



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
“ÁREA DE DESARROLLO LLANOS 141”

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



CONTENIDO

	Pág.
4 DEMANDA, USO, APROVECHAMIENTO Y/O AFECTACIÓN DE RECURSOS NATURALES	1
4.3 VERTIMIENTOS.....	1
4.3.1 Caudal de vertimiento	1
4.3.2 Caracterización de las actividades generadoras de las aguas residuales.	3
4.3.2.1 Aguas residuales domésticas	3
4.3.2.2 Aguas residuales no domésticas	4
4.3.3 Caracterización del vertimiento.....	8
4.3.3.1 Composición típica de aguas residuales domésticas	8
4.3.3.2 Composición típica de aguas residuales no domesticas	8
4.3.4 Descripción de las alternativas de manejo de las aguas residuales generadas y los sistemas de tratamiento propuestos	9
4.3.4.1 Aguas domésticas negras.....	9
4.3.4.2 Aguas domésticas grises	10
4.3.4.3 Manejo de las aguas residuales domésticas	11
4.3.4.4 Manejo y tratamiento de aguas residuales no domésticas (.....	12
4.3.4.4.1 Obras para manejo de drenajes, aguas superficiales y aguas aceitosas.....	12
4.3.4.4.2 Frac Tank o tanques australianos	17
4.3.4.4.3 Sistema de deshidratación (Dewatering)	18
4.3.4.4.4 Piscinas de tratamiento	20
4.3.4.4.5 Facilidades Centrales de Producción (CPF), Facilidades Satélite (FS) y SSMA	21
4.3.4.4.6 Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción - STAP	22
4.3.4.4.7 Entrega y/o recibo de fluidos con otros bloques o campos operados por Ecopetrol S.A. y/o terceros autorizados.....	23
4.3.5 Vertimientos en cuerpos de agua	24
4.3.6 Vertimiento en suelos – Aspersión en ZODAR.....	24
4.3.6.1 Descripción de las unidades de suelo	25
4.3.6.1.1 Determinación de las áreas aptas para vertimiento.....	25
4.3.6.1.2 Descripción de las unidades de suelo de interés para realizar vertimiento de aguas residuales tratadas en suelo.....	26
4.3.6.2 Caracterización fisicoquímica del área de disposición	34
4.3.6.2.1 Caracterización general de los suelos utilizados para el diseño del sistema de riego.....	40
4.3.6.3 Análisis de los elementos climáticos.....	41
4.3.6.3.1 Elementos climáticos para los diseños de los sistemas de riego	41

4.3.6.3.2	Datos climáticos y justificación del periodo de simulación de la modelación del vertimiento en suelo	42
4.3.6.4	Avance del frente húmedo en el perfil del suelo.....	44
4.3.6.4.1	Cálculo de la velocidad de infiltración básica.....	45
4.3.6.5	Variación del nivel freático	47
4.3.6.6	Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero asociado	47
4.3.6.7	Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 3930 Art. 42 (adoptado por el ARTÍCULO 2.2.3.3.5.2. del decreto 1076 del 2015).....	47
4.3.6.7.1	Datos del solicitante del permiso de vertimiento.....	48
4.3.6.7.2	Poder debidamente otorgado al apoderado.....	48
4.3.6.7.3	Certificado de existencia y representación legal de la persona jurídica	48
4.3.6.7.4	Datos del predio, propiedad o inmueble utilizado para realizar el vertimiento	48
4.3.6.7.5	Costo del proyecto.....	48
4.3.6.7.6	Fuente de abastecimiento de agua.....	48
4.3.6.7.7	Características de las actividades que generan el vertimiento.	48
4.3.6.7.8	Plano donde se identifique origen, cantidad y localización georreferenciada de las descargas al cuerpo de agua o al suelo	48
4.3.6.7.9	Caudal de la descarga expresada en litros por segundo.....	49
4.3.6.7.10	Frecuencia de la descarga expresada en días por mes	50
4.3.6.7.11	Tiempo de la descarga expresada en horas por día.....	50
4.3.6.7.12	Tipo de flujo de la descarga indicando si es continuo o intermitente.....	50
4.3.6.7.13	Caracterización actual del vertimiento existente o estado final previsto para el vertimiento proyectado de conformidad con la norma de vertimientos vigente.....	50
4.3.6.7.14	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.....	50
4.3.6.7.15	Concepto sobre el uso del suelo expedido por la autoridad municipal competente.....	50
4.3.6.7.16	Plan de gestión del riesgo para el manejo del vertimiento	51
4.3.6.8	Evaluación ambiental del vertimiento	51
4.3.6.8.1	Localización georreferenciada de proyecto, obra o actividad.....	52
4.3.6.8.2	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, frmas de energía empleados y los procesos químicos y físicos utilizados en el desarrollo del proyecto, obra o actividad que genera vertimientos.....	52
4.3.6.8.3	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.....	52
4.3.6.8.4	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.....	54
4.3.6.8.5	Manejo de residuos asociados a la gestión del vertimiento.....	109
4.3.6.8.6	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.	109
4.3.6.8.7	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 minimiar efectos negativos de orden sociocultural que puedan derivarse de la misma	109
4.3.6.9	Requisitos del permiso de vertimiento - Decreto 050 Art. 6	109
4.3.6.9.1	Línea base del suelo	109
4.3.6.9.2	Línea base del agua subterránea.....	110
4.3.6.9.3	Sistema de disposición de los vertimientos.	110
4.3.6.9.4	Área de disposición del vertimiento.....	111
4.3.6.9.5	Plan de monitoreo	111
4.3.6.9.6	Plan de cierre y abandono del área de disposición del vertimiento.....	112
4.3.7	Disposición de agua mediante reinyección e Inyección	120

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.3-1	Volumen de agua residual estimada para el proyecto 1
Tabla 4.3-2	Alternativas de disposición final solicitadas para el área de desarrollo Llanos 141 2
Tabla 4.3-3	Etapas de generación de aguas residuales por etapa..... 3
Tabla 4.3-4	Manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domesticas 4
Tabla 4.3-5	Manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales no domesticas..... 5
Tabla 4.3-6	Composición típica de aguas residuales domésticas 8
Tabla 4.3-7	Parámetros fisicoquímicos del agua residual no domestica 9
Tabla 4.3-8	Sistema de deshidratación (Dewatering) 19
Tabla 4.3-9	Descripción del perfil modal del Complejo PV2 (CALICATA Cal_Vert_1) 27
Tabla 4.3-10	Descripción del perfil modal de la Consociación PV5 (CALICATA Cal_Vert_2)..... 29
Tabla 4.3-11	Descripción del perfil modal del Complejo PV6 (CALICATA Cal_Vert_3) 31
Tabla 4.3-12	Descripción del perfil modal de la Consociación RV1 (CALICATA Cal_Vert_4)..... 33
Tabla 4.3-13	Unidades cartográficas y perfiles modal representativos caracterizados 34
Tabla 4.3-14	Resultados análisis de laboratorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Dec. 050 del 2018) 36
Tabla 4.3-15	Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV2 apta para realizar aspersión 40
Tabla 4.3-16	Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV5 apta para realizar aspersión 40
Tabla 4.3-17	Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV6 apta para realizar aspersión 40
Tabla 4.3-18	Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo RV1 apta para realizar aspersión 40
Tabla 4.3-19	Estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización del área del proyecto 41
Tabla 4.3-20	Estaciones empleadas y análisis Thiessen..... 43
Tabla 4.3-21	Clasificación de la velocidad de infiltración básica..... 46
Tabla 4.3-22	Resultados de las pruebas de infiltración en campo de los perfiles caracterizados de las unidades aptas para realizar vertimiento mediante campos de aspersión 46
Tabla 4.3-23	Calificación de la profundidad del nivel freático en el AD Llanos 141..... 47
Tabla 4.3-24	Datos del solicitante 48
Tabla 4.3-25	Caudal de vertimiento para cada unidad de suelo 49
Tabla 4.3-26	Frecuencia de descarga expresada en día por mes para cada unidad de suelo caracterizada 50
Tabla 4.3-27	Uso Reglamentado EOT – POT Municipal en las unidades de suelos solicitadas para la realización de vertimiento en suelo 51
Tabla 4.3-28	Regulación de calidad del vertimiento..... 55

Tabla 4.3-29	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso	56
Tabla 4.3-30	Característica del Aspersor plástico de impacto 5022 SD de boquilla roja de 3.0 mm, Marca NAANDANJAIN	62
Tabla 4.3-31	Característica del Aspersor plástico de impacto 5022 SD de boquilla verde de 3.2 mm, Marca NAANDANJAIN	62
Tabla 4.3-32	Dimensionamiento de tuberías y área requerida para los ZODAR tipo por cada unidad cartográfica de suelo	63
Tabla 4.3-33	Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS PV2, PV5, PV6 y RV1	64
Tabla 4.3-34	Parámetros físicos asociados al flujo del agua del suelo.....	72
Tabla 4.3-35	Valores optimizados de los parámetros de flujo de agua en el suelo.....	73
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	103
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	104
Tabla 4.3-38	Evaluación índice de amenaza o potencial de contaminación, método de Foster e Hirata (1988)	107
Tabla 4.3-39	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos obtenida para el AD Llanos 141	107
Tabla 4.3-40	Labores de desmantelamiento y abandono	114
Tabla 4.3-41	infraestructuras predominantes del abandono y restauración en locaciones	116
Tabla 4.3-42	Elementos a desmantelar en estaciones de tratamiento de agua residual doméstica e industrial y otra infraestructura.....	116
Tabla 4.3-43	Usos actuales presentes en las unidades cartográficas de suelo aptas, de interés y solicitadas para realizar vertimiento	119

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.3-1	Esquema básico de una trampa de grasas..... 10
Figura 4.3-2	Disposición tipo de cunetas perimetrales..... 12
Figura 4.3-3	Diseño básico de desarenadores..... 14
Figura 4.3-4	Esquema localización de cunetas para manejo de aguas aceitosas..... 15
Figura 4.3-5	Diseño típico de skimmer en concreto reforzado..... 16
Figura 4.3-6	Diseño típico de skimmer metálico..... 17
Figura 4.3-7	Esquema típico de piscina para manejo de agua..... 21
Figura 4.3-8	Localización de las estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización del área del proyecto..... 42
Figura 4.3-9	Precipitación media diaria multianual..... 43
Figura 4.3-10	Distribución espacial de la precipitación media total anual multianual en el área de estudio..... 44
Figura 4.3-11	Distribución de las unidades cartográficas de suelo de interés y aptas para realizar vertimientos en suelo..... 49
Figura 4.3-12	Sistema de riego tipo para las unidades cartográficas de suelo PV2 y PV6, la cual es de interés y apta para riego..... 65
Figura 4.3-13	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PV5, la cual es de interés y apta para riego..... 66
Figura 4.3-14	Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo RV1, la cual es de interés y apta para riego..... 67
Figura 4.3-15	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata Cal_Vert_1, Unidad de suelo PV2..... 75
Figura 4.3-16	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales..... 76
Figura 4.3-17	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas..... 76
Figura 4.3-18	Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 77
Figura 4.3-19	Concentraciones de sulfato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 78
Figura 4.3-20	Concentraciones de nitrato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 78
Figura 4.3-21	Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 79
Figura 4.3-22	Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 80
Figura 4.3-23	Concentraciones de sulfato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas..... 80

Figura 4.3-24	Concentraciones de nitrato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	81
Figura 4.3-25	Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas	81
Figura 4.3-26	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_2, Unidad de suelo PV5.	82
Figura 4.3-27	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales	83
Figura 4.3-28	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas.....	83
Figura 4.3-29	Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	84
Figura 4.3-30	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	85
Figura 4.3-31	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	85
Figura 4.3-32	Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas	86
Figura 4.3-33	Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	87
Figura 4.3-34	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	87
Figura 4.3-35	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	88
Figura 4.3-36	Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas	88
Figura 4.3-37	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_3, Unidad de suelo PV6.	89
Figura 4.3-38	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales	90
Figura 4.3-39	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas.....	90
Figura 4.3-40	Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	91

Figura 4.3-41	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	92
Figura 4.3-42	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	92
Figura 4.3-43	Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	93
Figura 4.3-44	Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	94
Figura 4.3-45	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	94
Figura 4.3-46	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	95
Figura 4.3-47	Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	95
Figura 4.3-48	Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_4, Unidad de suelo RV1.....	96
Figura 4.3-49	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales.....	97
Figura 4.3-50	Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas.....	97
Figura 4.3-51	Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	98
Figura 4.3-52	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	99
Figura 4.3-53	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	99
Figura 4.3-54	Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	100
Figura 4.3-55	Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	101
Figura 4.3-56	Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	101

Figura 4.3-57	Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	102
Figura 4.3-58	Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas.....	102
Figura 4.3-59	Clase de contaminante (A)	105
Figura 4.3-60	Intensidad de contaminante (B).....	105
Figura 4.3-61	Modo de disposición de contaminante (C)	106
Figura 4.3-62	Tiempo de aplicación de la carga contaminante (D)	106
Figura 4.3-63	Relación vulnerabilidad del acuífero, amenaza por carga contaminante y riesgo de contaminación.....	108
Figura 4.3-64	Plan de desmantelamiento y abandono para las ZODAR	113
Figura 4.3-65	Área de influencia del AD Llanos 141. Uso actual sobre las unidades cartográficas de suelo solicitados para permiso de vertimiento.....	120

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 4.3-1	Planta de tratamiento tipo red-fox 10
Fotografía 4.3-2	Frac Tank..... 18
Fotografía 4.3-3	Tanques australianos 18
Fotografía 4.3-4	Tipo de relieve de Abanico Terraza en forma de terreno de Plano de abanico terraza, con uso del suelo pastoreo extensivo, en el Complejo PV2, en la Vereda El Palmar, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta..... 27
Fotografía 4.3-5	Tipo de relieve de Terrazas en forma de terreno de Plano de Terraza, con uso del suelo agrícola, en la Consociación PV5a, en el predio Yarumal - vereda Laguna Brava, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta 29
Fotografía 4.3-6	Tipo de relieve de Terraza en forma de terreno de Plano de terraza 1, con uso del suelo en ganadería extensiva, en el complejo PV6, en el predio Las Marías de José- vereda Presentado, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta..... 31
Fotografía 4.3-7	Tipo de relieve de Terraza Agradacional nivel 3 en forma de terreno de Plano de Terraza, con uso del suelo en pastoreo extensivo, en la Consociación RV1, en la vereda Presentado, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta 33

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

4.3 VERTIMIENTOS

Según el Decreto 1076 de 2015 en el artículo 2.2.3.3.1.2 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS y en el artículo 3 del Decreto 3930 de 2010, toda descarga final a un cuerpo de agua a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido, es considerado como un vertimiento. No obstante, estos vertimientos deben ser aprobados por la autoridad competente dependiendo del proyecto, y cumplir con unos requerimientos mínimos de calidad, con la finalidad de minimizar los impactos y alteración del medio receptor.

El proyecto Área de desarrollo Llanos 141 solicita vertimientos de aguas residuales tratadas mediante disposición en suelo en ZODAR e inyección de fluidos para procesos de recobro, para lo cual se realiza su descripción a lo largo del presente documento.

A continuación, se describe el proceso de tratamiento y alternativas de disposición de estas aguas residuales tratadas, con el fin de optimizar procesos asociados al manejo y disposición. Así mismo, se presenta el caudal estimativo de vertimiento de acuerdo con cada alternativa de disposición final solicitada.

4.3.1 Caudal de vertimiento

De acuerdo con los consumos de agua estimados para el proyecto, se realiza un cálculo aproximado del caudal de vertimiento según el porcentaje estimado de retorno respecto a la demanda o consumos solicitados para el desarrollo del presente proyecto, como se muestra en la **Tabla 4.3-1** teniendo en cuenta lo descrito en el Capítulo 4.1 Aguas superficiales para del presente estudio. Sin embargo, en el presente documento no es posible indicar el volumen de agua proveniente de la formación el cual será reportado en los ICA, una vez se tenga información de los resultados del yacimiento, el cual será manejado y dispuesto de acuerdo con las alternativas que se señalan en los numerales siguientes.

Tabla 4.3-1 Volumen de agua residual estimada para el proyecto

USO PRIMARIO	DEMANDA (L/s)	RETORNO (%)	VERTIMIENTO (L/s)	ETAPAS
Doméstico	0,24	90	0,216	Construcción de infraestructura, operación, desmantelamiento, abandono y restauración y actividades transversales
No Doméstico (industrial)	4,8		4,32	
Total (L/s)	5,04		4.5*	

**Este valor no contiene el volumen de agua de formación, el cual se obtiene posterior a las pruebas de inyectividad y la respectiva aprobación por parte de la ANH, lo cual será reportado en el ICA.*

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

En la **Tabla 4.3-2** se presenta las alternativas de disposición final solicitadas para el Área de desarrollo Llanos 141.

Tabla 4.3-2 Alternativas de disposición final solicitadas para el área de desarrollo Llanos 141

ESTRATEGIAS PARA LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS		ALCANCE DE LA SOLICITUD	TIPO DE RESIDUO LIQUIDO
INYECCIÓN	Inyección de fluidos para procesos Enhanced Oil Recovery - EOR- y/o dispo	La implementación de pozos inyectoros se realiza con el propósito de llevar a cabo procesos de recobro secundario o disposal. Es importante destacar que, desde una perspectiva operativa, se estima que cada pozo tendrá la capacidad de inyectar hasta 25,000 BWPD. Es fundamental señalar que este valor estará sujeto a ajustes, los cuales podrán variar en función de los resultados obtenidos en las pruebas de inyektividad y la posterior aprobación por parte de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). La información detallada al respecto se encuentra disponible en el Capítulo 2.2.2_Estrategias de Desarrollo.	Alternativa para disposición de agua residual no doméstica y de formación
ENTREGA Y RECIBO DE FLUIDOS		Se solicita la entrega y recibo de fluidos (emulsión, agua, crudo, gas, condensado, diluyentes y/o lodos, entre otros) tratados y/o sin tratar entre campos, bloques u otro tipo de infraestructura petrolera y/o entrega a terceros autorizados que cuenten con los permisos requeridos, a través de líneas de flujo y/o carro tanques y/u otros vehículos adecuados para el transporte de fluidos. Esta entrega permite crear sinergias con otros campos o bloques y/o con terceros autorizados, optimizando procesos relacionados con el transporte, manejo, tratamiento, disposición y/o uso de los fluidos en función de la capacidad y disponibilidad del receptor.	Alternativa para disposición de agua residual doméstica y no doméstica y de formación
ZONAS DE DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES (EN ADELANTE ZODAR)		Se solicita la disposición mediante ZODAR en hasta 8 hectáreas las cuales pueden ser continuas o fragmentadas en áreas de hasta 2 hectáreas, a razón de un caudal para disposición de 2,5 l/s hasta 2,72 l/s por ZODAR dependiendo la unidad de suelo (PV2, PV5, PV6 Y RV1) y de acuerdo con la Zonificación Ambiental	Alternativa para disposición de agua residual doméstica y no doméstica
RECIRCULACIÓN		Se considerará la recirculación de aguas residuales, tanto domésticas como no domésticas tratadas, en los procesos relacionados con el desarrollo del proyecto en los cuales sea posible llevar a cabo la reutilización de este recurso.	Alternativa para disposición de agua residual doméstica y no doméstica
GESTIÓN EXTERNA		Se solicita la entrega de agua residual tratada o no tratada a gestores externos que cuente con autorización y/o licencia ambiental para el transporte, manejo, almacenamiento, tratamiento y disposición final de aguas residuales.	Alternativa para disposición de agua residual doméstica y no doméstica y de formación

Las aguas residuales domésticas, no domésticas y las provenientes de la formación, generadas en el proceso de separación trifásico (agua, crudo y gas), una vez tratadas se recircularán en el proceso y podrán ser usadas en actividades industriales tales como: intercambios de calor en sistemas de enfriamiento, descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías, riego de vías para el control de material particulado, y sistemas de redes contra incendio, entre otros.

