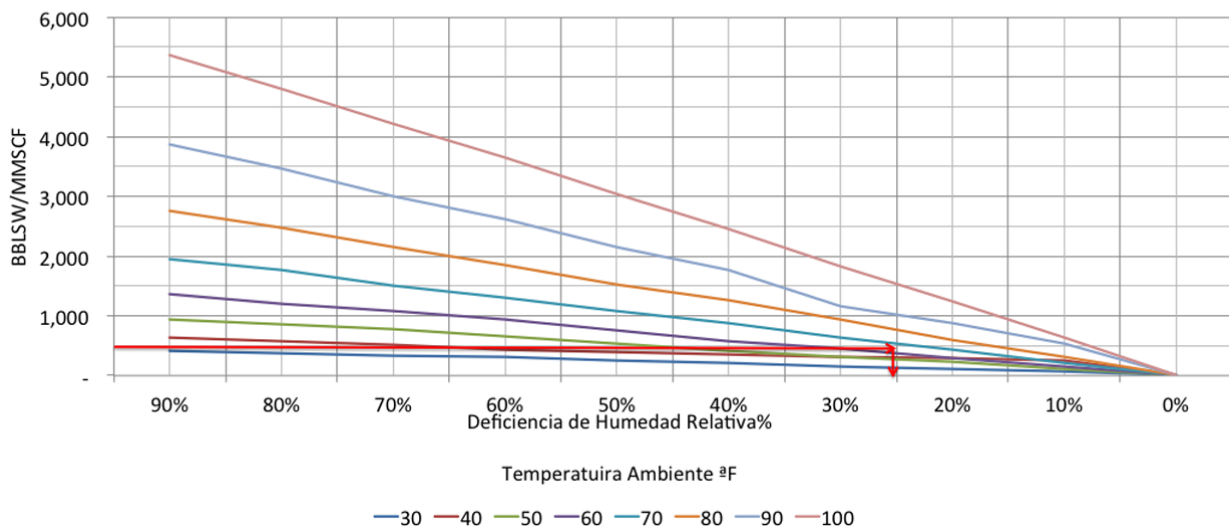


Figura 4.3-89 Capacidad de Evaporación Mecánica a 1 MMSCF de aire seco en función del déficit de humedad relativa

Fuente: ONGC VL, 2026

El proceso de evaporación mecánica varía de acuerdo con las condiciones del medio ambiente circundante, tales como la temperatura del aire, la velocidad del viento, el brillo solar, el porcentaje de humedad relativa, la lluvia, etc. La efectividad de la evaporación mecánica radica en ejercer un control constante y en tiempo real de las condiciones del proceso, para maximizar la eficiencia de la evaporación bajo cualquier configuración de las variables atmosféricas del medio circundante sin elevar la temperatura del agua. Este control constante mencionado anteriormente, se logra regulando las variables de control del equipo de evaporación según las condiciones del ambiente que se supervisan a través de una estación meteorológica que mide permanentemente las condiciones climáticas.

Para optimizar el uso de la energía en condiciones climatológicas adversas y también para evitar los procesos de deriva, este software está equipado con algoritmos matemáticos que calculan la cantidad de agua que el aire puede recibir en un momento dado y dinámicamente ajustan la tasa de flujo de agua de tal manera que sólo la cantidad de agua que puede ser evaporada sea levantada por la bomba alimentadora.

Se aclara que el agua proveniente del pretratamiento se encontrará en condiciones inferiores a las permitidas en la licencia ambiental (Ver **Tabla 4.3-45**) y en las normas que rigen la disposición final de aguas para el Bloque CPO-5 o en su defecto, aquellas que la modifiquen.

Tabla 4.3-45 Parámetros mínimos establecidos para vertimiento en la resolución 0631, decreto 1076

Parámetros	Resolución 0631(2015) , Decreto 1076 (2015)
pH	5 a 9
DBO	70-90 mg/L O ₂
DQO	150-180 mg/L O ₂
SST	70-90 mg/L
SSED	1-5 ml/L
Grasas y aceites	10-20 mg/L
Sulfato	300-400 mg/L
Cobre	1.0-3.0 mg/L
Cloruro	250 mg/L
Hierro	3 mg/L
Nitrato	10 mg/L
Nitrito	1.0 mg/L
Fenoles	0.002-0.2 mg/L
Zinc	3-15 mg/L
Níquel	0.5-2.0 mg/L
Alcalinidad TA	Análisis y Resultados
Cianuro total	0.2 -1.0 mg/L
Dureza total	Análisis y Resultados

Fuente: ONGC VL, 2026, con base en resolución 0631, decreto 1076

4.3.5.3 Principios físicos involucrados en el proceso de evaporación mecánica

Para comprender el proceso de Evaporación Mecánica del agua producida y de esta manera corroborar que los impactos generados al medio ambiente son nulos, se deben conocer los principios termodinámicos y cinéticos que gobiernan el proceso de evaporación de una gota de agua. Para comenzar se debe saber que la tasa de evaporación del agua varía con respecto a distintas condiciones externas como la temperatura, la presión atmosférica, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento, pero también varía con respecto a condiciones internas del sistema que pueden ser controladas como el caudal a disponer y el tamaño de las gotas generadas. La variable que se debe controlar para dirigir adecuadamente el proceso de evaporación es el tamaño de las gotas, pues con un tamaño menor, el área superficial expuesta que tiene la masa de agua a evaporar será mayor y por lo tanto su evaporación será mucho más rápida.