Teniendo en cuenta que una de las alternativas para recircular el agua residual tratada, esta asociada con el riego en vías, las cuales están, categorizadas como suelo de soporte de infraestructura por lo tanto en cumplimiento con lo dispuesto en el Artículo 3 de la Resolución 1256 de 2021, se precisa a esta Autoridad que; en cumplimiento al numeral dos (2) del artículo en mención, la identificación de los riesgos potenciales a los recursos naturales renovables derivados del uso de las Aguas Residuales se presenta en el Plan de Gestión del Riesgo del Manejo del Vertimiento (Anexo 4.3 Vertimientos / 4.3_8 PGRMV). Con respecto al numeral tres (3), las medidas de manejo por aplicar

para evitar los riesgos potenciales identificados por la recirculación de las aguas tratadas se presentan en el Plan de Manejo Ambiental (Capítulo 7, ficha LL141_PM_AB15_Manejo de fuentes de emisiones atmosféricas y ruido).

En lo que respecta al numeral uno (1) del artículo 3 de la Resolución 1256 de 2021, que corresponde al Balance Hídrico del sistema de recirculación de la actividad económica; se precisa a esta autoridad que, en los informes de cumplimiento ambiental – ICA’s, se reportara dicho documento técnico, teniendo presente que a la fecha de elaboración de este documento no se cuenta con ingeniería de detalle que permita dimensionar las unidades que componen los respectivos sistemas de tratamiento y almacenamiento y no se tiene aún el volumen de agua que se obtendrá del yacimiento, dado que este valor se obtiene posterior a las pruebas de inyectividad y la respectiva aprobación por parte de la ANH.

4.3.2 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 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 satélite, 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 capítulo y en el **capítulo 2.2.2 Estrategias de desarrollo**. En la **Tabla 4.3-3** se presenta por etapa el tipo de agua residual generada durante la ejecución del proyecto.

Tabla 4.3-3 Etapa de generación de aguas residuales por etapa

ETAPA	AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA (INDUSTRIAL)	AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Pre - operativa		x
Constructiva		x
Operativa	x	x
Desmantelamiento, abandono y restauración	x	x
*Actividades transversales	x	x

**En esta etapa se evalúa el Manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica y no doméstica, sin embargo, la tabla presenta de manera segregada las aguas residuales generadas en cada etapa con la finalidad de dar mayor detalle en la descripción.*

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

A continuación, se presenta la descripción del manejo, tratamiento y disposición final de las aguas domésticas y no domesticas que se generaran dentro del Área de Desarrollo Llanos 141.

4.3.2.1 Aguas residuales domésticas

Las aguas domesticas se dividen en aguas negras provenientes de los baños portátiles y baterías sanitarias de los campamentos temporales y aguas grises provenientes de los lavamanos, lavaplatos y duchas de los campamentos de la etapa de operación las cuales deben ser manejadas y dispuestas como se describe a continuación en la **Tabla 4.3-4**, donde se presenta un resumen del manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domésticas generadas por las diferentes etapas del proyecto.

Tabla 4.3-4 Manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domesticas

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS	ETAPA	FUENTE	MANEJO Y/O TRATAMIENTO	DISPOSICIÓN FINAL	
RESIDUOS LÍQUIDOS	Domésticas (Aguas negras y Aguas grises)	Pre - operativa	El desarrollo de esta etapa es de carácter administrativo, asociado a la gestión social y adquisición de predios; por lo que no se estima uso y aprovechamiento del recurso directamente como solicitud del proyecto, para captación o vertimiento	No Aplica	No Aplica
		RESIDUOS LÍQUIDOS	Domésticas (Aguas negras y Aguas grises)	Constructiva (obras civiles necesarias)	Baños portátiles
Operativa	Instalación y operación de campamentos temporales			Como tratamiento primario se cuenta con desarenadores y trampas de grasas. Para el tratamiento secundario se realizará a través de la PTARD Tipo Compacta en la cual, mediante un proceso biológico mixto (aeróbico y anaeróbico), se degrada la materia orgánica presente.	<ul style="list-style-type: none"> Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del único del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Gestión con terceros autorizados (proveedor del servicio)
Desmantelamiento, abandono y restauración	Baños portátiles			Se podrá contar con baños portátiles, de acuerdo con las necesidades operativas, los cuales serán gestionados por el proveedor del servicio	Gestión con terceros autorizados (proveedor del servicio)
*Actividades transversales	<ul style="list-style-type: none"> Instalación y operación de campamentos temporales Lavado de áreas asociadas al manejo y disposición de residuos sólidos domésticos. 			<p>Como tratamiento primario se cuenta con desarenadores y trampas de grasas. Para el tratamiento secundario se realizará a través de la PTARD Tipo Compacta en la cual, mediante un proceso biológico mixto (aeróbico y anaeróbico), se degrada la materia orgánica presente.</p> <p>También se podrá contar con baños portátiles, de acuerdo con las necesidades operativas, los cuales serán gestionados por el proveedor del servicio</p>	<ul style="list-style-type: none"> Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del único del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Gestión con terceros autorizados (proveedor del servicio)

*En esta etapa se evalúa el Manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica e industrial, sin embargo, la tabla presenta de manera segregada los residuos en cada etapa con la finalidad de dar mayor detalle en la descripción.

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

4.3.2.2 Aguas residuales no domésticas

Teniendo en cuenta la generación de aguas residuales no domésticas del proyecto, se establecen las alternativas de manejo y disposición final de estas, de acuerdo con cada etapa del proyecto como se presenta en el Capítulo 2.2.2 Estrategias de desarrollo (Ver **Tabla 4.3-5**).

Tabla 4.3-5 Manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales no domesticas

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS	ETAPA	FUENTE	MANEJO Y/O TRATAMIENTO	DISPOSICIÓN FINAL
RESIDUOS LÍQUIDOS No domésticos (industriales)	Pre - operativa	El desarrollo de esta etapa es de carácter administrativo, asociado a la gestión social y adquisición de predios; por lo que no se estima uso y aprovechamiento del recurso directamente como solicitud del proyecto, para captación o vertimiento	No Aplica	No Aplica
	Constructiva (obras civiles necesarias)	No se estiman residuos líquidos no domésticos en esta etapa debido a que el agua solicitada es reabsorbida en las mezclas de concreto y los residuos líquidos asociados a las pruebas hidrostáticas se valoran en la etapa de actividades transversales dado que estas pruebas también pueden desarrollarse en la etapa operativa.	No Aplica	No Aplica
	Operativa	<p>Deshidratación cortes y lodos de perforación</p> <p>Limpieza del pozo</p>	<p>La fase líquida separada de los cortes de perforación será tratada en primera instancia en la unidad de deshidratación (dewatering) o mediante los sistemas que la operación disponga de acuerdo con las condiciones operativas y avance del proyecto. Luego el efluente, será direccionado a la unidad de tratamiento destinado para el agua industrial, el cual consiste en un set de tanques donde se llevan a cabo procesos de homogenización, coagulación y floculación, aireación y ósmosis inversa. El agua que por sus propiedades ya no puede ser reutilizada (se denomina agua de rechazo), se almacena para ser dispuesta</p> <p>La limpieza del pozo se inicia una vez se ha determinado la posibilidad de producción de las formaciones potencialmente productoras. Para esta operación se emplea la diferencia de presión existente entre la formación y la cara del hueco ó se utiliza una unidad de suaveo (Swabbing Unit), equipo que permite mediante succión hacer un transporte lento de las basuras, lodos y cortes de perforación en exceso que se encuentren en el hueco. El agua asociada se incorporará al sistema de aguas residuales no domesticas del pozo y se tratará mediante procesos de clarificación química (Coagulación y floculación) y sistemas de ósmosis inversa, hasta alcanzar las especificaciones mínimas de calidad establecidas para el manejo de las aguas residuales y su posterior disposición.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A que cuenten con la autorización y capacidad de recibo. Inyección de fluidos para procesos de recobro (Enhanced Oil Recovery EOR-) y/o Disposal Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Entrega a gestor externo que cuente con autorización

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS	ETAPA	FUENTE	MANEJO Y/O TRATAMIENTO	DISPOSICIÓN FINAL	
RESIDUOS LÍQUIDOS	No domésticos (industriales)	Manejo de fluidos de retorno (flowback)	Los fluidos de retorno en las pruebas de producción por lo general son salmueras y fluidos del yacimiento (agua, petróleo y gas), utilizados para controlar y dar arranque al pozo, los residuos generados son transportados hasta tanques y/o frac tanks, donde se tratan por decantación, separación de grasas, floculación, filtrado, ósmosis inversa y desinfección, el fluido recuperado, así como el agua de aporte de los pozos pueden ser reutilizados en las actividades de servicio a pozos.	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A que cuenten con la autorización y capacidad de recibo. Inyección de fluidos para procesos de recobro (Enhanced Oil Recovery EOR-) y/o Disposal Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del único del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Entrega a gestor externo que cuente con autorización 	
		Operativa	Aguas de producción	El agua proveniente del yacimiento, obtenida mediante la separación primaria (agua, crudo, gas) se remiten al sistema de tratamiento de aguas de producción - STAP y/o acondicionadas para manejo mediante reinyección.	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A que cuenten con la autorización y capacidad de recibo. Inyección de fluidos para procesos de recobro (Enhanced Oil Recovery EOR-) y/o Disposal Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Entrega a gestor externo que cuente con autorización
			Aguas aceitosas	Los residuos líquidos aceitosos retenidos en las trampas de aceite (skimmer), los aceites (de motor e hidráulicos) usados y los residuos líquidos procedentes de derrames de diésel o aceites nuevos, serán almacenados en canecas de 55 galones que posteriormente se ubicarán dentro del dique perimetral de los tanques de combustible del equipo de perforación	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A. Entrega a gestor externo que cuente con autorización
		Desmantelamiento, abandono y restauración	Agua residual contenida en equipos, sistemas o áreas utilizadas para el tratamiento de residuos del proyecto	Se almacenarán temporalmente	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a gestor externo que cuente con autorización Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A.
		*Actividades transversales	Actividades asociadas al manejo y disposición de residuos sólidos industriales y especiales, y Manejo de Productos químicos y combustibles	Se almacenarán temporalmente	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A que cuenten con la autorización y capacidad de recibo. Inyección de fluidos para procesos de recobro (Enhanced Oil Recovery EOR-) y/o Disposal Disposición en suelo mediante ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Entrega a gestor externo que cuente con autorización

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS		ETAPA	FUENTE	MANEJO Y/O TRATAMIENTO	DISPOSICIÓN FINAL
RESIDUOS LÍQUIDOS	No domésticos (industriales)	*Actividades transversales	Pruebas hidrostáticas	El agua residual de la prueba hidrostática se llevará hasta los tanques y/o frac tanks, en donde se les dará el tratamiento que tenga implementado el área de desarrollo Llanos 141.	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a otros bloques o campos de Ecopetrol S.A que cuenten con la autorización y capacidad de recibo. Inyección de fluidos para procesos de recobro (Enhanced Oil Recovery EOR-) y/o Disposal Disposición mediante suelo en ZODAR Recirculación en procesos asociados al desarrollo del único del proyecto donde se pueda realizar reutilización del recurso. Entrega a gestor externo que cuente con autorización
	Lluvias	Operativa	Aguas lluvias contaminadas	Serán enviadas a un skimmer, para luego pasar a las piscinas donde se mezclarán con aguas residuales no domésticas tratadas.	<ul style="list-style-type: none"> Entrega a terceros autorizados
		Operativa	Aguas lluvias no contaminadas	Cunetas perimetrales que conduce a un desarenador	<ul style="list-style-type: none"> Retorno del agua al medio natural

*En esta etapa se evalúa el Manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica e industrial, sin embargo, la tabla presenta de manera segregada los residuos en cada etapa con la finalidad de dar mayor detalle en la descripción.

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

4.3.3 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.

4.3.3.1 Composición típica de aguas residuales domésticas

Las aguas residuales de tipo doméstico son las que se producen a partir de actividades realizadas por el personal operativo en el uso de limpieza y servicios sanitarios, se dividen en aguas negras (Alta carga de materia orgánica, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, compuestos nitrogenados y coliformes) y aguas grises (alta carga de grasas, alcalinidad, detergentes, fosfatos y DQO). En la **Tabla 4.3-6** se citan las características de calidad para las aguas residuales domésticas tomadas de pozos exploratorios con características similares a los que se pretenden operar en este proyecto.

Tabla 4.3-6 Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas

VARIABLE	UNIDADES	VALOR
Sólidos totales	mg/l	1005
Sólidos disueltos totales	mg/l	545
Sólidos suspendidos totales	mg/l	560
Sólidos sedimentables	mg/l	10
Carbono orgánico total	mg/l	329
DBO	mg/l	854
DQO	mg/l	1300
Nitrógeno total	mg/l	306,8
Conductividad	µS/cm	2060
Tensoactivos	mg/l	1,68
Nitritos	mg/l	0,122
Nitratos	mg/l	<1,5
Fósforo total	mg/l	27,06
Dureza total	mg/l	39,8
Hidrocarburos totales	mg/l	13,9
Turbiedad	NTU	450
Ortofosfatos	mg/l	17,06
Alcalinidad	mg/l	941,66
Aceite y Grasas	mg/l	104,6
Coliformes totales	NMP/100 ml	115300000
Coliformes fecales	NMP/100 ml	18500000

Fuente: Plataforma del pozo exploratorio Lorito, 2020.

4.3.3.2 Composición típica de aguas residuales no domesticas

Las aguas residuales de tipo industrial son las asociadas a procesos Dewatering (Perforación), aguas aceitosas y aguas de producción. En la **Tabla 4.3-7** se citan las características teóricas de calidad para las aguas residuales no domésticas.

Tabla 4.3-7 Parámetros fisicoquímicos del agua residual no domestica

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR ENCONTRADO
Grasas y Aceites	mg/l	1 - 5
Color	UPC	< 150
Conductividad	mohms/cm	4000
Cloruros	mg Cl/l.	50 -150
DBO5	mg O2/l	150 - 500
DQO	mg O2/l	500 - 1500
Dureza total	mg CaCO3 /l	50 -200
pH	Unidades	6 - 9
Sólidos disueltos	mg/l	500 - 2000
Sólidos suspendidos	mg/l	200 - 500
Sulfatos	mg SO4/l	150
Bario	mg Ba/l	1 - 3
Turbidez	NTU	150 - 800

Fuente: Metcalf & Eddy (1988)

Con el fin de prevenir y/o mitigar los efectos negativos que sobre el medio ambiente pueda ocasionar la generación y disposición de las aguas residuales provenientes de las diferentes actividades del proyecto, a continuación, se describe el manejo y tratamiento de cada tipo de agua residual doméstica y no domestica generada por el proyecto.

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

4.3.4.1 Aguas domésticas negras

El tratamiento de aguas negras proveniente de campamentos temporales en la etapa de perforación se realizará mediante el uso una planta de tratamiento de agua residual de tipo compacta de lodos activados Red Fox en donde su tratamiento se compone de tres pasos: Aireación (utiliza las bacterias que naturalmente se encuentran en el agua servida), Clarificación (separación del lodo bacteriano del agua tratada), Desinfección (elimina la presencia de cualquier bacteria viva antes de que el efluente sea descargado).

➤ Procesos llevados a cabo dentro del sistema de tratamiento

- i. Filtración gruesa: A medida que el afluente entra a la unidad de tratamiento de aguas residuales, pasa a través de un colador de barra. Este tamiz cogerá cualquier residuo grueso tal como trapos, bolsas plásticas, etc., evitando que entren al sistema.
- ii. Aireación: Después que las aguas servidas pasan a través del colador, en el compartimiento de aireación, éstas se mezclan con el líquido que contiene una concentración de bacterias aerobias (contenidas en forma natural en las aguas servidas) muy activas que comienzan a consumir el material de desecho orgánico de las aguas residuales. El aire se proporciona al líquido a través de los difusores, lo que apoya las actividades de las bacterias aerobias. El aire proviene de las instalaciones del lugar o del propio ventilador de la planta compacta.
- iii. Clarificación y decantación: El líquido desplazado fluye al compartimiento de clarificación donde el líquido se aquieta para permitir que el lodo flocule y decante en el fondo.
- iv. Desinfección: Este compartimiento permite que el líquido pase a través de una mezcla de cloro o a través de un sistema ultravioleta. El líquido se mantiene en este compartimiento hasta eliminar todas las bacterias que pasaron a través de los compartimientos anteriores.

En la **Fotografía 4.3-1** se evidencia una planta de tratamiento tipo red-fox usada para el tratamiento de las aguas negras.

Fotografía 4.3-1 Planta de tratamiento tipo red-fox



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

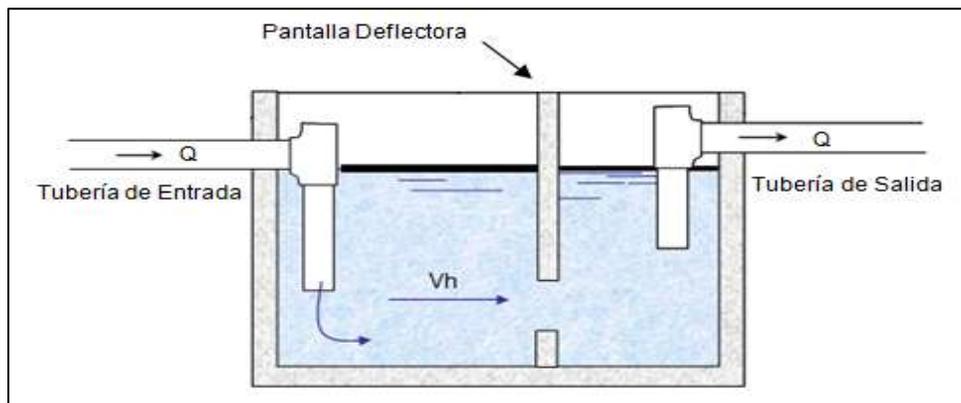
Las aguas negras proveniente de los baños portátiles de las instalaciones de apoyo dispuestos en las etapas de construcción y desmantelamiento, abandono y restauración serán gestionados por un tercero autorizado como proveedores del servicio en caso de ser utilizados.

4.3.4.2 Aguas domésticas grises

Las aguas grises provenientes de los campamentos temporales no se dirigen a la planta tipo Red Fox, sino que serán pre-tratadas en la unidad de trampa de grasas, que está conformada por tanques pequeños de flotación donde la grasa sale a la superficie, y es retenida mientras el agua aclarada sale por una descarga inferior (Ver **Figura 4.3-1**).

No lleva partes mecánicas y el diseño es parecido al de un tanque séptico. Deben localizarse lo más cerca posible de la fuente de agua residual y aguas arriba de cualquier otra unidad que requiera este dispositivo para prevenir problemas de obstrucción, adherencia a piezas especiales, acumulación en las unidades de tratamiento y malos olores. Debe tenerse en cuenta que independientemente de su localización, deben existir condiciones favorables para la retención y remoción de las grasas.

Figura 4.3-1 Esquema básico de una trampa de grasas



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S, 2023)

Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS Resolución 0330 del 8 de junio de 2017, en términos de operación y mantenimiento, las trampas de grasa deben localizarse lo más cerca posible a la fuente de agua residual con grasas y aguas arriba del tanque séptico o de cualquier otra unidad que requiera este dispositivo, para prevenir problemas de obstrucción, adherencias, acumulaciones en las unidades de tratamiento y malos olores.

Como parámetros generales de diseño deberán tenerse en cuenta los siguientes:

1. El volumen de la trampa de grasa se calculará para un período de retención mínimo de 2,5 minutos
2. La relación largo-ancho del área superficial de la trampa de grasa deberá estar comprendida entre 1:1 a 3:1, dependiendo de su geometría
3. La profundidad útil deberá ser acorde con el volumen calculado partiendo de una altura útil mínima de 0,35 m.

Las trampas de grasa deben operarse y limpiarse regularmente, para prevenir el escape de cantidades apreciables de grasa y la generación de malos olores. La limpieza debe hacerse cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa.

Cabe mencionar que el efluente de las plantas de tratamiento de lodos activados y de las trampas de grasas se almacenará en tanques portátiles y luego se podrá integrar al sistema de tratamiento de los residuos industriales de la perforación (mezcla lodos, cortes y aguas industriales) de acuerdo a las requerimientos operativos y desarrollo del área; manejo, tratamiento y disposición, en caso de no contar en primera instancia con los CPFs, se les realizará un tratamiento previo en un Frac Tank para después ser entregados a la facilidad centrales de producción y a las facilidades satélites.

Las aguas grises proveniente de los baños portátiles de las instalaciones de apoyo dispuestos en las etapas de construcción y desmantelamiento, abandono y restauración serán gestionados por un tercero autorizado como proveedores del servicio en caso de ser utilizados.

4.3.4.3 Manejo de las aguas residuales domésticas

El agua residual proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales, podrá ser utilizada en el lavado de equipos, enfriamiento de bombas y/o preparación de lodo, así mismo, la disposición final de las aguas domesticas provenientes de los baños portátiles de las instalaciones de apoyo, se realizará por medio de los proveedores de este servicio en caso de ser utilizados, los cuales deberán contar con los permisos y licencias ambientales respectivamente para ejecutar esta labor con relación al transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final de estas aguas residuales. Adicionalmente se deben presentar en los respectivos Informes de Cumplimiento Ambiental – ICA lo siguiente:

- a) Certificados de recolección y transporte emitido por la empresa respectiva, que indiquen: nombre de empresa que recolectó y transportó las aguas residuales, fechas de entrega, volúmenes de entrega, tipo de agua residual, sitio de recolección y destino de las aguas.
- b) Actas de recibo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales, que incluya: empresa que entrega, fecha, volumen, origen y tipo de agua residual.
- c) Copia de los permisos y/o licencias vigentes de las respectivas empresas que prestarán el servicio de recolección, transporte y disposición final de las aguas residuales.

4.3.4.4 Manejo y tratamiento de aguas residuales no domésticas (

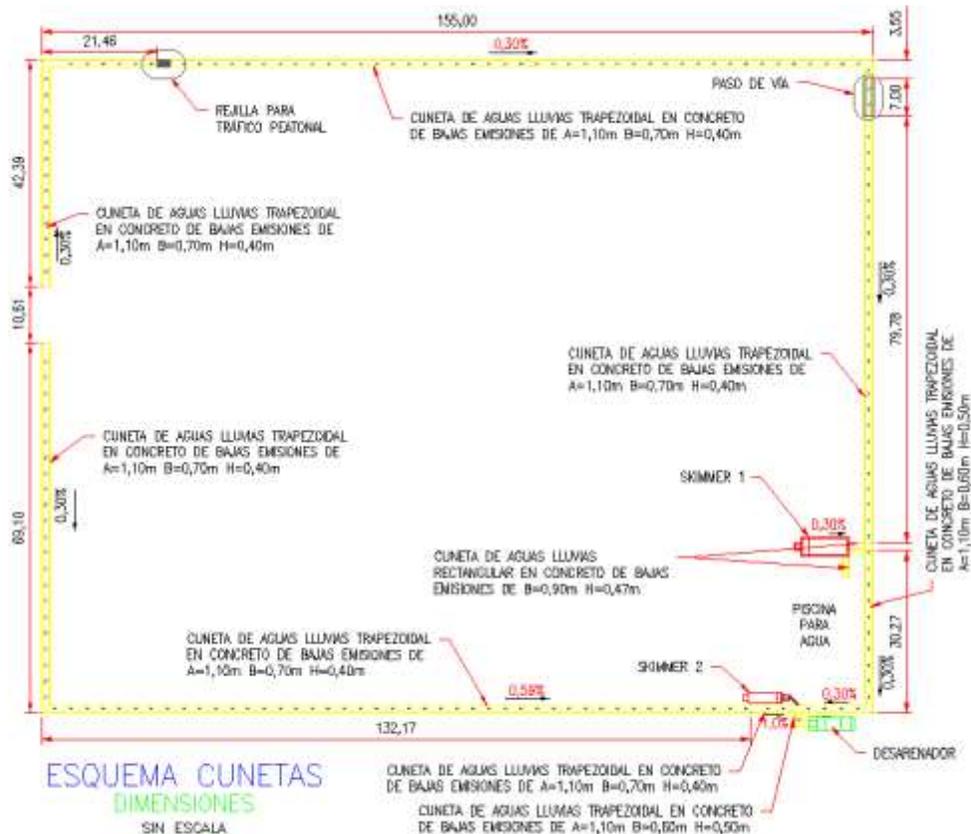
4.3.4.4.1 Obras para manejo de drenajes, aguas superficiales y aguas aceitosas

Todas las aguas lluvias que se puedan generar durante la operación sobre la plataforma se recogen por medio de cunetas perimetrales, el material previsto para el terminado de las cunetas puede variar al igual que su forma geométrica; estas cunetas reciben el agua de escorrentía recogida a lo largo de la locación y es conducida hacia desarenadores, donde se realiza la separación de agua y material recolectado (regularmente se debe hacer limpieza de los mismos). Seguidamente, el flujo de agua continúa su recorrido para ser dispuesta en el suelo natural y/o buscar un drenaje natural como sitio de disposición final. Es de señalar que las especificaciones y diseños serán presentados en los respectivos Planes de Manejo Ambiental Específicos asociados a la construcción de locaciones y perforación de pozos. A continuación, se presenta una descripción de los principales elementos a instalar para el manejo de estos tipos de aguas.

a) Cunetas perimetrales

El manejo de aguas lluvias podrá contar con la adopción de las diferentes alternativas en cuanto a los materiales de acabado, en la medida en que las características topográficas, edáficas y climáticas de la zona lo requieran y permitan. En la **Figura 4.3-2** se espacializa la disposición típica de este tipo de cunetas.

Figura 4.3-2 Disposición tipo de cunetas perimetrales



Fuente: Anexo 2. Descripción del proyecto / 5.CIV / ECP-ULL-LLANOS141-IP01-0-CI-PL-001-D1; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

El material previsto para el terminado de las cunetas, dependen de parámetros como las características de los suelos de fundación, la topografía de la zona, el tiempo de perforación y las facilidades de desmantelamiento, los cuales se describen a continuación:

✓ **Terreno natural**

Esta estructura puede implementarse cuando se presenten suelos consolidados, estables y poco permeables de tipo arcilloso, donde no se generen procesos erosivos, de igual forma se implementarán de acuerdo con los estudios de suelos e hidrología.

✓ **Revestimiento en suelo - cemento**

Se presenta como una alternativa aplicable en suelos más permeables que las arcillas y de mayor duración, ya que la mezcla de suelo con las proporciones adecuadas de cemento y agua es manejable en el momento de la construcción y luego del fraguado, se logra una superficie endurecida que permite manejar el agua sin generar problemas erosivos

✓ **Sacos rellenos de suelo o suelo-cemento instalados sobre el terreno natural**

Al igual que la alternativa anterior, esta opción busca dar una protección al suelo de tal manera que se minimicen los procesos de socavación. Consiste en llenar y sellar sacos de fibra natural con suelo sobrante o una mezcla de suelo-cemento sin elementos extraños como palos, vegetación o cualquier otro que pueda disminuir la vida útil del saco

✓ **Geomembranas o geotextiles instalados sobre el terreno natural**

Consiste en instalar una geomembrana o textil impermeable que garantice la protección del suelo, evite procesos de socavación y facilite la rápida evacuación de las aguas lluvias (

✓ **Cunetas en concreto monolítica y sin juntas**

Es la alternativa tradicional ya que garantiza la protección del medio, el manejo adecuado de las aguas y otorga una mayor vida útil al sistema de drenaje, su aplicación óptima se hace en obras de duración considerable, así como en sitios en donde las condiciones de estabilidad del terreno y de pluviosidad son críticas y necesitan de una estructura funcional, segura y durable

✓ **Paneles prefabricados de concreto con impermeabilización de las juntas**

Al igual que las anteriores son estructuras portátiles que implican un manejo mayor y más adecuado ya que debido a las características del concreto, principalmente al peso específico, deben ser unidades de longitudes máximas de 1,0m de tal manera que se facilite el transporte, instalación y retiro Paneles prefabricados de concreto con impermeabilización de las juntas

Al igual que las anteriores son estructuras portátiles que implican un manejo mayor y más adecuado ya que debido a las características del concreto, principalmente al peso específico, deben ser unidades de longitudes máximas de 1,0m de tal manera que se facilite el transporte, instalación y retiro.

✓ **Paneles portátiles en lámina, unidos mediante soldadura o pernos con juntas impermeabilizadas**

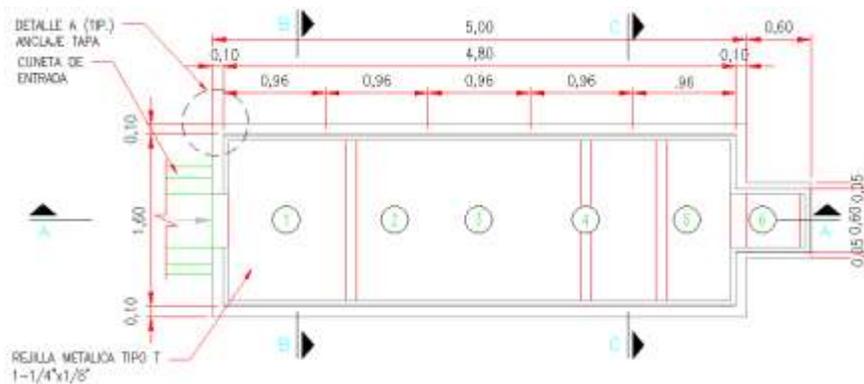
Son estructuras prefabricadas en lámina de fácil transporte, instalación y desmonte, el cuidado que implican, radica en el adecuado sellado de las juntas para impedir fugas; su funcionalidad reside en

su posibilidad de reutilización para otros proyectos y además no demandan uso o aprovechamiento de materiales de construcción. En general, las cunetas pueden ser construidas o revestidas con cualquier otro material siempre y cuando Ecopetrol S.A. y la Interventoría HSE los consideren pertinente y que pueda utilizarse para cumplir sus funciones e impida la afectación del medio.

b) Desarenadores

Como parte del sistema de manejo de aguas de escorrentía, se construirán desarenadores – trampas de grasa en concreto reforzado, cuya estructura tiene las funciones de retener las partículas de las aguas superficiales que puedan sedimentarse, además de retener las grasas, aceites y sustancias cuya densidad sea menor que la del agua. Estas estructuras se encuentran en el punto de entrega de las cunetas perimetrales de aguas lluvias de la localización. El diseño básico de los desarenadores a construir se puede observar en la siguiente figura.

Figura 4.3-3 Diseño básico de desarenadores



Fuente: Anexo 2. Descripción del proyecto / 5.CIV / ECP-ULL-LLANOS141-IP01-0-CI-PL-001-D1; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ Desarenador en concreto reforzado

Es una alternativa aplicable cuando las labores del proyecto sean prolongadas y/o cuando las condiciones de estabilidad del terreno justifiquen la construcción de una estructura durable y funcional

✓ Desarenador portátil en lámina

Es una estructura práctica, de fácil transporte, instalación y desmonte con ayuda de maquinaria; no demanda uso de materiales de construcción, minimiza la afectación del medio en la etapa de desmantelamiento, por lo cual es aplicable a todo tipo de plataforma a construir y además es reutilizable

✓ Desarenador en cualquier otro material

Se puede utilizar cualquier material aplicable que le permita cumplir sus funciones sin generar mayores afectaciones al medio y en lo posible facilite el proceso de restauración y desmantelamiento.

c) Sistema para el manejo de aguas aceitosas

La finalidad de este sistema es recoger, conducir y manejar las aguas aceitosas generadas durante la operación y el lavado de la infraestructura del equipo de perforación, mediante cunetas

d) Skimmer

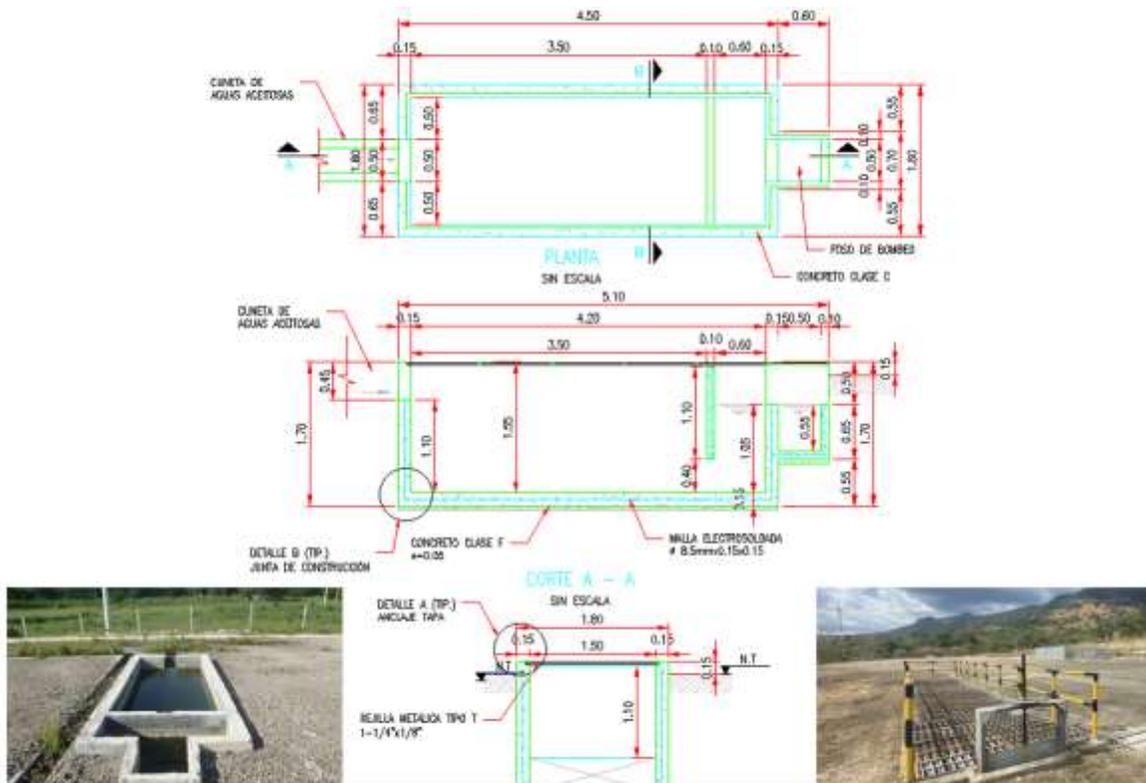
Los fluidos captados de las cunetas de aguas aceitosas serán conducidos hacia una caja llamada skimmer, la cual está conformada por compartimientos de dimensiones definidas; en esta, se realiza el pretratamiento del agua mediante el proceso de separación física, que se realiza gracias a un (os) tabique (s) que permite (n) el paso del agua por debajo hacia el siguiente espacio, mientras las grasas y aceites flotan en el anterior.

Al igual que las cunetas, dependiendo entre otros de la disponibilidad de materiales y los tiempos de perforación y previa excavación en el terreno natural, el skimmer podrá ser en concreto reforzado, portátil en lámina o de cualquier otro material que le permita cumplir sus funciones sin generar mayores afectaciones al medio. En caso de no construirse el sistema de cunetas para aguas aceitosas, se prescindirá de la adecuación del skimmer.

✓ Skimmer en concreto reforzado

Es una alternativa aplicable cuando las labores del proyecto sean prolongadas y/o cuando las condiciones de estabilidad del terreno justifiquen la construcción de una estructura durable y funcional (Figura 4.3-5).