El proceso de Evaporación Mecánica a diferencia de otras aplicaciones de riego por aspersión o atomización, permite obtener una distribución de tamaño de gota uniforme como la línea azul que se muestra en la **Figura 4.3-90**, esta distribución es controlada automáticamente por el software que controla el proceso, variando el flujo de entrada de agua y la velocidad de rotación del alabe, para obtener la distribución de tamaño de gota deseado y así optimizar el proceso.

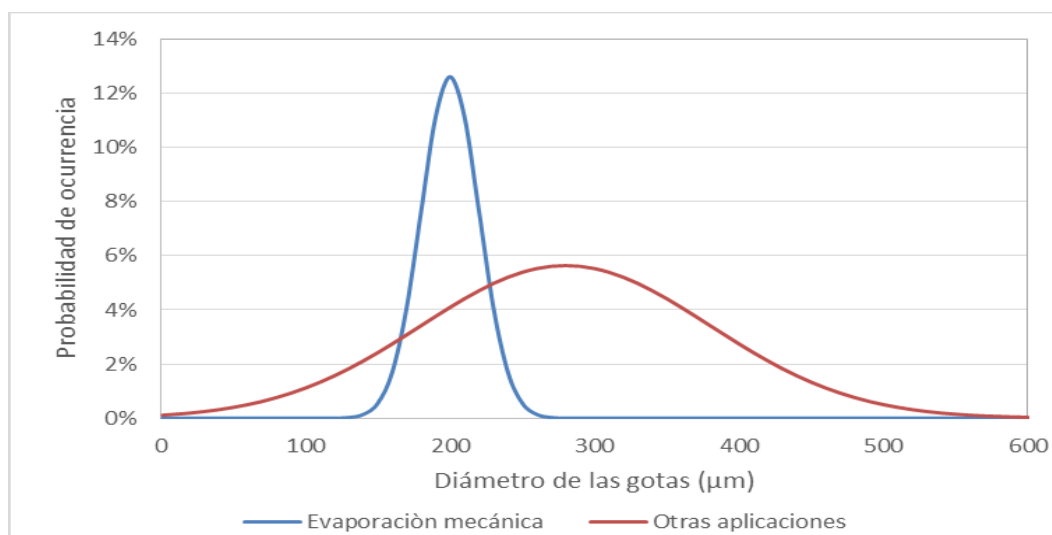


Figura 4.3-90 Distribución del tamaño de gota generado en la evaporación mecánica

Fuente: ONGC VL, 2026

4.3.5.3.1 Sedimentación de las gotas a través del aire

El proceso de caída de una gota de agua atomizada se puede entender como un proceso de sedimentación de una partícula a través de un medio viscoso y por lo tanto se puede evaluar con el llamado número de Reynolds (Re). Para números de Reynolds bajos (flujos de baja velocidad relativa), el flujo del fluido alrededor del objeto es laminar: consiste en láminas imaginarias de fluido que fluyen suavemente alrededor del objeto a distintas velocidades.

Una perturbación accidental en el campo de flujo disminuirá y desaparecerá en el flujo laminar. La resistencia o “fuerza de arrastre” está determinada por la fricción entre estas capas de fluido. Para un objeto esférico, la fuerza de arrastre es descrita por la ley de Stokes, esta depende de la viscosidad del aire, el tamaño de la gota y la velocidad relativa del aire con respecto a la gota.

En un régimen de flujo laminar donde se cumple la ley de Stokes la velocidad de sedimentación ($v_{s,St}$) está determinada por la siguiente ecuación:

$$v_{s,St} = \frac{\rho_d g D^2}{18\eta_a^2} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

ρ_d : Densidad de la gota
 g : Aceleración gravitacional
 D : Diámetro de la gota
 η_a : Viscosidad del aire

A medida que la velocidad de la gota aumenta, el número de Reynolds también aumenta y las pequeñas perturbaciones en el flujo laminar no desaparecerán. Por el contrario, las perturbaciones se incrementarán y eventualmente se perderá toda la estructura laminar del flujo, con excepción de una capa limítrofe laminar en la superficie de la gota. En ese momento el flujo será considerado como turbulento y la fuerza de arrastre estará determinada principalmente por la fricción en las partes turbulentas del aire.

En estas condiciones de flujo, la ley de Stokes no es aplicable. Por lo tanto en un régimen de flujo turbulento la fuerza de arrastre se describe introduciendo un “coeficiente de arrastre”, que se ha determinado empíricamente para gotas de tamaño micro sedimentándose a través del aire (Holterman, 2003) y tiene la siguiente expresión:

$$C_d = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde las constantes a, b y c tiene valores de 24, 0,32 y 0,52. Esta ecuación se ajusta a los datos experimentales en un rango de número de Reynolds entre 0, 25 y 1000. Teniendo en cuenta este coeficiente, se obtiene la velocidad de sedimentación para una gota de agua que cae a través del aire en un régimen de flujo que no sigue la ley de Stokes, el cual es el régimen de flujo que se presenta usualmente en el proceso de Evaporación Mecánica.

$$v_s = \sqrt{\frac{4\rho_d g D}{3\rho_a C_d}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aire

En la **Figura 4.3-91** se muestran las velocidades de sedimentación en función del diámetro de las gotas de agua generadas, calculadas a partir de las ecuaciones 1 y 3, la línea azul muestra la velocidad de sedimentación si la ley de Stokes fuera aplicable, y la línea roja muestra la velocidad de sedimentación considerando el coeficiente de arrastre y se ajusta al modelo experimental.

Claramente para gotas con diámetros mayores a 50 μm no es aplicable la ley de Stokes. Por lo tanto, en el rango de trabajo de la Evaporación Mecánica (150 μm y 250 μm , cuadro azul), la velocidad de sedimentación de las gotas está entre 0,5 y 1 m/s aproximadamente, de acuerdo con el modelo empírico ajustado a un flujo turbulento (Ec.3).

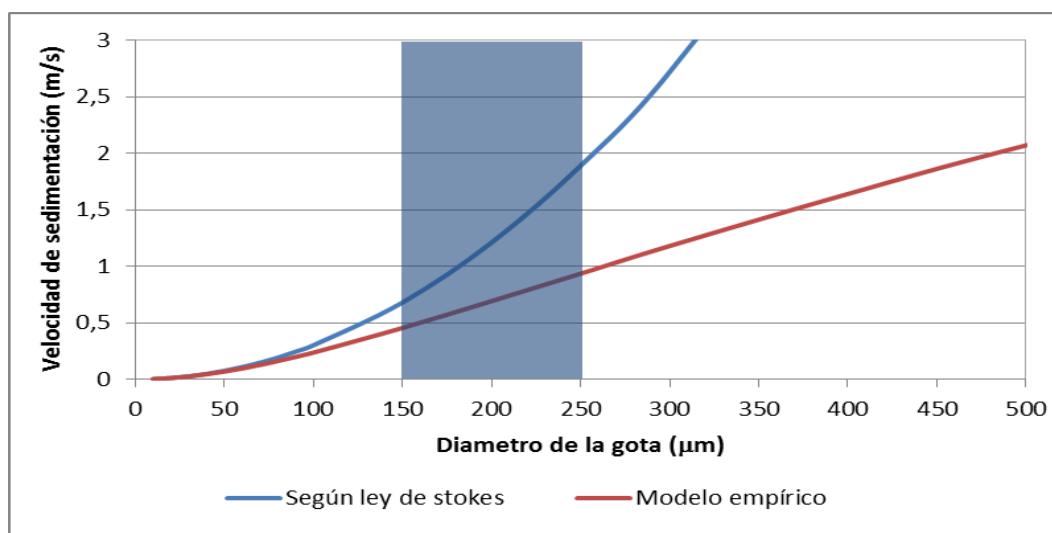


Figura 4.3-91 Velocidad de sedimentación para una gota de agua en función de su tamaño

Fuente: ONGC VL, 2026

Usualmente se considera como regla general, que las gotas que tienen una velocidad de sedimentación menor al 10% de la velocidad promedio del viento en la zona son propensas a sufrir el fenómeno de deriva (consideración que servirá para evaluar el impacto ambiental del proceso más adelante). De acuerdo con la **Figura 4.3-91** se puede inferir que la velocidad máxima del viento a la que se puede realizar el proceso de aspersión mecánica sin que se presente una deriva significativa es de aproximadamente 8 m/s, pues un 10% serán 0,8 m/s, la cual es la velocidad de sedimentación límite que el proceso puede considerar, teniendo en cuenta que el tamaño de partícula máximo promedio es de aproximadamente 250 μm .

4.3.5.3.2 Distancia de frenado de una gota

Cuando el agua impulsada impacta con el alabe del rotor, la energía generada en el choque inelástico proyecta la gota atomizada permitiéndole viajar cierta distancia horizontal con una

velocidad determinada, hasta su detención inminente debida a la fricción ejercida por el aire. Esta distancia se conoce como la distancia de frenado. Para evaluar la distancia horizontal máxima que podría viajar una gota de agua atomizada (sin la acción ejercida por el viento en la zona), se considera que la gota sale impulsada horizontalmente del alabe con una velocidad inicial v_0 , y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$s_e = v_0 \tau_{avg} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde s_e es la distancia de frenado y τ_{avg} es el tiempo de relajación promedio de la gota, el cual se puede calcular fácilmente a partir de la velocidad de sedimentación v_s mencionada anteriormente con la siguiente expresión:

$$\tau_{avg} = \frac{v_s}{g} \quad (\text{Ec.5})$$

En la **Figura 4.3-92** se muestra el comportamiento de la distancia de frenado en función del diámetro de gota, para distintas velocidades iniciales. En el caso específico del proceso de Evaporación Mecánica, el impacto con el alabe puede generar velocidades iniciales de hasta 20 m/s, para gotas de diámetros cercanos a 500 μm que se pueden generar cuando el sistema de evaporación no produzca una distribución uniforme en el tamaño de partícula, la distancia máxima de frenado que tendrán estas gotas será de aproximadamente 3,5 metros. Esto implica que el área requerida por un evaporador para efectuar el proceso ser de 3,5 m de radio (distancia tenida en cuenta para realizar el diseño conceptual del área de evaporación).