Figura 4.3-5 Diseño típico de skimmer en concreto reforzado

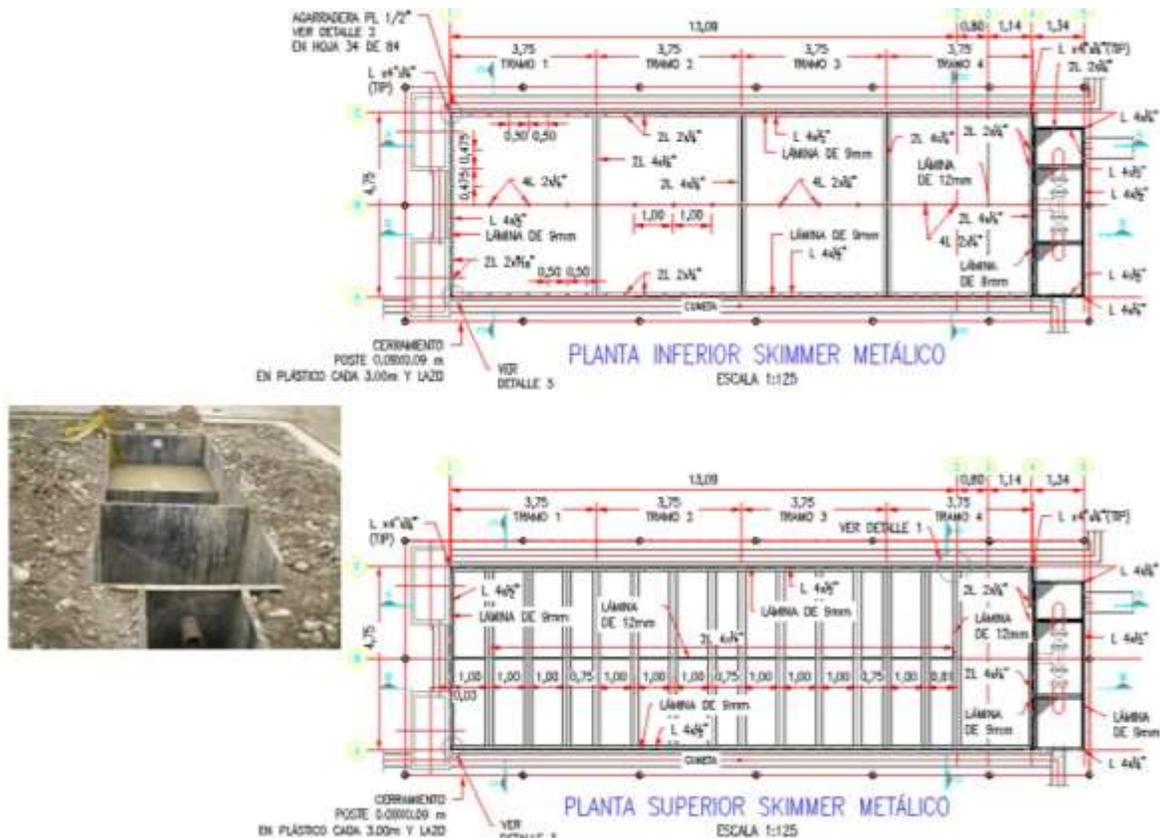


Fuente: Anexo 2. Descripción del proyecto / 5.CIV / ECP-ULL-LLANOS141-IP01-0-CI-PL-001-D1; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ **Skimmer portátil metálico o en polímeros**

Es una estructura práctica, de fácil transporte, instalación y desmonte con ayuda de maquinaria; no demanda uso de materiales de construcción, minimiza la afectación del medio en la etapa de desmantelamiento, por lo cual es aplicable a todo tipo de plataforma y además es reutilizable.

Figura 4.3-6 Diseño típico de skimmer metálico



Fuente: Anexo 2. Descripción del proyecto / 5.CIV / ECP-ULL-LLANOS141-IP01-0-CI-PL-001-D1; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2020)

4.3.4.4.2 Frac Tank o tanques australianos

El almacenamiento temporal dentro de Frac Tank o tanques australianos, son generalmente prefabricados y tienen como ventajas que evitan las excavaciones y reducen las dimensiones del sistema de tratamiento, constituyendo también una alternativa para el almacenamiento y manejo de agua, lodos y cortes de perforación, agua de producción, hidrocarburos, entre otros, debido al material que los conforma y a la hermeticidad que tienen, sin embargo, algunos pueden presentar limitaciones de capacidad y disponibilidad en el mercado.

Fotografía 4.3-2

Frac Tank



Fuente: (METALMECANICA ROJAS, 2019)

Fotografía 4.3-3

Tanques australianos



Fuente: (GRUPO XION, 2019)

- i. **Tanque No 1:** Agua proveniente de los canales alrededor del taladro con agua de lavado de equipo, agua lluvia que llegue a estos canales, o agua de lavado de cementación. Por otra parte, podría llegar agua producto del Dewatering (proceso que se describe más adelante) que no sea reutilizada y que requiere un tratamiento adicional.
- ii. **Tanque No 2:** A este tanque se transfieren los fluidos del tanque No.1 para tratamiento y las aguas provenientes del campamento; aguas grises luego de pasar por trampa de grasas, y aguas negras posterior tratamiento en la planta Red Fox.

En este tanque (No 2) se llevará a cabo el tratamiento con Sulfato de Aluminio, que cuenta con sistema de aireación y dosificación de químicos. El sistema de aireación consiste en una tubería de PVC de 3" colocada alrededor de la parte superior del tanque y con huecos pequeños a lo largo de los tubos. El sistema de dosificación consiste en un tanque plástico de 1000 litros unido a la descarga de la bomba eléctrica permitiendo la mezcla del químico con el agua de la piscina y que descarga por la tubería de PVC.

El tipo de tratamiento realizado incluye coagulación, floculación, ajuste de pH y sedimentación, empleando los químicos requeridos, de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras en laboratorio. Igualmente se realiza el ajuste de pH necesario y la aplicación de hipoclorito de calcio para control bacteriano.

4.3.4.4.3 Sistema de deshidratación (Dewatering)

Este proceso, se usará para separar las fases sólido-líquido del lodo base agua descartado, fluidos residuales acuosos provenientes del contrapozo, skimmer, remanentes del sistema de control sólidos y sistema activo de lodos.

En el proceso dewatering, resultan dos corrientes de residuos: el efluente o agua del proceso y los sólidos descartados en la deshidratación del desecho. El agua separada se reciclará en la preparación de la solución del polímero, para el mismo proceso dewatering o hacia el sistema de lodo base agua como dilución o como fluido base para la preparación de lodo nuevo; para esto el agua del dewatering debe cumplir la prueba de compatibilidad con el lodo para no afectar sus propiedades físicas y reológicas.

El exceso de agua en el dewatering, se enviará al sistema de tratamiento de aguas para mezclarlas con las aguas residuales, proceso en el cual se tiene la posibilidad de reciclarla, para preparación

del lodo, como agua de lavado o enfriamiento de equipos. Los sólidos del dewatering separados por las centrífugas decantadoras, se descargarán en un catch tank, destinado para este tipo de sólidos con el fin de asegurar su correcta segregación. Floculación selectiva con poliacrilamida: la floculación selectiva es el proceso en el que las centrífugas decantadoras trabajan directamente al sistema activo para mantener las propiedades del lodo (MBT- Methylene Blue Test, controlar el porcentaje de sólidos de baja gravedad y eliminación de sólidos reactivos) con ayuda química de polímeros (poliacrilamida) cuyo efluente será retornando al sistema activo. El objetivo de este procedimiento es controlar el MBT por la incorporación de arcillas reactivas altamente solubles y reciclar el fluido base (agua), tanto como sea posible, el efluente del proceso de floculación selectiva recuperando de esta manera, el valor de productos del fluido de perforación en el sistema activo y minimizando la generación de desechos sólidos y líquidos.

El valor agregado de la floculación selectiva es minimizar la captación de agua para la preparación y/o dilución del lodo lo cual disminuye de manera significativa la disposición de desechos sólidos y líquidos impactando menores áreas para disposición. La floculación selectiva se aplicará en la perforación de formaciones arcillosas altamente solubles en el fluido de perforación. En los pozos, el sistema de floculación selectiva se configurará utilizando los compartimientos con agitador de la unidad de Dewatering para la preparación de polímero y así realizar la mezcla de la Poliacrilamida en la concentración correspondiente. Ver **Tabla 4.3-8**.

Tabla 4.3-8 Sistema de deshidratación (Dewatering)

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS / FUNCIONES
Centrífuga decantadora	Se utiliza para la separación de las fases líquido-sólido. Debe generar la fuerza G adecuada para manejar el sistema, pues a muy baja velocidad no proporciona una adecuada separación y a una velocidad alta no rompe los flóculos.
Tanque de recolección de lodo	Posee un sistema de agitación para evitar la sedimentación de los sólidos y asegurar una mezcla homogénea para la deshidratación. Incluye una bomba centrífuga.
Tanques de polímero	Tanques para mezcla de los polímeros con agua fresca. Cada tanque tendrá un embudo para mezcla de polímero para asegurar máxima eficiencia en la mezcla.
Bombas de alimentación	Su función es alimentar de lodo la centrífuga, desde el tanque de lodo hasta el mezclador estático. Es una bomba de desplazamiento positivo que posee un discode velocidad variable para facilitar una tasa óptima de alimentación de la centrífuga a un conjunto dado de condiciones.
Tanque de dilución de agua	Es el tercer compartimento del sistema de dewatering. Inicialmente se llena con agua fresca y posteriormente el agua procesada deberá recircularse para ese fin.
Tanque de coagulación	Tanque utilizado para todos los coagulantes (ácido acético, cal) excepto ácido clorhídrico. Si se utiliza ácido acético, este se bombea directamente desde canecas.
Bomba de coagulante	Bomba de partes de teflón para ofrecer mayor resistencia al ácido; bombea el coagulante desde el tanque o desde la caneca de ácido. Cuenta con un regulador de aire para controlar la tasa de bombeo.
Mezclador estático	Es un múltiple de mezcla con desviadores de flujo en su interior para un mejor mezclado de los diferentes componentes del proceso de deshidratación. 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 reuso en el lavado del equipo, enfriamiento de bombas o preparación de lodo o para su disposición final, conduciéndola por medio de carro tanque.

Fuente: ECOPETROL S.A., 2012; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Para decidir si el agua proveniente del *Dewatering* se puede recircular para la preparación de lodos se siguen estas acciones:

- Medir pH, deberá estar entre 7-9.
- Medir densidad del lodo, deberá ser menor de 8,4 lpg.
- Medir dureza, debe ser menor de 250 mg/L.
- Ajustar propiedades del agua de *Dewatering* si se sale de algunos de los rangos anteriores.
- Tomar una muestra de un volumen mínimo de tres barriles equivalentes (1050 ml).
- Preparar tres muestras de la siguiente forma:
 - Lodo del sistema activo
 - Lodo del sistema activo más 21 ml (6%) de agua fresca
 - Lodo del sistema activo más 21 ml (6%) de agua de *Dewatering*
- Mezclar y medir las siguientes propiedades:
 - Lodo sistema activo
 - Lodo + Agua fresca
 - Lodo + Agua *Dewatering*
- Si alguno de los valores de las mezclas del lodo con el agua del *Dewatering* es mayor que la del lodo del sistema activo es incompatible y por lo tanto no se podrá usar en la dilución o preparación de lodo.

Se debe hacer la adición de Hipoclorito de Calcio al agua del *Dewatering* antes de reutilizarla en el Lodo del sistema activo para evitar la proliferación de bacterias en el lodo.

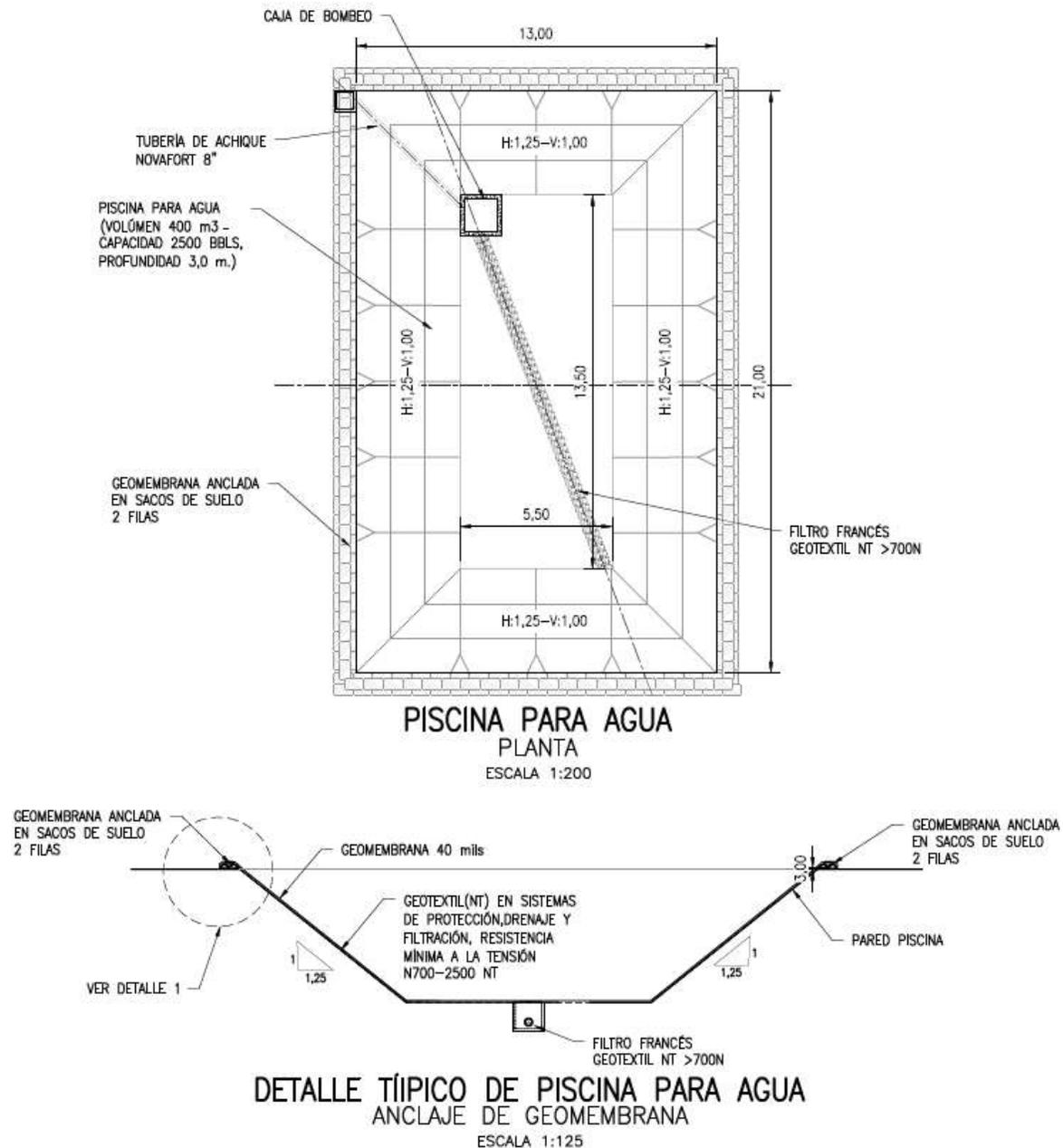
4.3.4.4 Piscinas de tratamiento

Se adecuarán áreas destinadas para la ubicación de piscinas o tanques donde se almacenarán agua, cortes de perforación entre otros. Algunas de las piscinas o tanques se utilizarán también para realizar el tratamiento de las aguas residuales no domésticas. Estas áreas se ubicarán al interior de las plataformas teniendo en cuenta las restricciones de la zonificación de manejo.

Tienen como fin almacenar y manejar agua cruda, aguas lluvia, aguas industriales de la perforación, lodos y cortes de perforación base agua. Las piscinas corresponden a excavaciones realizadas en el área de las plataformas, las cuales se impermeabilizan con geomembranas a fin de evitar posibles filtraciones del contenido que almacenan. Las características de estas instalaciones varían según los requerimientos y necesidades de las actividades operativas.

En general el proceso constructivo incluye: El replanteo y demarcación del área; la excavación y conformación con paredes inclinadas o taludes, los cuales tienen una pendiente de 1H:1V, o 2H:1H, etc.; la construcción de un filtro francés en la base; posteriormente se excava en superficie una zanja perimetral ubicada en promedio a una distancia de 1,0 m del borde de la piscina para anclar la geomembrana; entre la zanja y el borde de la piscina se conforma un dique con suelo o sacos rellenos de suelo para prevenir la entrada de flujos al interior de la piscina. Finalmente se instala la geomembrana con el propósito de impermeabilizar las superficies (Ver **Figura 4.3-7**).

Figura 4.3-7 Esquema típico de piscina para manejo de agua



Fuente: Anexo 2. Descripción del proyecto / 5.CIV / ECP-ULL-LLANOS141-IP01-0-CI-PL-001-D1; adoptado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.4.4.5 Facilidades Centrales de Producción (CPF), Facilidades Satélite (FS) y SSMA

➤ Facilidades Centrales de Producción (CPF)

Las Facilidades Centrales de Producción -CPF- recibirán la producción de crudo, gas y agua del Área de desarrollo Llanos 141 transportada por las troncales, tratada químicamente y diluida con

Nafta hasta una gravedad promedio API de 10.5. Estas corrientes llegarán al Manifold de entrada compuesto por cabezales que dirigen el fluido multifásico hacia los mezcladores estáticos donde pasan por un proceso de inyección de nafta recuperada y nafta nueva con el fin de que el fluido tenga una gravedad API de 15 a la entrada de cada separador trifásico, y luego se dirigirán hacia la primera fase de separación, compuesta por separadores trifásicos, desde donde se distribuye el gas, la mezcla de crudo emulsionado y el agua libre separadas hacia los correspondientes sistemas de manejo y tratamiento de cada fluido.

Finalmente, el agua resultante de los separadores trifásicos y de los tanques de lavado es direccionada al Sistema de Tratamiento de Agua de Producción (STAP) en el cual se logran condiciones fisicoquímicas aptas para inyección y luego es bombeada hacia la PIA para ser inyectada para recobro secundario o disposición. De igual manera el CPF podrá contar con un sistema de recibo, almacenamiento y bombeo de diluyente (Nafta de 66 API) hacia mezcladores estáticos y las troncales de distribución.

Para el Área de Desarrollo Llanos 141, el CPF contempla un esquema de tratamiento, donde el fluido de producción proveniente de los pozos productores ubicados en el área de LL-141 ingresará al manifold de recolección nuevo con capacidad de 205,000 BFPD, de allí se distribuirá al sistema de separación primario compuesto por cuatro (4) separadores trifásicos con capacidad de 55,000 BFPD operando a una presión de 35 psig, allí se separa en tres (3) corrientes:

- El crudo con BSW del 30% será enviado a cuatro (4) Gun barrel donde por tiempos de residencia de doce (12) horas y efecto de la gravedad se separa el agua presente en el crudo, posteriormente el crudo con bajo contenido de agua será almacenado en cuatro (4) tanques con capacidad de 12,000 bbls, de allí es transferido mediante el sistema de bombeo (booster – principal) con filosofía de operación 3+1 al oleoducto Porvenir con una presión de descarga de 700 a 1,900 psig.
- El agua será a dos (2) trenes de tratamiento de agua con tanques de almacenamiento para posterior transferencia mediante un sistema de bombeo nuevo de agua de inyección (booster - principal) compuesto por nueve (9) bombas booster y principales con filosofía de operación 8+1 y capacidad de 20,000 BWPD y presión de descarga de 3,167 psig.
- Para el manejo del gas se propone: Transferirlo a las comunidades cercanas mediante un sistema de compresión; Utilizarlo para autogeneración; Adicionalmente contar con un sistema de quema (Knout drum – tea) en caso de una contingencia.
- Sistema de Separación y Manejo de Agua (SSMA)
El sistema de separación y manejo de agua corresponde a una alternativa de desarrollo del área, en la que no se considera la proyección de CPF en Llanos 141; para lo cual se construye el SSMA en donde se maneja el crudo y el gas generados en el campo y se envían a través de una troncal hasta la estación Apiay para su tratamiento y manejo.

➤ **Facilidades Satélite (FS)**

Al interior del área que hace parte del Área de Desarrollo Llanos 141 se proyecta la construcción y operación de facilidades satélite, las cuales reúnen un conjunto de procesos, materiales, equipos y/o elementos requeridos en superficie para la separación, medición, y despacho de fluidos producidos provenientes de los pozos productores (Crudo, Gas, Agua de Producción) y cuya complejidad de operación es mucho menor que la asociada a un CPF.

4.3.4.4.6 Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción - STAP

El agua resultante de los procesos de deshidratación es enviada a un Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción -STAP- desde donde se dispone para diferentes usos en los procesos

solicitados para el Área de desarrollo: inyección para procesos EOR, Disposal, entrega con otros campos y/o bloques, etc. El objetivo de los STAP será reducir la concentración de contaminantes presentes en las aguas (principalmente grasas, aceites, metales pesados y sales minerales).

La calidad de las aguas obtenidas varía de una formación a otra y dependen especialmente de las condiciones del yacimiento; sin embargo, existen algunas particularidades que pueden ser consideradas como estándares en este tipo de aguas, como son:

- Fracciones de crudo emulsionado remanente del proceso de deshidratación.
- Concentraciones elevadas de metales pesados.
- Concentraciones elevadas de sales minerales.
- Temperaturas elevadas.

En virtud de lo anterior, los sistemas de tratamiento tendrán la capacidad de manejo de aguas con este tipo de condiciones; en este sentido, los sistemas estarán compuestos por un separador de placas corrugadas (o separador de placas inclinadas) -CPI-, una unidad de flotación -DAF-, filtros de aserrín, cáscara de nuez o de membrana y tanques de almacenamiento. Como sistemas de tratamiento complementarios, existe la posibilidad de instalar unidades de filtración avanzada o de ósmosis inversa. Cabe precisar que estos son sistemas estimados y que podrán variar tanto en componentes como en proceso en función de las condiciones de las aguas a tratar.

- **Separador de placas corrugadas -CPI:** El agua que ha sido separada del crudo se conduce a esta unidad en donde las gotas de aceite libres o dispersas, que han quedado remanentes en el agua, son eliminadas. Esto se logra gracias a la textura y disposición de las placas corrugadas dentro de la unidad, la permite que se minimice la distancia en la cual cada gota o partícula libre de aceite puede juntarse o aglomerarse con otras gotas e incrementar su tamaño, ocasionando el aumento de su flotabilidad y consecuente ascenso a la capa superficial del agua para ser posteriormente recolectadas o removidas mecánicamente.
- **Unidad de flotación:** Esta unidad opera como complemento al CPI aumentando la remoción de aceite presente en el agua. En este, las gota o partículas de aceite se adhieren a las burbujas de gas que se inyectan en la unidad disminuyendo su densidad, permitiendo acelerar su proceso de flotación hacia la superficie de la lámina de agua y posterior remoción mecánica.
- **Filtro para remoción de compuestos orgánicos:** Esta unidad permitirá la remoción del aceite soluble (hidrocarburos solubles) a partir de la adsorción; esta unidad posee materiales sólidos porosos conocidos como adsorbentes a través de los cuales pasa el agua en tratamiento. Los hidrocarburos solubles (y otros compuestos) se adhieren a la superficie adsorbente, siendo retenidos por la estructura porosa del material.

4.3.4.4.7 Entrega y/o recibo de fluidos con otros bloques o campos operados por Ecopetrol S.A. y/o terceros autorizados

El propósito de esta actividad es incorporar de forma eficiente los diferentes métodos y acciones relacionadas a la entrega y recibo de fluidos desde la infraestructura existente al interior del Área de desarrollo y hacia otros campos o infraestructura localizada fuera del área de influencia, considerando para este propósito diferentes medios de entrega utilizando líneas de flujo y/o transporte terrestre.

Como otra estrategia para el manejo de vertimientos se solicita autorizar la entrega y recibo de fluidos (emulsión, agua, crudo, gas, condensado, diluyentes y/o lodos, entre otros) tratados como se describió a lo largo del capítulo y/o sin tratar entre campos, bloques u otro tipo de infraestructura petrolera y/o entrega a terceros autorizados que cuenten con los permisos requeridos, a través de líneas de flujo y/o carro tanques y/u otros vehículos adecuados para el transporte de fluidos, para el posterior uso, manejo, tratamiento, almacenamiento y/o disposición de estos.

El propósito de contar con esta estrategia es optimizar procesos relacionados con el manejo, tratamiento, disposición y/o uso a los fluidos que se reciban, teniendo en cuenta la capacidad y disponibilidad para hacerlo de forma que, se pueda aprovechar las diferentes facilidades y estaciones, para el manejo y tratamiento de estos.

En cuanto a entrega a terceros se efectuará con empresas autorizadas que realicen la recolección, transporte, tratamiento y disposición adecuada de estos residuos, para lo cual deberán contar con los permisos y licencias ambientales respectivamente para ejecutar esta labor. Adicionalmente se deben presentar en los respectivos Informes de Cumplimiento Ambiental – ICA lo siguiente:

- a) Certificados de recolección y transporte emitido por la empresa respectiva, que indiquen: nombre de empresa que recolectó y transportó las aguas residuales, fechas de entrega, volúmenes de entrega, tipo de agua residual, sitio de recolección y destino de las aguas.
- b) Actas de recibo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales, que incluya: empresa que entrega, fecha, volumen, origen y tipo de agua residual.
- c) Copia de los permisos y/o licencias vigentes de las respectivas empresas que prestarán el servicio de recolección, transporte y disposición final de las aguas residuales.

4.3.5 Vertimientos en cuerpos de agua

El Área de desarrollo Llanos 141, no contempla vertimientos de aguas residuales mediante disposición en cuerpos de agua superficial.

4.3.6 Vertimiento en suelos – Aspersión en ZODAR

En este numeral se presenta el desarrollo del componente que se utilizó para realizar la solicitud del permiso de vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales tratadas sobre el suelo, generadas por las actividades del proyecto de desarrollo Llanos 141, cumpliendo con los lineamientos establecidos en los términos de referencia para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental para Proyectos de Exploración 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.

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 2,5 l/s hasta 2,72 l/s por ZODAR (dependiendo la unidad de suelo), en áreas de 2 ha o en una única área de hasta 8 hectáreas 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 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.

4.3.6.1 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 AD Llanos 141.

Para la caracterización de las unidades cartográficas de suelo aptas para el vertimiento en suelo, se debe aclarar que se realizaron 2 levantamientos de información agrologica 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 capítulo 2939-27_EIA_LLA141-CAP3.2.3_SUELOS 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 Chemilab acreditado por el IDEAM, los resultados de esta campaña de levantamiento de información se presenta en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_7 Resultados de laboratorio**

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.

4.3.6.1.1 Determinación de las áreas 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 del AD Llanos 141, que en total fueron 11 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 25%, tasas de infiltración muy bajas y características de las unidades al presentar susceptibilidad a la inundación; estos tres 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 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. También se tuvieron en cuenta 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 se identificaron 4 unidades cartográficas de suelo aptas para realizar la actividad, las cuales corresponden a: PV2, PV5, PV6 Y RV1. 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 se realizó en los puntos presentados a continuación:

4.3.6.1.2 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.

4.3.6.1.2.1 Complejo PV2 Fluvaquentic Dystrudepts, franca fina, activa, isohipertérmica - Fluvaquentic Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica - Aeric Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica. Perfil Modal: Cal_Vert_1.

La geomorfología de la unidad corresponde al paisaje de Piedemonte en tipo de relieve de Abanico Terraza en una forma de terreno de Plano de abanico en el clima cálido húmedo, que se caracteriza por tener un relieve plano con pendientes menores al 3%. La unidad presenta fases encharcables y zonas que son drenadas artificialmente.

Los materiales formadores de los suelos son depósitos de sedimentos aluviales moderadamente finos. Son suelos muy superficiales, muy pobres e imperfectamente drenados, extremada a fuertemente ácidos, alta y muy alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja y muy baja

El complejo está integrado en un 40% por los suelos Fluvaquentic Dystrudepts, franca fina, activa, isohipertérmica, en un 30% por suelos Fluvaquentic Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica y en el 30% restante por suelos Aeric Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica.

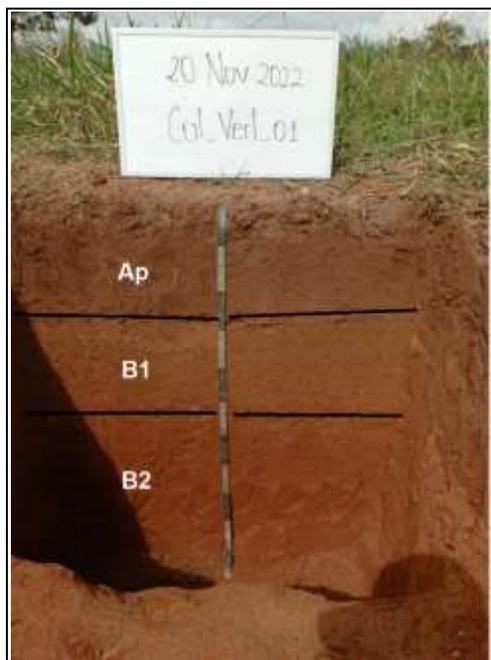
En campo, la unidad fue caracterizada a través del perfil modal Cal_Vert_1, el cual se distingue por presentar una textura de suelo de familia franca fina, clasificada como activa e isohipertérmica. En líneas generales, estos suelos exhiben una coloración que varía del rojo amarillento al rojo oscuro, y cuentan con un régimen de humedad que abarca desde el udico hasta el ácuico. (Ver **Fotografía 4.3-4** y **Tabla 4.3-9**).

Fotografía 4.3-4 Tipo de relieve de Abanico Terraza en forma de terreno de Plano de abanico terraza, con uso del suelo pastoreo extensivo, en el Complejo PV2, en la Vereda El Palmar, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta



Coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional: E: 4953884,1 - N: 2017961,6
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-9 Descripción del perfil modal del Complejo PV2 (CALICATA Cal_Vert_1)

	<p>Ap (0 - 28 cm) Color en húmedo rojo amarillento (5YR 4/6) sin moteados en el horizonte; textura franco-arcillosa en campo y en laboratorio; con estructura en bloques subangulares medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, finos; sin presencia de material rocoso ni grietas; con frecuente presencia de raíces, finas y medias (vivas); frecuente actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 2,25 MPa de compactación, temperatura edáfica de 28,7 °C.</p>
<p>B1</p>	<p>B1 (28 - 55 cm) Color en húmedo rojo (2,5YR 4/6) sin moteados en el horizonte; textura arcillosa en campo y franco arcillosa en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, finos; sin presencia de material rocoso, sin grietas; pocas raíces muy finas (vivas); y poca actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 2,75 MPa de compactación, temperatura edáfica de 28,4 °C.</p>
<p>B2</p>	<p>B2 (55 - 100 cm) Color en húmedo rojo oscuro (2,5YR 3/6) sin moteados; textura arcillosa en campo y en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos con moderado desarrollo; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, finos; sin presencia de grietas; ni fragmentos de roca; pocas raíces muy finas (vivas y muertas); y poca actividad de macroorganismos. 2,5 MPa de compactación, temperatura edáfica de 28,0 °C.</p>

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal del Complejo PV2 - CALICATA CAL_VERT_1 (Ver **4 Uso aprovechamiento RN, 4.3 Vertimiento , ZODAR, 4.3.7 Resultados de laboratorio**); muestran que son suelos con pH de extremadamente a ligeramente ácidos a profundidad (4,01; 4,08; 6,51 de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), con capacidad de intercambio catiónico medio a bajo (14,9; 10,7; 9,6 meq/100g); contenido de materia orgánica baja (1,96; 1,08; 0,56 % de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); contenidos de nitrógeno total bajos (0,02; 0,04 y 0,02%, de los tres horizontes muestreados); la conductividad eléctrica (0,02; 0,02; 0,02 mmhos/cm, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente) y porcentajes de

sodio intercambiable (<2.85 %, de los tres horizontes muestreados), lo que evidencia suelos normales, con contenidos de sales bajos y contenidos de sodio bajos, sin problemas en general, pues es solo limitante para algunos cultivos y coberturas naturales susceptibles; con saturación de bases baja a alta en profundidad (0,61; 6,51; 56,4%, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), fósforo bajo (4,4; 4,4; 5,01 ppm, de los tres horizontes muestreados), potasio bajo (0,09; 0,09; 0,08 meq/100g, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); la densidad aparente (1,08; 1,41; 1,17 g/cc, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), evidencia suelos con una alta porosidad en todos los horizontes, ya que en relación con la textura (FAr-FAr-Ar en los horizontes), se encuentran por debajo de los valores reportados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)¹. Presenta una fertilidad muy baja. En cuanto a metales pesados y otros elementos: El Arsénico (1,17 a 3,41 mg/Kg), Bario (<100 mg/Kg), Cadmio (<2 mg/Kg), Cromo total (<20,0 mg/Kg), Grasas y aceites (<0,0100%), Hidrocarburos (<0,0100 %), Plomo (de 25,2 a <20,0mg/Kg de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente) y Selenio (<0,500 mg/Kg) presentan contenidos por debajo a los límites reportados por el Protocolo de Louisiana 29B, Bowen, Shacklette y Boerngen (1984) y Baudo (1990); con lo cual no se evidencian concentraciones importantes de estos elementos.

4.3.6.1.2.2 Consociación PV5 Typic Hapludox, fina, activa, isohipertérmica - Oxic Dystrudepts. Perfil Modal: Cal_Vert_2

La geomorfología de la unidad corresponde al tipo de relieve de Terrazas en el paisaje de Piedemonte con formas de terreno asociadas a Planos de Terraza 2. Se caracteriza por un relieve plano con pendientes que oscilan entre 0 a 3%.

Los suelos de la unidad se han desarrollado sobre sedimentos finos aluviales que recubren depósitos de cantos y gravas medianamente alterados; de esta geoforma se presentan varios niveles de origen tectónico. Afectados por escurrimiento difuso generalizado. Profundos, texturas moderadamente finas a finas, bien drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja y muy baja; toxicidad por aluminio. La fertilidad natural muy baja.

La consociación está integrada en un 75% por los suelos Typic Hapludox, fina, activa, isohipertérmica, en un 25% por suelos Oxic Dystrudepts.

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal Cal_Vert_2 el cual se caracterizó por tener familia fina, activa, isohipertérmica. En términos generales son de color pardos a pardos fuertes, en un régimen de humedad údico (Ver **Fotografía 4.3-5** y **Tabla 4.3-10**).

¹ www.mn.nrcs.usda.gov

Fotografía 4.3-5 Tipo de relieve de Terrazas en forma de terreno de Plano de Terraza, con uso del suelo agrícola, en la Consociación PV5a, en el predio Yarumal - vereda Laguna Brava, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta



Coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional: E: 4961864,93 - N: 2022760,61
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-10 Descripción del perfil modal de la Consociación PV5 (CALICATA Cal_Vert_2)

	<p>Ap (0 - 2 cm) Color en húmedo pardo (7.5YR 4/4) sin moteados en el horizonte; textura arcillo limosa en campo y franco arenosa en laboratorio; con estructura en bloques finos con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, finos; sin material rocoso; sin grietas; con frecuente presencia de raíces, finas y medias (vivas); abundante actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 3,25 MPa de compactación, temperatura edáfica de 31,1 °C.</p>
	<p>B1 (2 - 50 cm) Color en húmedo pardo fuerte (7.5YR 5/6) sin moteados en el horizonte; textura franco arcillo limosa en campo y franco arcillo arenosa en laboratorio; con estructura en bloques finos y medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, finos; sin presencia de material rocoso; sin grietas; pocas raíces muy finas (vivas); y frecuente actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 3 MPa de compactación, temperatura edáfica de 30,5 °C.</p>
	<p>B2 (50 - 100 cm) Color en húmedo pardo fuerte (7.5YR 5/8) sin moteados; textura franco limoso en campo y franco arcillo arenosa en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos y medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, finos; sin presencia de grietas; ni fragmentos de roca; pocas raíces muy finas (vivas y muertas); y frecuente actividad de macroorganismos. 2,75 MPa de compactación, temperatura edáfica de 28,8 °C.</p>

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la Consociación PV5 - CALICATA CAL_VERT_2 (**4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento , ZODAR, 4.3_7 Resultados de laboratorio**); muestran que son suelos con pH extremadamente ácidos (4,33; 4,31; 3,98 de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), con capacidad de intercambio catiónico baja (8,5; 6,7; 6,5 meq/100g); contenido de materia orgánica de media a baja en profundidad (3,33; 1,7; 1,17 % de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); contenidos de nitrógeno total de medio a bajos (0,16; 0,09 y 0,06%, de los tres horizontes muestreados); la conductividad eléctrica (0,1; 0,06; 0,08 mmhos/cm, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente) y porcentajes de sodio

intercambiable (<2.85%, de los tres horizontes muestreados), lo que evidencia suelos normales, con contenidos de sales bajos y contenidos de sodio bajos, sin problemas en general, pues es solo limitante para algunos cultivos y coberturas naturales susceptibles; con saturación de bases baja (9,75; 9,6; 8,1%, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), fósforo bajo (5,44; 3,68; <3,51 ppm, de los tres horizontes muestreados), potasio bajo (0,13; 0,09; <0,0640 meq/100g, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); la densidad aparente (1,37; 1,39; 1,36 g/cc, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), evidencia suelos con una alta porosidad en todos los horizontes, ya que en relación con la textura (FA-FArA-FArA en los horizontes), se encuentran por debajo de los valores reportados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)². Presenta una fertilidad muy baja. En cuanto a metales pesados y otros elementos: El Arsénico (1,76 a 2,15 mg/Kg), Bario (<100 mg/Kg), Cadmio (<2 mg/Kg), Cromo total (de 22,4 a <20,0 mg/Kg), Grasas y aceites (<0,0100%), Hidrocarburos (<0,0100 %), Plomo (<20,0 mg/Kg de los horizontes A, B1 y B2 respectivamente) y Selenio (<0,500 mg/Kg) presentan contenidos por debajo a los límites reportados por el Protocolo de Louisiana 29B, Bowen, Shacklette y Boerngen (1984) y Baudó (1990); con lo cual no se evidencian concentraciones importantes de estos elementos.