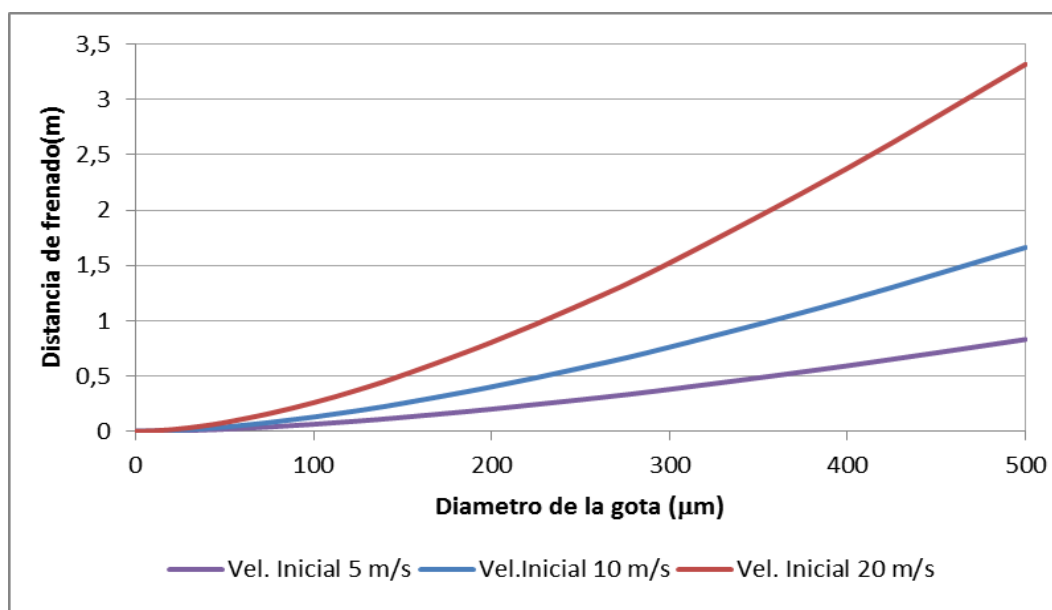


Figura 4.3-92 Distancia de frenado en función del tamaño de gota

Fuente: ONGC VL, 2026

4.3.5.3.3 Proceso de evaporación de gotas en el aire

Como ya se mencionó anteriormente, la evaporación de los líquidos es un fenómeno físico común. Dependiendo de la temperatura y la presión de vapor, cada líquido (incluso algunos sólidos) mostrara una tendencia mayor o menor a evaporarse. En el proceso de Evaporación Mecánica de aguas de formación producidas se puede asumir que el solvente es agua y los solutos son las sales disueltas, hidrocarburos suspendidos.

En ambos casos, la presión de vapor de estos solutos es mucho menor que la presión de vapor del agua y por lo tanto la tasa de evaporación será mucho menor que la del agua y en el caso de los sólidos nula. Por lo tanto, es razonable asumir que las gotas en el aire perderán su contenido de agua rápidamente, después la partícula libre de agua se evaporara muy despacio (o no se evaporará) con respecto a la evaporación del agua permitiendo que estos solutos caigan de nuevo a la piscina de evaporación.

Según el modelo de deriva de spray IDEFICS (Holterman et al.1997) se asume que solo el agua se evaporaría en el proceso y que todos los solutos serian inertes químicamente, esto es razonable para cortas distancias de deriva en la dirección del viento (entre 10 y 20 m).

Una gota de agua cayendo o flotando a través de una masa de aire, está sujeta al proceso de evaporación e inminentemente disminuirá su tamaño. Durante cierto tiempo transitorio (relativamente corto), la gota se enfría debido al proceso de evaporación, hasta que alcanza su temperatura de "bulbo húmedo". Al mismo tiempo, una delgada película de vapor saturado se forma alrededor de la gota. Como la temperatura de la gota es menor que la temperatura del aire del ambiente, el flujo de calor hacia el interior de la gota acelera el proceso de evaporación.

4.3.5.3.4 Disminución del diámetro de la gota en función del tiempo

Muchas veces se describe la evaporación por medio de la llamada constante de evaporación K, que está definida por:

$$K = -\frac{dD^2}{dt} \quad (\text{Ec. 6})$$

Esta ecuación se puede reescribir en función del diámetro y la velocidad de la gota teniendo en cuenta el número de Reynolds y el número de Schmidt como:

$$K = -2D \frac{dD}{dt} = 2a(1 + b\sqrt{Dv}) \quad (\text{Ec. 7})$$

Claramente esta ecuación muestra que K no es una constante, pues ésta depende de la velocidad (v) y el diámetro (D) de la gota. Como D y v cambian con el tiempo, K también lo hace, por lo tanto, es más apropiado denotar a K como una tasa de evaporación en vez de denotarla como una constante. Los valores de las constantes a y b se pueden obtener a partir de las siguientes expresiones.

$$a = \frac{4M_L D_{v,f} \Delta p}{\rho_L R T_f} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$b = 0,267 \left(\frac{\rho_{a,f}}{h_{a,f} D_{v,f}^2} \right)^{1/6} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

M_L : Peso molecular del agua (0,018Kg/mol)

$D_{v,f}$: Coeficiente de difusión promedio de las moléculas de vapor en la película saturada alrededor de la gota

Δp : Diferencia entre la presión de vapor cerca a la gota y la presión de vapor en la atmósfera

ρ_L : Densidad del agua

R : Constante de los gases (8,1344 J/mol K)

T_f : Temperatura absoluta en la película saturada que recubre la gota

$\rho_{a,f}$: Densidad del aire a la temperatura T_f

$h_{a,f}$: Viscosidad del aire a la temperatura T_f

La ecuación 7 da la tasa de evaporación de una gota de agua en función de su diámetro y su velocidad. De acuerdo con lo mencionado anteriormente sobre la velocidad de las gotas de agua, todas las gotas liberadas al aire terminaran cayendo a su velocidad de sedimentación.