4.3.6.1.2.3 Complejo PV6 Typic Fluventic Dystrudepts, fina, subactiva, isohipertérmica - Oxic Dystrudepts. Perfil Modal: Cal_Vert_3

La geomorfología de la unidad corresponde al tipo de relieve de terraza en el paisaje de Piedemonte con formas de terreno asociadas a Plano de terraza 1. Se caracteriza por un relieve plano, con pendientes 0-3%. Los suelos se han originado a partir de sedimentos mixtos aluviales que recubren depósitos de cantos y gravas poco alterados.

Se caracterizan por tener un microrelieve plano-cóncavo en el que se localizan zurales. Existen varios niveles de origen tectónico. Afectados por escurrimiento difuso generalizado. Son profundos a superficiales, texturas medias a finas, bien a pobremente drenados, extremadamente a muy fuertemente ácidos, fertilidad baja a muy baja, toxicidad por aluminio.

El complejo está integrado en un 55% por los suelos Fluventic Dystrudepts, fina, subactiva, isohipertérmica y en un 45% por suelos Oxic Dystrudepts.

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal Cal_Vert_3 el cual se caracterizó por pertenecer a una familia fina, subactiva, isohipertérmica. En términos generales son de color pardo claro a pardo oscuros, en un régimen de humedad údico (Ver **Fotografía 4.3-6** y **Tabla 4.3-11**).

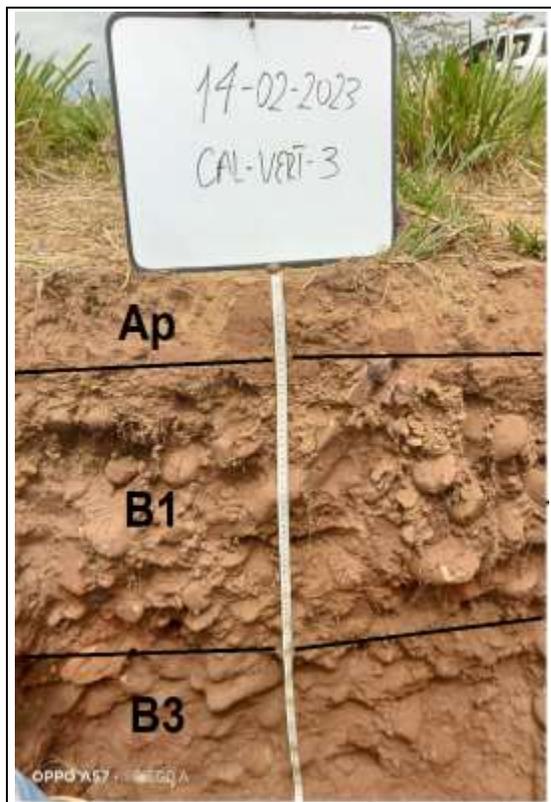
² www.mn.nrcs.usda.gov

Fotografía 4.3-6 Tipo de relieve de Terraza en forma de terreno de Plano de terraza 1, con uso del suelo en ganadería extensiva, en el complejo PV6, en el predio Las Marías de José- vereda Presentado, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta



Coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional: E: 4958546,22 - N: 2031826,64
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-11 Descripción del perfil modal del Complejo PV6 (CALICATA Cal_Vert_3)

	<p>Ap (0 - 10 cm)</p> <p>Color en húmedo pardo claro (7.5YR 6/3) sin moteados en el horizonte; textura franco arcillo limosa en campo y franco arenosa en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos y medios con desarrollo fuerte; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, muy finos; sin material rocoso; sin grietas; con frecuentes presencia de raíces, finas y medias (vivas); frecuente actividad de macroorganismos. Limite claro y plano. 4,5 MPa de compactación, temperatura edáfica de 34,0 °C.</p>
<p>B1</p>	<p>B1 (10 - 45 cm)</p> <p>Color en húmedo pardo (7.5YR 4/3) sin moteados en el horizonte; textura arcillo limoso en campo y franco en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, muy finos; presencia de material rocoso que ocupa el 25% del horizonte de tipo gravilla y cascajo de forma subredondeada con mediana alteración, sin grietas; frecuentes raíces finas y medias (vivas); y frecuente actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 3 MPa de compactación, temperatura edáfica de 31,0 °C.</p>
<p>B3</p>	<p>B2 (45 - 100 cm)</p> <p>Color en húmedo pardo fuerte (7.5YR 5/6) con moteados en el 5% del horizonte de color rojo (2.5YR 4/8); textura franco arcillo limoso en campo y franca en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos con desarrollo débil; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, finos; sin presencia de grietas; fragmentos de roca en el 40% del horizonte de tipo gravilla y cascajo de forma subredondeada y mediana alteración; pocas raíces muy finas (vivas y muertas); y frecuente actividad de macroorganismos. 2 MPa de compactación, temperatura edáfica de 30 °C.</p>

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal del Complejo PV6 - CALICATA CAL_VERT_3 (Ver **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_7 Resultados de laboratorio**); muestran que son suelos con pH de muy fuertemente a extremadamente ácidos

(4,86; 4,34; 4,43 de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), con capacidad de intercambio catiónico de media a baja (10,2; 7,7; 7,5 meq/100g); contenido de materia orgánica de alta a baja en profundidad (4,8; 2,56; 1,95 % de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); contenidos de nitrógeno total de medios a bajos en profundidad (0,03; 0,13 y 0,09%, de los tres horizontes muestreados); la conductividad eléctrica (0,2; 0,21; 0,13 mmhos/cm, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente) y porcentajes de sodio intercambiable (<2.85%, de los tres horizontes muestreados), lo que evidencia suelos normales, con contenidos de sales bajos y contenidos de sodio bajos, sin problemas en general, pues es solo limitante para algunos cultivos y coberturas naturales susceptibles; con saturación de bases de media a baja (37,3; 10,5; 8,06%, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), fósforo bajo (5,88 a <3,51 ppm, de los tres horizontes muestreados), potasio bajo (de 0,11 a <0,0640 meq/100g, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente); la densidad aparente (1,49; 1,47; 1,62 g/cc, de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente), evidencia suelos con una porosidad normal en todos los horizontes, ya que en relación con la textura (FA-F-F en los horizontes), se encuentran dentro de los valores reportados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)³. Presenta una fertilidad muy baja. En cuanto a metales pesados y otros elementos: El Arsénico (de 1,72 a 3,44 mg/Kg), Bario (<100 mg/Kg), Cadmio (<2 mg/Kg), Cromo total (<20,0 mg/Kg), Grasas y aceites (<0,0100%), Hidrocarburos (<0,0100 %), Plomo (<20,0 mg/Kg de los horizontes Ap, B1 y B2 respectivamente) y Selenio (<0,500 mg/Kg) presentan contenidos por debajo a los límites reportados por el Protocolo de Louisiana 29B, Bowen, Shacklette y Boerngen (1984) y Baudó (1990); con lo cual no se evidencian concentraciones importantes de estos elementos.

4.3.6.1.2.4 Consociación RV1 Oxic Dystrudepts, fina, semiactiva, isohipertérmica. Perfil Modal: Cal_Vert_4

Geomorfológicamente la unidad corresponde al tipo de relieve de Terraza agradacional nivel 3 del paisaje de Planicie, de relieve plano, con pendientes menores de 3%, existe presencia de encharcamientos sectorizados en época de altas precipitaciones.

Los suelos se han derivado de Depósitos mixtos aluviales; y se caracterizan por la presencia de zurales en las zonas con microrelieve plano-cóncavo. Afectados por encharcamientos. Son profundos a moderadamente profundos, texturas medias a finas, bien a imperfectamente drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja, ligera toxicidad por aluminio; susceptibles a encharcamientos.

La consociación está integrada en un 100% por los suelos Oxic Dystrudepts, fina, semiactiva, isohipertérmica.

En campo la unidad se caracterizó mediante el perfil modal Cal_Vert_4 el cual se caracterizó con familia fina, semiactiva, isohipertérmica. En términos generales son de color gris a pardos oscuros, en un régimen de humedad údico (Ver **Fotografía 4.3-7** y **Tabla 4.3-12**).

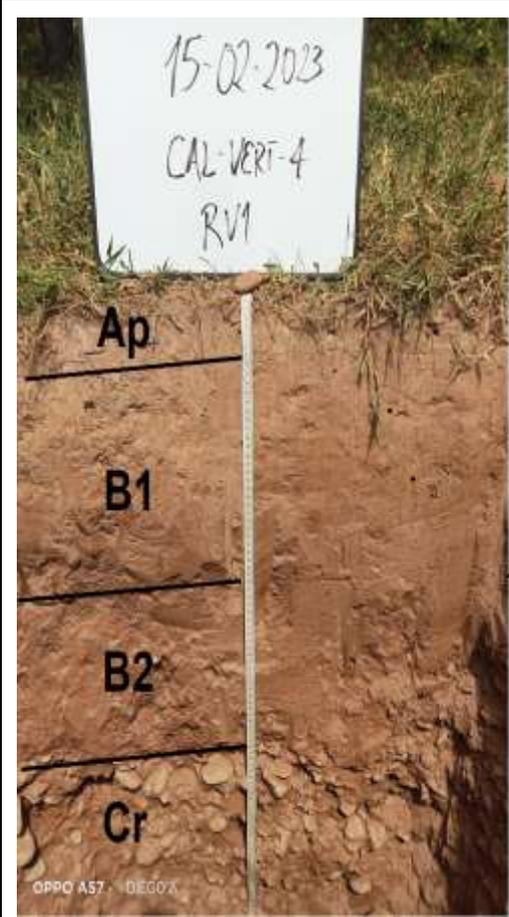
³ www.mn.nrcs.usda.gov

Fotografía 4.3-7 Tipo de relieve de Terraza Agradacional nivel 3 en forma de terreno de Plano de Terraza, con uso del suelo en pastoreo extensivo, en la Consociación RV1, en la vereda Presentado, jurisdicción del municipio de Cumaral - Meta



Coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional: E: 4962585,96 - N: 2033373,08
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-12 Descripción del perfil modal de la Consociación RV1 (CALICATA Cal_Vert_4)

	<p>Ap (0 - 5 cm) Color en húmedo gris (7,5YR 6/1) sin moteados en el horizonte; textura arcillo limosa en campo y franco arcillosa en laboratorio; con estructura en bloques finos y medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, finos; sin presencia de material rocoso ni grietas; con abundante presencia de raíces, medias y finas (vivas); frecuente actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 3,25 MPa de compactación, temperatura edáfica de 31,3 °C.</p>
<p>B1</p>	<p>B1 (5 - 30 cm) Color en húmedo gris rosado (7,5YR 6/2) sin moteados en el horizonte; textura arcillo limosa en campo y franco arcillo arenosa en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos y medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; pocos poros, muy finos; sin presencia de material rocoso ni grietas; con frecuente presencia de raíces, finas y muy finas (vivas); frecuente actividad de macroorganismos. Limite difuso y plano. 4,5 MPa de compactación, temperatura edáfica de 31,6 °C.</p>
<p>B2</p>	<p>B2 (30 - 60 cm) Color en húmedo pardo (7,5YR 5/3) sin moteados en el horizonte; textura franco arcillo limoso en campo y franco arcilloso en laboratorio; con estructura en bloques subangulares finos y medios con desarrollo moderado; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, muy finos; presencia de material rocoso en el 5% del horizonte de tipo gravilla y cascajo subredondeados con mediana alteración; sin grietas; con pocas raíces, muy finas (vivas); frecuente actividad de macroorganismos. Limite claro y plano. 4,5 MPa de compactación, temperatura edáfica de 31,0 °C.</p>
<p>Cr</p>	<p>Cr(60 - 100 cm) Color en húmedo pardo oscuro (7,5YR 5/6) sin moteados en el horizonte; textura arcillo limosa en campo; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo friable, en mojado pegajoso y plástico; pocos poros, muy finos; sin presencia de grietas; con fragmentos de roca en el 50% del horizonte de tipo cascajo y guijarro de forma subredondeada con mediana alteración; pocas raíces finas (vivas y muertas); y poca actividad de macroorganismos. 3,75 MPa de compactación, temperatura edáfica de 28,3 °C.</p>

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Los análisis fisicoquímicos del suelo presentados en el Perfil modal de la Consociación RV1 - CALICATA CAL_VERT_4 (Ver **4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3.7 Resultados de laboratorio**); muestran que son suelos con pH muy fuertemente ácidos a extremadamente ácidos (4,8; a 4,48 de los horizontes muestreados), con capacidad de intercambio catiónico de bajo a medio (de 7,5 a 12,3 meq/100g); contenido de materia orgánica de media a baja en profundidad (1,86; 4,9; 1,5% de los horizontes muestreados); contenidos de nitrógeno total de bajo a medios (0,09; 0,25 y 0,07%, de los dos horizontes muestreados); la conductividad eléctrica (0,04; 0,03 y 0,02 mmhos/cm, de los horizontes muestreados) y porcentajes de sodio intercambiable (<2,85%, de los tres horizontes muestreados), lo que evidencia suelos normales, con contenidos de sales bajos y contenidos de sodio bajos, sin problemas en general, pues es solo limitante para algunos cultivos y coberturas naturales susceptibles; con saturación de bases baja (12,9; 13,4 y 5,68%, de los horizontes muestreados), fósforo bajo (<3,51 a 8,84 ppm, de los horizontes muestreados), potasio bajo (0,08; 0,19 y <0,064 meq/100g, de los horizontes muestreados); la densidad aparente (1,29; 1,51 y 1,62 g/cc, de los horizontes muestreados), evidencia suelos con una alta porosidad en el primer horizonte y horizontes compactados los 2 horizontes subsuperficiales, ya que en relación con la textura (FAR – FArA - FAR en los horizontes), el primero se encuentra por debajo de los valores reportados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)⁴, mientras que los dos horizontes subsuperficiales se encuentran levemente por encima de los valores referencia. Presenta una fertilidad baja. En cuanto a metales pesados y otros elementos: El Arsénico (de 1,7 a 4,67 mg/Kg), Bario (<100 mg/Kg), Cadmio (<2 mg/Kg), Cromo total (<20,0 mg/Kg), Grasas y aceites (de 0,0125 a <0,0100%), Hidrocarburos (<0,0100 %), Plomo (<20,0 mg/Kg de los horizontes) y Selenio (<0,500 mg/Kg) presentan contenidos por debajo a los límites reportados por el Protocolo de Louisiana 29B, Bowen, Shacklette y Boerngen (1984) y Baudó (1990); con lo cual no se evidencian concentraciones importantes de estos elementos.

4.3.6.2 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 calicatas siguiendo lo estipulado por la normatividad ambiental vigente referido al literal A del numeral 1 del Art. 6 del Dec. 050 del 2018 en cuanto a la caracterización físico, química y biológica las cuales se presentan en la **Tabla 4.3-14**. 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 4.3-13** 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.

Tabla 4.3-13 Unidades cartográficas y perfiles modal representativos caracterizados

UNIDAD	OBSERVACIÓN	COORDENADAS ORIGEN NACIONAL	
		Este	Norte
Complejo PV2	Cal_vert_1	4953884,1	2017961,6
Consociación PV5	Cal_vert_2	4961864,93	2022760,61
Complejo PV6	Cal_vert_3	4958546,22	2031826,64
Consociación RV1	Cal_Vert_4	4962585,96	2033373,08

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4 www.mn.nrcs.usda.gov

A continuación, se consignan los resultados de la calidad del suelo en los posibles ZODAR seleccionados para el vertimiento mediante riego por aspersion al suelo, los resultados de los análisis de laboratorio y su respectiva acreditación se presentan en el **4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_7 Resultados de laboratorio, Otros**. En la **Tabla 4.3-14** 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 **4.3.6.4.1**.