Usualmente en este proceso, el tiempo entre la liberación de la gota y el tiempo cuando la gota alcanza su velocidad de sedimentación constante puede ser obviado. Por lo tanto, una gota evaporándose estará casi siempre a su velocidad de sedimentación durante el tiempo de vuelo. Para estas gotas se puede calcular la tasa de evaporación con su velocidad de sedimentación en función de su diámetro.

En la **Figura 4.3-93** se muestra la tasa de evaporación para gotas de distinto diámetro que se mueven a su velocidad de sedimentación a través del aire a una temperatura constante de 15°C. En esta gráfica también se evalúa el efecto que tiene la humedad relativa del ambiente en la tasa de evaporación de la gota, el ΔT (delta de temperatura) equivale a la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de bulbo húmedo (wet-bulb temperature), la evaluación de los $\Delta T = 1, 5$ y 10°C , equivale a humedades relativas de 90, 52 y 12% respectivamente. Evidenciando un aumento considerable en la tasa de evaporación de las gotas cuando la humedad relativa disminuye, este aumento se hace más evidente a medida que aumenta el diámetro de la gota.

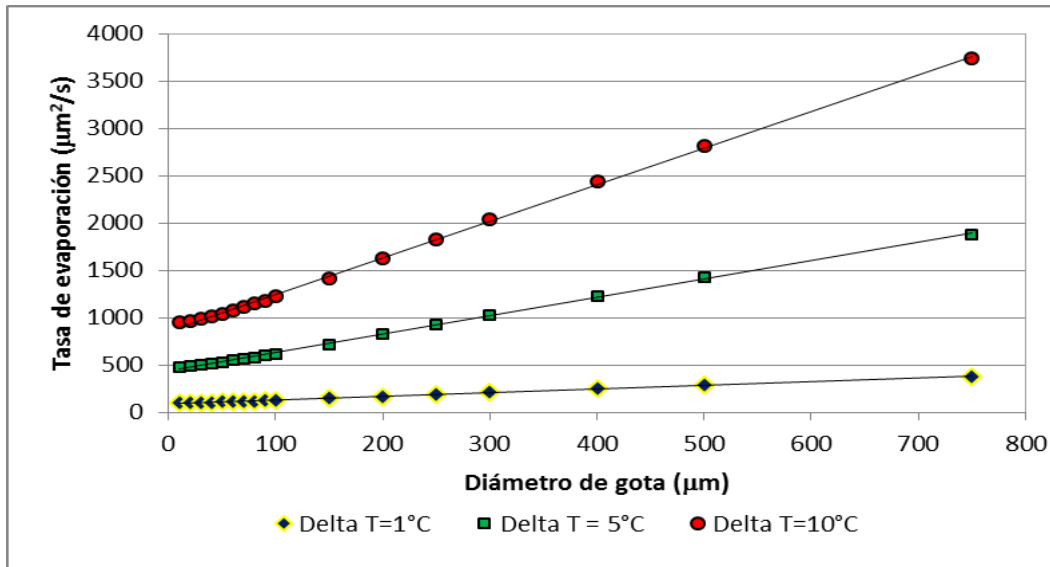


Figura 4.3-93 Tasa de evaporación k para gotas moviéndose a su velocidad de sedimentación a través del aire

Fuente: ONGC VL, 2026

Si en cambio la ΔT ($T_{\text{ambiente}} - T_{\text{bulbo húmedo}}$) se mantiene constante, y se evalúan distintas temperaturas ambiente, se muestra en la **Figura 4.3-94** que la tasa de evaporación se mantiene invariable al variar la temperatura ambiente, permitiendo que el sistema de Evaporación Mecánica sea eficiente prácticamente a cualquier temperatura ambiente, siempre y cuando la humedad relativa no sea del 100 %.

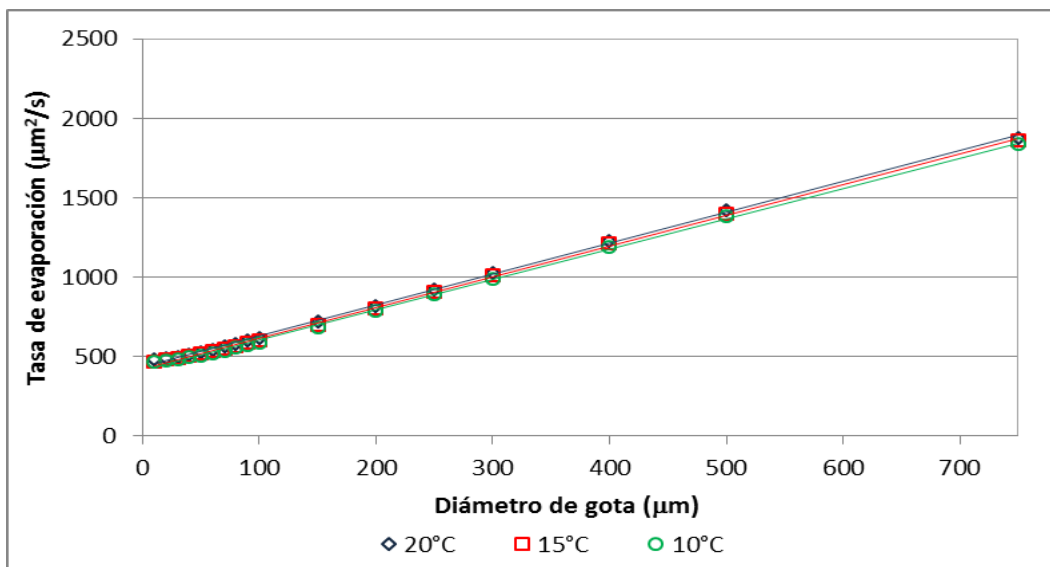


Figura 4.3-94 Tasa de evaporación k a distintas temperaturas ambiente con Δt constante (5°C)

Fuente: ONGC VL, 2026

4.3.5.3.5 Tiempo de vida de una gota durante el proceso de evaporación

Usualmente las gotas producidas por el sistema de Evaporación Mecánica salen a una alta velocidad y se ralentizan por la fricción con el aire, llegando a su velocidad de sedimentación. En el proceso de evaporación de una gota se deben considerar dos etapas de tiempo. Primero, cuando una gota nueva se libera al aire, el proceso de evaporación comienza de inmediato, la gota se enfriará gradualmente hasta que alcance su temperatura de bulbo húmedo, esta es la primera etapa. Después, si la gota permanece en su temperatura de bulbo húmedo, esta continuará disminuyendo su tamaño mediante una evaporación estable, hasta desaparecer cuando toda el agua se haya evaporado. Esta es la segunda etapa para considerar.

El adjetivo estable se usa solamente para distinguir los dos procesos, ya que en la segunda etapa la evaporación no es un proceso estable, debido a que el tamaño y la tasa de evaporación cambian continuamente. Para conocer el tiempo de vida de una gota al evaporarse se asume que el periodo transitorio de enfriamiento puede ser obviado con respecto al tiempo de vida total de la gota. De esta manera, el tiempo de vida de una gota se puede inferir mediante la siguiente ecuación:

$$t_{life} = \frac{D_0^2}{q_0 \Delta T} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

D_0 : Diámetro inicial de la gota

ΔT : ($T_{\text{ambiente}} - T_{\text{bulbo húmedo}}$)

q_0 : es una variable que se expresa de la siguiente manera:

$$q_0 = \frac{2a}{\Delta T} (1 + b s_o) \quad (\text{Ec.11})$$

s_o es una constante empírica con un valor de $-1,117 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-0,5}$

El valor de tiempo de vida de una gota se utilizará posteriormente para definir el tamaño de partícula idóneo, para realizar el proceso de Evaporación Mecánica sin que se presente el fenómeno de la deriva.

4.3.5.3.6 Trayectoria de una gota de agua a la salida del sistema de aspersión mecánica

Cuando se quiere determinar la trayectoria que tendrá una gota proyectada verticalmente hacia arriba por la acción del alabe, se deben tener en cuenta dos aspectos. Primero, la distancia de frenado como ya se mencionó anteriormente, es la medida de la distancia que la gota puede penetrar en la corriente de aire, antes que haya perdido su propio momentum generado por el choque inelástico y quede a merced del viento y la gravedad. En segunda instancia, después del efímero momento de desaceleración, la velocidad de sedimentación y la velocidad y dirección del viento determinarán el ángulo de caída hacia el suelo y la distancia recorrida por la gota antes de caer.

Una gota pequeña (10-100 μm) tiene una corta distancia de frenado y una velocidad de sedimentación pequeña. Por lo tanto, la trayectoria de una de estas gotas pasará rápidamente de la dirección vertical a horizontal en un proceso controlado por la velocidad y dirección del viento.

En el caso contrario, una gota con un diámetro grande (200-500 μm) que tiene una distancia de frenado más grande y una velocidad de sedimentación relativamente alta, tendrá una trayectoria vertical ascendente y descendente sin mucho desplazamiento horizontal por la acción del viento.

Al combinar la trayectoria de 10 metros de vuelo de las gotas generadas en una corriente de viento con una velocidad promedio de 3 m/s, con su tiempo de vida durante el proceso de evaporación **Figura 4.3-95**. Se observa que las gotas más pequeñas tienen tiempos de vuelo muy largos y podrían permanecer mucho tiempo en el aire siendo propensas al fenómeno de deriva, pero a su vez, sus velocidades de evaporación son muy rápidas, haciendo que se evaporen mucho antes de alcanzar la distancia de 10 metros, esto ocurre para todos los tamaños de gota que se encuentran dentro del área de evaporación (rosado).

En el caso de los tamaños de gota generados en el proceso de Evaporación Mecánica (entre 150 y 250 μm), los tiempos de evaporación oscilan entre 3 y 8 segundos, y los tiempos de vuelo varían entre 5 y 10 segundos. Por lo tanto, los tamaños de partícula idóneos para realizar el proceso de Evaporación Mecánica están entre los 150 y 250 μm .