Tabla 4.3-14 Resultados análisis de laboratorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Dec. 050 del 2018)

Parámetro	Unidad	CAL-VERT-01/0-28cm	CAL-VERT-01/28-55cm	CAL-VERT-01/55-100cm	Cal_vert_2_0/2cm	Cal_vert_2_2/50cm	Cal_vert_2_50/100cm	Cal_vert_3_0/10cm	Cal_vert_3_10/45cm	Cal_vert_3_45/100cm	Cal_vert_4_0/5cm	Cal_vert_4_5/30cm	Cal_vert_4_30/60cm
		MS328964	MS328965	MS328970	MS347386	MS347387	MS347388	MS347567	MS347568	MS347569	MS347797	MS347798	MS347799
Acidez Intercambiable *	cmol(+)/Kgss	3,13	3,43	<0,354	2,06	2,46	2,66	0,71	2,81	2,61	2,92	2,28	4,64
Aluminio de cambio*	cmol(+)/Kgss	2,57	2,63	<0,354	1,99	2,41	2,56	0,63	2,77	2,56	2,72	2	4,15
Arsénico Total*	mg/kg ss	1,17	2,37	3,41	1,76	2,15	1,95	1,72	3,44	2,89	1,7	4,67	4,15
Bario Total (Ba)*	mg Ba/kg ss	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Bases Totales	cmol(+)/kg	0,0905	0,0927	0,083	0,831	0,643	0,526	3,81	0,809	0,605	0,965	1,65	0,602
Cadmio Total*	mg/kg ss	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
Calcio Cambiable*	cmol(+)/kg	0,561	0,469	5,02	0,377	0,21	0,115	2,54	0,448	0,316	0,491	0,952	0,385
Calcio Soluble	mg/kg ss	<20,0	<20,0	<20,0	0,453	0,27	0,333	1,43	0,543	0,343	0,265	0,487	0,224
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)*	cmol(+)/kg	14,9	10,7	9,6	8,5	6,7	6,5	10,2	7,7	7,5	7,5	12,3	10,6
Carbono orgánico total (COT)*	%	1,14	0,63	0,32	1,93	0,99	0,68	2,79	1,48	1,13	1,08	2,81	0,87
Cloruros*	mg/kg ss	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6	<26,6
Coliformes Termotolerantes*	NMP/g ss	6,49	15,2	4,27	63,9	20,4	64,1	52,2	20,4	64,4	62,4	30,6	76,4
Coliformes Totales*	NMP/g ss	29,9	179	27,3	267	193	274	301	164	218	325	264	334
Conductividad Eléctrica*	mmhos/cm	0,0271	0,0215	0,0168	0,103	0,0581	0,0838	0,201	0,206	0,132	0,0472	0,0343	0,0202
Conductividad Hidráulica*	cm/h	0,101	0,104	0,131	5,92	9,04	6,44	4,72	5,47	8,74	5,85	4,42	5,38
Contenido de Materia Orgánica*	%	1,96	1,08	0,56	3,33	1,7	1,17	4,8	2,56	1,95	1,86	4,9	1,5
Cromo Total*	mg/kg ss	<20,0	<20,0	<20,0	22,4	21,1	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0
Densidad Aparente*	g/cm ³	1,08	1,41	1,17	1,37	1,39	1,36	1,49	1,47	1,62	1,29	1,51	1,62
Densidad Real*	g/cm ³	2,27	2,27	2,37	2,65	2,63	2,59	2,57	2,57	2,53	2,54	2,34	2,49
Enumeración de Bacterias Amonificantes	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150

Parámetro	Unidad	CAL-VERT-01/0-28cm	CAL-VERT-01/28-55cm	CAL-VERT-01/55-100cm	Cal_vert_2_0/2cm	Cal_vert_2_2/50cm	Cal_vert_2_50/100cm	Cal_vert_3_0/10cm	Cal_vert_3_10/45cm	Cal_vert_3_45/100cm	Cal_vert_4_0/5cm	Cal_vert_4_5/30cm	Cal_vert_4_30/60cm
		MS328964	MS328965	MS328970	MS347386	MS347387	MS347388	MS347567	MS347568	MS347569	MS347797	MS347798	MS347799
Enumeración de Bacterias Denitrificantes (Suelos)	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150
Enumeración de Bacterias Nitrificantes	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150
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		Ver Anexo	Ver Anexo	Ver Anexo
Fósforo Disponible*	mg/kg ss	4,4	4,4	5,01	5,44	3,68	<3,51	5,88	<3,51	<3,51	<3,51	8,84	<3,51
Fracción Ligera de la Materia Orgánica***	N.A.	0,13	0,12	0,09	0,25	0,13	0,12	0,17	0,18	0,08	0,35	0,11	0,07
Grasas y Aceites*	%	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	0,0125	<0,0100	<0,0100
Hidrocarburos*	%	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Hierro Total*	mg/kg ss	39410	27497	32528	<40,0	<40,0	<40,0	17414	22439	24137	12004	21455	26287
Humedad Natural*	%	25,9	22,6	45,1	6,5	9,4	10,2	4,3	12,3	14,4	14	12	14,2
Macroporosidad	%	19,3	10,8	14,5	18	15,5	13,7	11,5	12,2	10,2	13,9	10,1	9,6
Magnesio Cambiable*	cmol(+)/kg	0,07	0,03	0,2	0,11	0,09	0,04	0,85	0,1	0,07	0,06	0,22	0,04
Magnesio Soluble	mg/kg ss	<4,00	<4,00	<4,00	0,142	0,0567	0,125	0,683	0,127	0,0921	0,0424	0,114	0,0380
Mercurio Total*	mg/kg ss	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	0,32	<0,200
Microporosidad	%	33,1	27	36,2	30,3	31,6	33,8	30,5	30,6	25,7	35,3	25,4	25,4
Nitrógeno Potencialmente Mineralizable	mg/kg	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00	<7,00
Nitrógeno total*	%	0,02	0,04	0,02	0,16	0,09	0,06	0,03	0,13	0,09	0,09	0,25	0,07
Permeabilidad	cm/h	0,35	0,25	0,33	7,64	9,32	6,87	4,56	5,08	8,14	6,04	4,81	5,56
pH*	Unidades de pH	4,01	4,08	6,51	4,33	4,31	3,98	4,86	4,34	4,43	4,8	4,48	4,49
Plomo Total*	mg/kg ss	<20,0	25,2	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0

Parámetro	Unidad	CAL-VERT-01/0-28cm	CAL-VERT-01/28-55cm	CAL-VERT-01/55-100cm	Cal_vert_2_0/2cm	Cal_vert_2_2/50cm	Cal_vert_2_50/100cm	Cal_vert_3_0/10cm	Cal_vert_3_10/45cm	Cal_vert_3_45/100cm	Cal_vert_4_0/5cm	Cal_vert_4_5/30cm	Cal_vert_4_30/60cm
		MS328964	MS328965	MS328970	MS347386	MS347387	MS347388	MS347567	MS347568	MS347569	MS347797	MS347798	MS347799
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)*	%	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85	<2.85
Potasio Cambiable*	cmol(+)/kg	0,09	0,09	0,08	0,13	0,09	<0,0640	0,11	<0,0640	<0,0640	0,08	0,19	<0,0640
Potasio Soluble	mg/kg ss	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0	<25,0
Potencial de óxido reducción*	mV	387	400	319	202	169	256	189	318	340	343	398	355
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)*	Sin Und	0,2	0,19	0,28	0,55	1,02	0,64	1,45	0,05	2,65	1,79	0,58	1,88
Recuento de Actinomicetos	UFC/g	24	19	36	210	140	260	33	39	22	27	34	38
Recuento de Bacterias Celulolíticas	UFC/g	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Recuento de Bacterias Fijadoras de Nitrógeno	UFC/g	<100	<100	<100	120	<100	220	230	260	140	180	260	210
Recuento de Bacterias Oxidantes de Amonio	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150
Recuento de Bacterias Oxidantes de Nitrito	NMP/g ss	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150	<150
Recuento de Bacterias Solubilizadoras de fosfatos	UFC/g	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Recuento de Hongos	UFC/g	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Respiración Bacial	mg/CO2	0,1	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08	0,07	0,09	0,07	0,1	0,07	0,06
Retención de Humedad (Capacidad de Campos) ***	%	31	31,9	32	21,3	23,8	27,6	32,2	24,3	28,2	33,2	32,9	33,6
Retención de Humedad (Sat)***	%	49,1	44,7	44,8	34	35,5	38,8	44,4	34	39,4	46,3	46	46,3

Parámetro	Unidad	CAL-VERT-01/0-28cm	CAL-VERT-01/28-55cm	CAL-VERT-01/55-100cm	Cal_vert_2_0/2cm	Cal_vert_2_2/50cm	Cal_vert_2_50/100cm	Cal_vert_3_0/10cm	Cal_vert_3_10/45cm	Cal_vert_3_45/100cm	Cal_vert_4_0/5cm	Cal_vert_4_5/30cm	Cal_vert_4_30/60cm
		MS328964	MS328965	MS328970	MS347386	MS347387	MS347388	MS347567	MS347568	MS347569	MS347797	MS347798	MS347799
Retención de Humedad Punto Marchitez***	%	16,8	17,2	17,3	11,5	12,8	14,9	17,9	13,5	16,8	18,9	18,3	21,7
Salmonella**	NMP/4g	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100
Saturación de Aluminio*	%	72,8	79	0,93	70,5	78,9	83	14,2	77,4	80,9	73,8	54,9	87,3
Saturación de Bases*	%	0,61	6,51	56,4	9,75	9,6	8,1	37,3	10,5	8,06	12,9	13,4	5,68
Selenio Total*	mg/kg ss	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Sodio Cambiable*	cmol(+)/kg	0,25	0,1	0,08	0,22	0,25	0,33	0,31	0,2	0,16	0,33	0,29	0,12
Sodio Soluble	mg/kg ss	<10,0	<10,0	<10,0	0,302	0,411	0,304	1,49	0,0298	1,24	0,701	0,317	0,682
Sulfatos*	mg/kg ss	<2,50	<2,50	<2,50	3,2	4,81	4,56	4,28	5,77	3,04	3,36	5,27	4,92
Textura - Arcilla*	%	28,94	32,48	43,95	17,97	30,17	26,08	7,83	17,95	22,04	30,21	28,37	34,36
Textura - Arena*	%	30,38	28,16	21,96	66,17	49,8	60,07	59,79	49,86	45,69	39,42	45,24	43,42
Textura - Limo*	%	40,68	39,36	34,09	15,86	20,03	13,85	32,3	32,19	32,27	30,37	26,39	22,22
Textura*	Clase Textural	Franco Arcilloso	Franco Arcilloso	Arcilloso	Franco Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arenoso	Franco	Franco	Franco Arcilloso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcilloso
Estructura - Tipo	Clasificación	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular	Blocosa Subangular
Estructura - Clase	Clasificación	Media	Fina	Fina	Fina	Fina y media	Fina y media	Fina y media	Fina	Fina	Fina y media	Fina y media	Fina y media
Estructura - Grado	Clasificación	Moderada	Moderada	Débil	Moderada	Moderada	Moderada	Fuerte	Moderada	Débil	Moderada	Moderada	Moderada
Color	Código de color Munsell	5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6	7,5YR 4/4	7,5YR 5/6	7,5YR 5/8	7,5YR 6/3	7,5YR 4/3	7,5YR 5/6	7,5YR 6/1	7,5YR 6/2	7,5YR 5/3
Consistencia - húmedo	Clasificación	Firme	Firme	Firme	Firme	Firme	Firme	Firme	Firme	Friable	Friable	Friable	Firme
Consistencia - mojado	Clasificación	Ligeramente pegajosa	Pegajosa	Pegajosa	Ligeramente pegajosa	Ligeramente pegajosa	Pegajosa	Ligeramente pegajosa	Ligeramente pegajosa	Pegajosa	Ligeramente pegajosa	Ligeramente pegajosa	Pegajosa
Plasticidad	Límite plástico (%)	21,97	22,29	24,67	3,98	20,9	20,6	8,63	17,6	18	25,6	25,9	24,6
Compactación	MPa	2,25	2,75	2,5	3,25	3	2,75	4,5	3	2	3,25	4,5	4,5
Temperatura	°C	28,7	28,4	28	31,1	30,5	28,8	34	31	30	31,3	31,6	31
Profundidad efectiva	Clase	Moderadamente profundo			Moderadamente profundo			Moderadamente profundo			Moderadamente profundo		
Infiltración	cm/h	0,60			6,29			3,91			0,93		

Fuente: Laboratorio Chemilab, 2023, modificado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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

De la **Tabla 4.3-15** 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 (**4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_7 Resultados de laboratorio y 4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_4 Resultados prueba de infiltración**) 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 4.3-15 Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV2 apta para realizar aspersión

UNIDAD DE SUELOS PV2	CAL_VERT_1 0/28 cm	CAL_VERT_1 28/55 cm	PARÁMETROS DE DISEÑO (PROMEDIO)
Textura	FAr	FAr	FAr
Capacidad de campo (%)	31	31,9	31,06
Punto de marchitez (%)	16,8	17,2	16,83
Densidad aparente (gr/cm3)	1,08	1,41	1,10
Infiltración básica (mm/h)	5,99		5,99

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-16 Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV5 apta para realizar aspersión

UNIDAD DE SUELOS PV5	CAL_VERT_2 0/2 cm	CAL_VERT_2 2/50 cm	PARÁMETROS DE DISEÑO (PROMEDIO)
Textura	FA	FArA	FArA
Capacidad de campo (%)	21,3	23,8	23,63
Punto de marchitez (%)	11,5	12,8	12,71
Densidad aparente (gr/cm3)	1,37	1,39	1,39
Infiltración básica (mm/h)	62,9		62,9

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-17 Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo PV6 apta para realizar aspersión

UNIDAD DE SUELOS PV6	CAL_VERT_3 0/15 cm	CAL_VERT_3 15/50 cm	PARÁMETROS DE DISEÑO (PROMEDIO)
Textura	L	FL	FL
Capacidad de campo (%)	32,2	24,3	26,93
Punto de marchitez (%)	17,9	13,5	14,97
Densidad aparente (gr/cm3)	1,49	1,47	1,48
Infiltración básica (mm/h)	39,11		39,11

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Tabla 4.3-18 Parámetros hidrofísicos de la unidad de suelo RV1 apta para realizar aspersión

UNIDAD DE SUELOS RV1	CAL_VERT_4 0/5 cm	CAL_VERT_4 5/30 cm	PARÁMETROS DE DISEÑO (PROMEDIO)
Textura	FAr	FArA	FArA
Capacidad de campo (%)	33,2	32,9	32,95
Punto de marchitez (%)	18,9	18,3	18,40
Densidad aparente (gr/cm3)	1,29	1,51	1,47
Infiltración básica (mm/h)	9,35		9,35

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.3 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.

4.3.6.3.1 Elementos climáticos para los diseños de los sistemas de riego

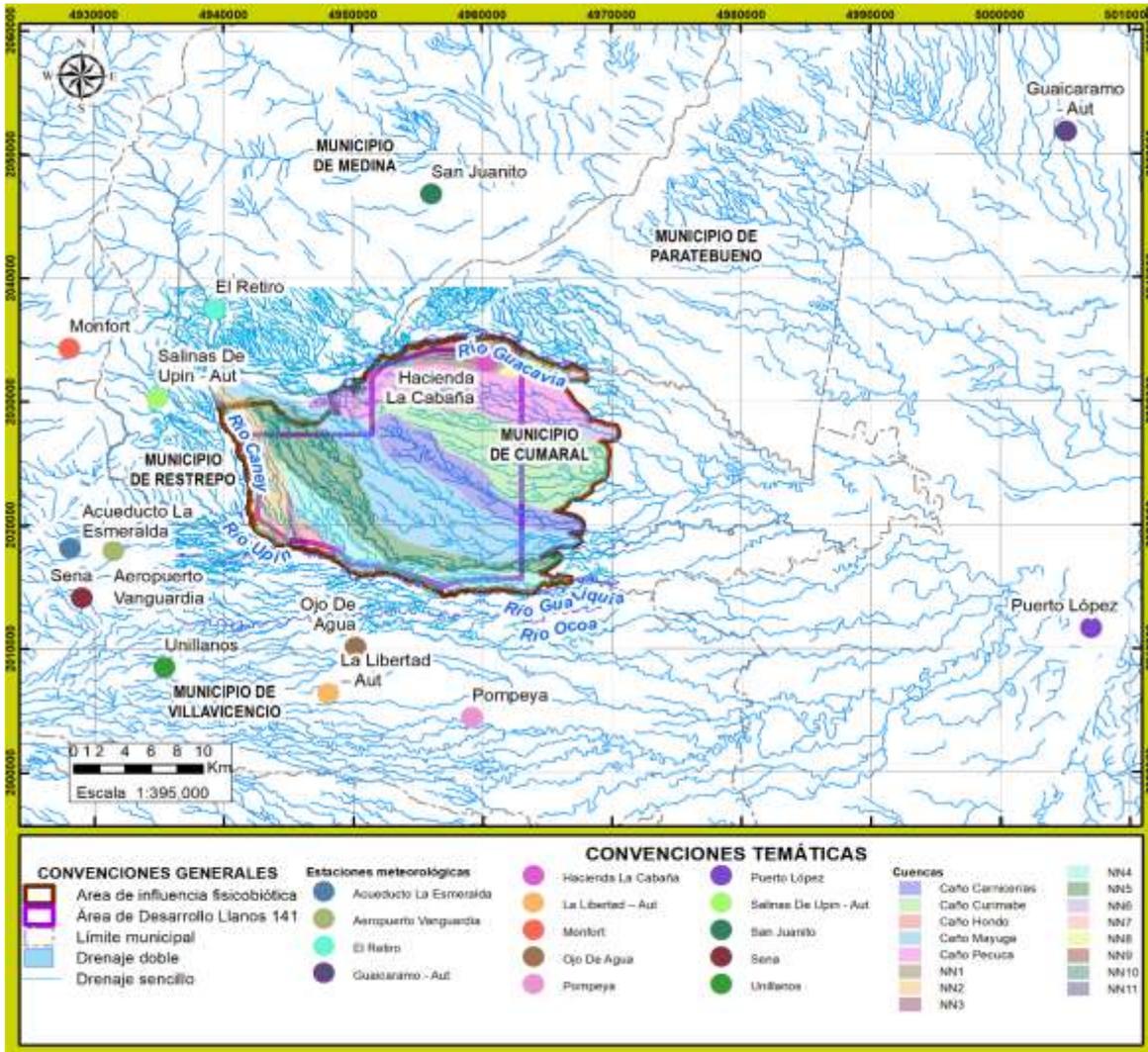
Las variables climáticas usadas en el diseño del sistema de aspersión para realizar la disposición de aguas sobre una cobertura vegetal de gramíneas mediante aspersión y para la modelación del vertimiento presentada posteriormente, fueron: precipitación media multianual; evapotranspiración potencial; precipitación diaria total multianual y velocidad media del viento. La evapotranspiración potencial se calculó por el método de Thornthwaite, y se utilizaron los valores presentados en el Capítulo 3 en el aparte de clima de las estaciones climatológicas ordinarias, las cuales se presentan en la **Tabla 4.3-19** y su distribución espacial en la **Figura 4.3-8**. Estas estaciones hidrometeorológicas, son las más cercanas al AD Llanos 141 y que cuentan con los datos para realizar los cálculos necesarios con los que se realizaron los diseños de los sistemas de aspersión y la posterior modelación del vertimiento en suelo en la zona no saturada. (Ver **Anexo 4_ Uso_ aprovechamiento_ RN, 4.3_ Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.6_2 Series de clima**)

Tabla 4.3-19 Estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización del área del proyecto

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE DE ESTACIÓN	CORRIENTE	MUNICIPIO	DEPTO.	COORDENADAS (CTM12)		ELEVACIÓN m.s.n.m
						E	N	
35030040	PG	Acueducto La Esmeralda	San Juan	Villavicencio	Meta	4928140,9	2018110,2	550
35035020	SP	Aeropuerto Vanguardia	Quebrada Don Abad	Villavicencio	Meta	4931485,2	2017917,5	422
35040010	PM	El Retiro	-	Medina	Cundinamarca	4939381,6	2037447,9	870
35105050	CO	Guaicaramo - Aut	-	Barranca De Upía	Meta	5005147,4	2051784	190
35045020	CO	Hacienda La Cabaña	Guayuriba	Cumaral	Meta	4960346,1	2033205,9	305
35025110	AM	La Libertad - Aut	-	Villavicencio	Meta	4948082,4	2006352,9	336
35030020	PM	Monfort	Coello	El Calvario	Meta	4928120,6	2034292,2	1100
35030050	PM	Ojo De Agua	Ocoa	Villavicencio	Meta	4950208,1	2010084	300
35020060	PM	Pompeya	Luisa	Villavicencio	Meta	4959167,9	2004401,3	260
35010010	PM	Puerto López	Canal Pachaquiar	Puerto López	Meta	5007045,1	2011604,9	182
35035110	AM	Salinas De Upin - Aut	-	Restrepo	Meta	4934902,4	2030284	690
35050020	PM	San Juanito	Meta	Villavicencio	Cundinamarca	4956085,8	2046774,3	426
35030030	PG	Sena	Orinoco	Villavicencio	Meta	4929043,8	2014100,8	425
35035070	CP	Unillanos	Guayuriba	Medina	Meta	4935425,5	2008500,5	340

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Figura 4.3-8 Localización de las estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización del área del proyecto



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.3.2 Datos climáticos y justificación del periodo de simulación de la modelación del vertimiento en suelo

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 diaria incluidos en HYDRUS 1D son promedios diarios multianuales de los últimos treinta años, sin embargo, se aclara que para algunas estaciones este periodo es menor según la disponibilidad de las series. Esto permite aminorar la influencia de la variabilidad climática interanual en las series, obteniendo valores representativos de las condiciones climáticas promedio de la región.