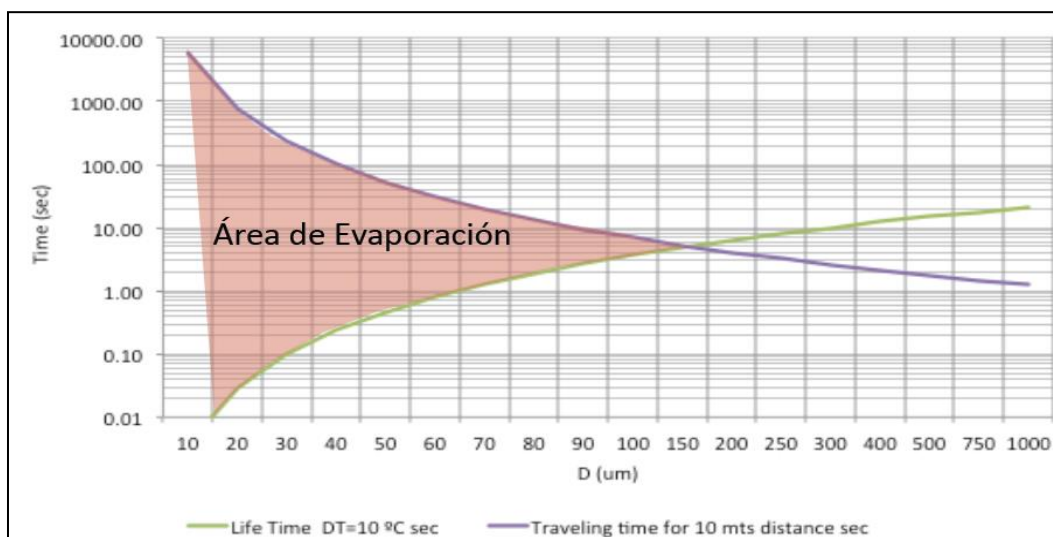


Figura 4.3-95 Tiempo de vida y tiempo de vuelo de las gotas en función de su tamaño

Fuente: ONGC VL, 2026

4.3.5.3.7 Interacción de las gotas generadas con la lluvia

Anteriormente se mencionó que la Evaporación Mecánica se puede realizar continuamente durante todo el año, incluso en la temporada de lluvias. Por esta razón surge usualmente la pregunta de lo que sucede con el proceso de Evaporación Mecánica cuando llueve. En un primer instante se podría pensar que la lluvia disminuye considerablemente la eficiencia del proceso de evaporación. Sin embargo, al observar la distribución promedio del tamaño de partículas de agua lluvia (**Figura 4.3-96**), se ve que las gotas de lluvia no alcanzan a tener el tamaño de las partículas generadas en la Evaporación Mecánica y por lo tanto no interfieren en el proceso.

Eventualmente algunas gotas de lluvia impactarán con las gotas de menor tamaño, regresando la masa de agua impactada a la piscina, pero esta cantidad no será significativa. La disminución significativa en la eficiencia del proceso se dará porque la humedad relativa del área aumenta después de la lluvia disminuyendo la capacidad de evaporación como se observó anteriormente en la **Figura 4.3-89**.

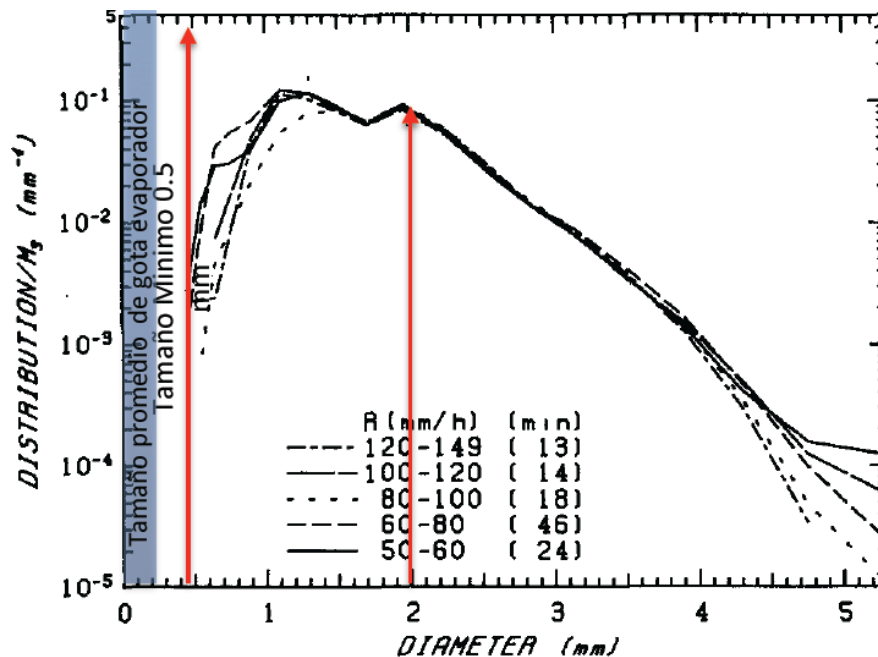


Figura 4.3-96 Distribución promedio del tamaño de las gotas de lluvia

Fuente: ONGC VL, 2026

4.3.5.4 Infraestructura requerida

La infraestructura requerida para efectuar la Evaporación Mecánica comprende los siguientes componentes:

- Tanques australianos (Temporales y removibles)
- Generación eléctrica
- Mampara para modular la velocidad de los vientos, de 6 m de altura.
- Área de procesos: El área requerida para efectuar el proceso de la Evaporación Mecánica normalmente es de 314 metros cuadrados por cada unidad de evaporación (evaporador).
- Evaporadores Mecánicos: Los evaporadores están montados sobre tanques. Para este caso son unidades independientes que tienen una bomba que succiona el agua de la piscina y la impulsa contra un rotor, logrando un efecto de Evaporación Mecánica generando micro gotas de un tamaño de partícula determinado (aproximado de 150 μm) (ver **Figura 4.3-97**).



Figura 4.3-97 Evaporador mecánico en funcionamiento.

Fuente: ONGC VL, 2026

- Estación meteorológica: Para controlar el proceso de separación mecánica de los contaminantes y evaporar únicamente agua de manera más eficiente, las variables del clima serán registradas en tiempo real por una estación meteorológica, y mediante algoritmos matemáticos, el software controlador y los microprocesadores controlarán el proceso de la evaporación. El sistema estará programado para evitar el riesgo de deriva al disminuir automáticamente el caudal del proceso cuando la estación meteorológica detecte ráfagas de viento con altas velocidades mayores a ocho metros por segundo (8 m/s) (ver **Figura 4.3-98**).



Figura 4.3-98 Estación meteorológica en un área de proceso de evaporación mecánica

Fuente: ONGC VL, 2026

- Barreras: La información de la velocidad y dirección del viento, tomada de la estación meteorológica junto a los factores ambientales históricos disponibles, se utilizan para realizar el diseño de las barreras de confinamiento y su orientación. Estas barreras se instalan con el fin de confinar el área del proceso para atenuar la velocidad del viento hasta en un 58%, lo cual garantizará el trabajo óptimo de los evaporadores. Aun cuando el funcionamiento de los evaporadores cumple con las normas de ruido para el lugar, estas estructuras atenuarán el nivel de presión sonora hasta en un 35%.

4.3.5.5 Ubicación del sistema de evaporación mecánica

Los sistemas de evaporación mecánica se instalarán al interior de las plataformas de perforación y CPF que sean construidas para el Bloque CPO-5, podrá ser instalado un sistema de evaporación mecánica directamente en la zona de las piscinas de agua tratada.

4.3.5.6 Programa de seguimiento y monitoreo

Como medida de seguimiento y monitoreo, se prevé la realización de los siguientes monitoreos para cuantificar los impactos y así validar la inocuidad de la aplicación de esta tecnología sobre el medio ambiente.

- Monitoreo de las variables del proceso: Una estación meteorológica medirá las variables principales como, humedad relativa, temperatura del aire y la velocidad del viento en tiempo real, en el área del proceso. Los datos podrán ser descargados del sistema cuando así se requiera en el caso de una auditoría o simplemente para evaluar el control del proceso.
- Balance de masa: Este método suministrará una medida del volumen neto del agua permeada y evaporada excluyendo la contribución de la lluvia y la evaporación natural. La frecuencia con la cual se efectúa este balance es mensual. De acuerdo con los parámetros registrados de lluvia y evaporación de agua registrados en el área de proceso, el balance de masas se realizará teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$V_{evm} + V_{ppi} = Q_w * T_{evm} - V_{evn} + VII + V_{ppf}$$

Donde:

Q_w : Caudal de agua permeada a evaporar bbl.

V_{ppi} : Volumen de agua en la piscina de proceso primer día del mes bbl.

V_{ppf} : Volumen de agua en la piscina de proceso último día del mes bbl.

VII : Volumen de lluvia bbl/mes.

V_{evn} : Volumen de evaporación natural bbl/mes.

V_{evm} : Volumen de Evaporación Mecánica bbl.

T_{evm} : Tiempo transcurrido efectuando la Evaporación Mecánica (días).

- Piezometría: Para comprobar la estanqueidad del área de proceso, se instalará y monitoreará una red de piezómetros a lo largo del área de las piscinas de tratamiento.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA) PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL DE LA FASE EXPLORATORIA, A TRAVÉS DE LA OBTENCIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DE DESARROLLO PARA EL BLOQUE CPO-5 CAPÍTULO 4. DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	
---	---	---

- Monitoreo de aire fuera del área de procesamiento: La calidad del aire será objeto de seguimiento alrededor de la zona del proceso. A través de una empresa debidamente acreditada ante el IDEAM, se efectuará el monitoreo de la calidad de aire, evaluando Material Particulado, Óxidos de Nitrógeno, Óxidos de Azufre, VOCs, BTEX y Monóxido de Carbono; los monitoreos realizados durante el desarrollo de las actividades del proyecto se determinan en el Programa SMA - Seguimiento al Medio Abiótico específicamente en el seguimiento a emisiones atmosféricas, calidad de aire y ruido.

4.3.6 Entrega a terceros autorizados

Se continuará con la entrega a terceros de las aguas asociadas de producción, que se generen durante las pruebas extensas de producción, que serán transportadas junto con el crudo que se genere en el Bloque CPO-5 a la estación recolectora, perteneciente a un tercero y que tenga la capacidad de separar, medir, recoger y tratar la producción de crudo, gas y agua, y con la cual la Empresa llegue a un acuerdo. En los informes ICA se continuará reportando el volumen de agua asociada entregado.

4.3.7 Riego en vías

De conformidad con lo establecido en el numeral 3, artículo cuarto, de la Resolución 600 de 2012, ONGC VL realiza actividades de riego en las vías intervenidas por el proyecto, específicamente en aquellas que son objeto de adecuación o utilizadas para el tránsito de vehículos asociados a la operación, así como en áreas puntuales de sus instalaciones. En este sentido, se solicita mantener el permiso previamente otorgado mediante la Resolución 600 de 2012, en las mismas condiciones en que fue autorizado.