Los registros de precipitación y los valores diarios de evapotranspiración potencial que se derivaron de datos de evapotranspiración potencial media mensual provienen de las estaciones relacionadas

a continuación en la **Tabla 4.3-20** y que fueron seleccionadas gracias a un análisis de polígonos de Thiessen, que permite determinar el porcentaje de influencia que tiene cada estación, para el área de influencia del proyecto. A partir de esto, se puede determinar los valores promedio diarios multianuales para las variables empleadas en el modelo

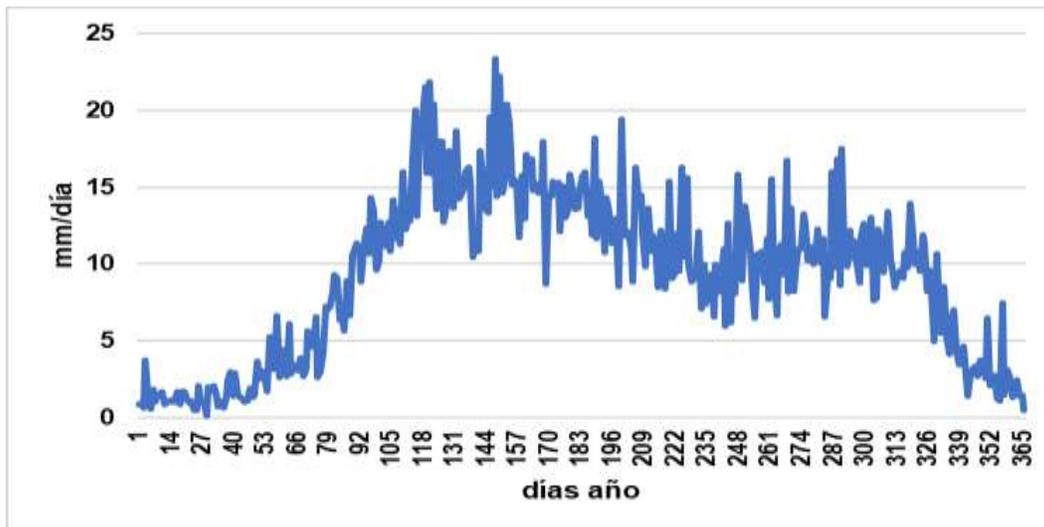
Tabla 4.3-20 Estaciones empleadas y análisis Thiessen

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE DE ESTACIÓN	% INFLUENCIA (THIESEN)
35035020	SP	Aeropuerto Vanguardia	2,65
35040010	PM	El Retiro	8,6
35045020	CO	Hacienda La Cabaña	57,7
35030050	PM	Ojo De Agua	26,7
35020060	PM	Pompeya	4,35

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Como se puede evidenciar en la **Figura 4.3-9**, el clima en la región donde se encuentra el área de estudio presenta un comportamiento monomodal, que se caracteriza por un periodo de altas precipitaciones y uno de bajas precipitaciones, el periodo de altas precipitaciones se presenta entre inicios de abril a principios de noviembre, mientras que entre finales de noviembre a principios de marzo descienden las precipitaciones.

Figura 4.3-9 Precipitación media diaria multianual

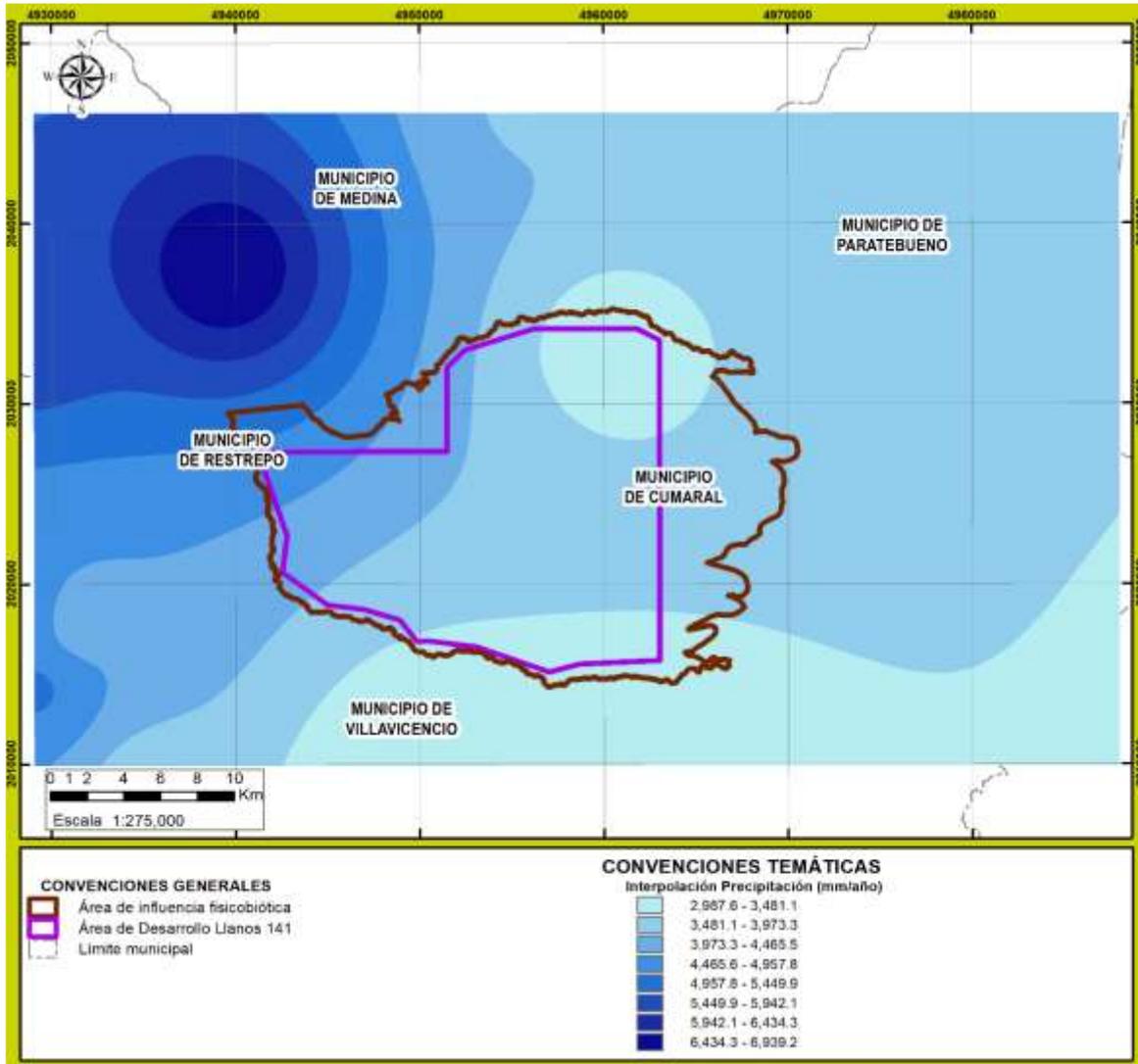


Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Con base al análisis de los datos se generó el histograma de precipitación, del cual se resalta que el mayor valor de precipitación se alcanza en mayo para cada una de las estaciones analizadas, y que así mismo desciende considerablemente durante enero. Ver **4.3.1.2 Series de clima**, en donde se presenta la información suministrada por el IDEAM y la respectiva memoria de cálculo.

En la **Figura 4.3-10** se presenta la distribución espacial de la precipitación anual o isoyetas, generadas a partir de los registros meteorológicos de las estaciones del IDEAM y cuyos datos se utilizaron en la modelación.

Figura 4.3-10 Distribución espacial de la precipitación media total anual multianual en el área de estudio



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.4 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 4.3.6.8.4.3 del presente capítulo; 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, provocarán 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

4.3.6.4.1 Cálculo de la velocidad de infiltración básica

Dentro de los muchos 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 área de influencia del AD Llanos 141, se presentan en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_4 Pruebas de infiltración.**

Como se dijo 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 valoró los resultados obtenidos de acuerdo con la **Tabla 4.3-21** que presenta la categorización establecida por el IGAC.

Tabla 4.3-21 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: (IGAC, 2014)

Para el presente estudio las pruebas de infiltración se realizaron en la salida de campo efectuada en el mes de noviembre del 2022 y febrero de 2023 realizadas por profesionales de Antea Group y cuyos resultados se presentan en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_4 Pruebas de infiltración** unidades aptas para realizar vertimiento y su respectiva categorización se muestran en la **Tabla 4.3-22.**

Tabla 4.3-22 Resultados de las pruebas de infiltración en campo de los perfiles caracterizados de las unidades aptas para realizar vertimiento mediante campos de aspersión

UNIDAD CARTOGRÁFICA DE SUELO	RESULTADOS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN		CLASIFICACIÓN
	ID	INFILTRACIÓN BÁSICA [cm/hr]	
PV2	Cal_Vert_1	0,6	Moderadamente lenta
PV5	Cal_Vert_2	6,29	Moderada
PV6	Cal_Vert_3	3,91	Moderada
RV1	Cal_Vert_4	0,93	Moderadamente lenta

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

De acuerdo con la caracterización y las pruebas de infiltración de los perfiles de las unidades aptas, no se tienen restricciones para realizar vertimiento en suelo mediante sistemas de riego por

aspersión en las unidades de suelo aquí expuestas, siempre y cuando se operen correctamente los tiempos de riego y caudales de disposición que posteriormente se expondrán en este capítulo.

Esta información resultante junto con los análisis de laboratorio fueron insumos para la realización de los diseños de los sistemas de riego tipo para cada unidad de suelos apta para tal fin.

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 presentarían saturaciones superficiales o encharcamientos, puesto que la capacidad utilizada de infiltración de la unidad de suelo está muy por debajo a la capacidad máxima de infiltración.

4.3.6.5 Variación del nivel freático

La profundidad de la tabla de agua para el AI del AD Llanos 141 se tomó del Capítulo 3.2.7 Hidrogeología. En esta se extrajo la información de los niveles estáticos de los acuíferos, caracterizados a partir del inventario de puntos de agua realizado. En este se puede apreciar que a nivel general las profundidades de los niveles estáticos superan los 2 m, sin embargo, se encuentran unidades con valores más superficiales, llegando hasta 1 m. Al promediar los rangos establecidos para cada unidad, se establece que la unidad con una menor profundidad del nivel estático son los acuíferos de los Depósitos Aluviales recientes asociados a Cauces Mayores (Q2-al1) y Depósitos Aluviales recientes asociados a Cauces Menores (Q2-al2) que presenta un valor de 1,5 m, valor que se tomará como referencia del límite inferior para las modelaciones del vertimiento. **Tabla 4.3-23.**

Tabla 4.3-23 Calificación de la profundidad del nivel freático en el AD Llanos 141

CATEGORÍA	ACUÍFERO	NIVEL ESTÁTICO
Acuíferos de baja a mediana productividad	Acuífero de la Formación Guayabo Miembro Superior (N2c)	2,04 -16 m
	Acuífero de los Depósitos de Abanico Aluvial (Q1-Ab)	1,89 - 7,49 m
	Acuífero del Depósito de Abanico – Terraza (N-Qt)	1,1 - 9,15 m
Acuíferos de baja productividad	Acuífero de los Depósitos de Llanura de Inundación (Q2-lli)	Sin dato
	Acuíferos de los Depósitos Aluviales recientes asociados a Cauces Mayores (Q2-al1) y Depósitos Aluviales recientes asociados a Cauces Menores (Q2-al2)	1,5 m

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.6 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 aparte **4.3.6.8.4.4** del presente capítulo.

4.3.6.7 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 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” (Citado por el decreto 1076 del 2015) y que aplican para el presente Estudio de Impacto Ambiental. Los FUN de vertimiento (Formulario Único Nacional de Solicitud de Permiso de Vertimientos) se presentan en el **4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_1 FUN_Vert_Suelo.**

4.3.6.7.1 Datos del solicitante del permiso de vertimiento

Tabla 4.3-24 Datos del solicitante

NOMBRE O RAZÓN SOCIAL	ECOPETROL S.A.
NIT. DE LA EMPRESA	899 999 068 -1
REPRESENTANTE LEGAL:	Ricardo Roa Barragán
DOCUMENTO DE IDENTIDAD:	19.451.246 de Bogotá D.C
CEDULA DE CIUDADANÍA	
DIRECCIÓN	Carrera 13 # 36-24 Bogotá D.C

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.7.2 Poder debidamente otorgado al apoderado

Se presenta en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_3 Documentación requerida, 4.3_3.1 Certificados de existencia y representación legal**

4.3.6.7.3 Certificado de existencia y representación legal de la persona jurídica

Se presenta en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_3 Documentación requerida, 4.3_3.1 Certificados de existencia y representación legal.**

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

El presente permiso se solicita a 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 Área de desarrollo Llanos 141. En los PMAE se presentará la información correspondiente a los predios utilizados para realizar el vertimiento en suelo.

4.3.6.7.5 Costo del proyecto

El costo del total del proyecto se estima en 27,92 MUSD (Veintisiete millones novecientos veinte mil dólares).

4.3.6.7.6 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 del presente estudio. Por lo cual estos podrán ser usados siempre y cuando los puntos sean autorizados. Para mayor profundidad consultar los capítulos 4.1._Aguas_Superficiales y 4.2._Aguas_Subterránea del presente estudio

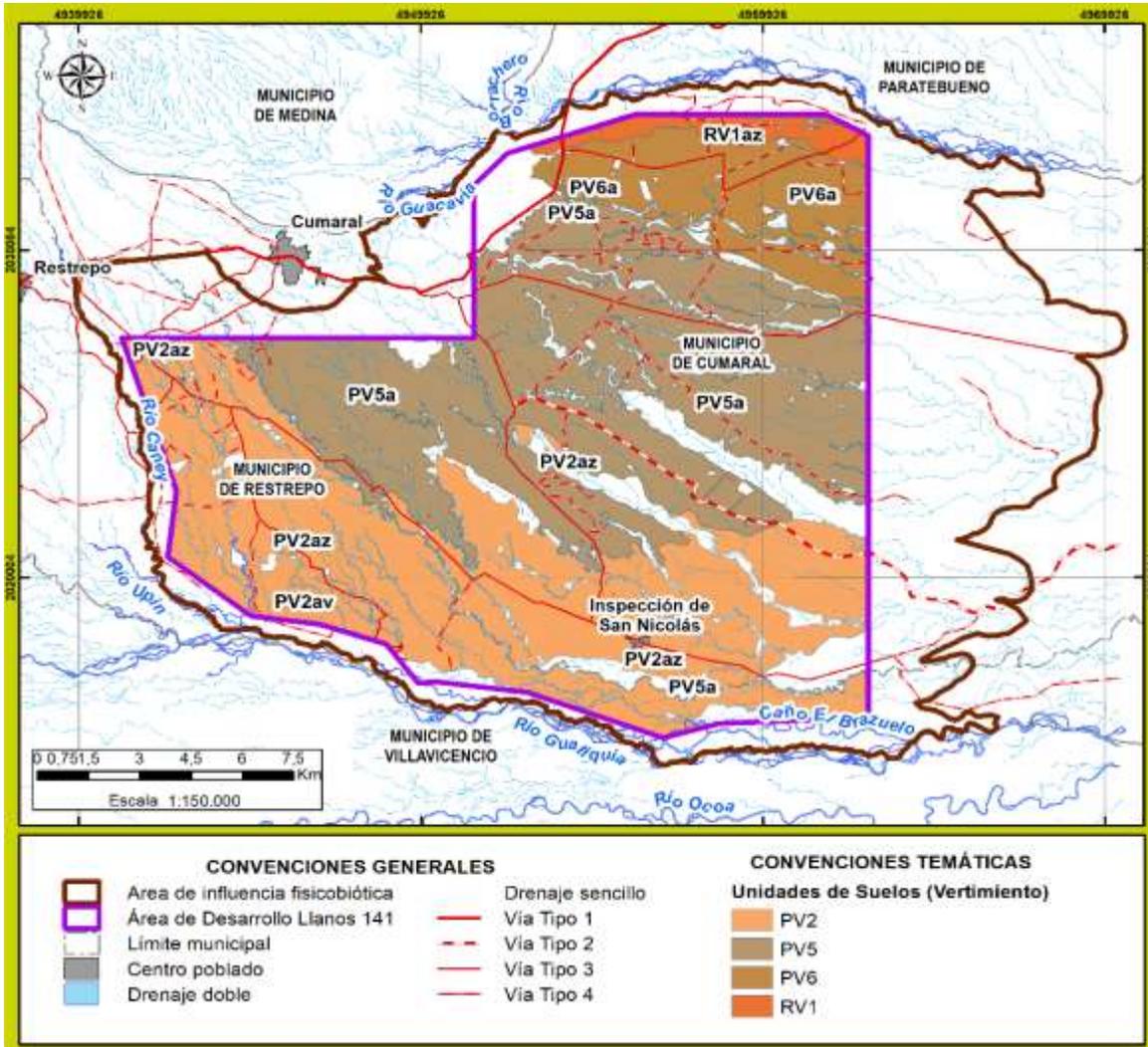
4.3.6.7.7 Características de las actividades que generan el vertimiento.

Estas se presentaron en el numeral 4.3.2 del presente capítulo.

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

A continuación, en la **Figura 4.3-11** 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 4.3-11 Distribución de las unidades cartográficas de suelo de interés y aptas para realizar vertimientos en suelo



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.7.9 Caudal de la descarga expresada en litros por segundo

El caudal de descarga o vertimiento se presenta en la **Tabla 4.3-25** para cada unidad de suelo dentro de la solicitud del permiso de vertimiento.

Tabla 4.3-25 Caudal de vertimiento para cada unidad de suelo

UNIDAD DE SUELO -PERFIL MODAL	ÁREA DE LA ZODAR	CAUDAL DE VERTIMIENTO
	[ha]	[L/s]
PV2 (Cal_Vert_1)	2	2,7
PV5 (Cal_Vert_2)	2	2,72
PV6 (Cal_Vert_3)	2	2,7
RV1 (Cal_Vert_4)	2	2,5

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.7.10 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 (Tabla 4.3-26) y el caudal máximo a verter que se presentó en la Tabla 4.3-25.

Tabla 4.3-26 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]
PV2 (Cal_Vert_1)	10,8	5	6
PV5 (Cal_Vert_2)	10,5	4	7,5
PV6 (Cal_Vert_3)	10,8	5	6
RV1 (Cal_Vert_4)	11,4	6	5

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.7.11 Tiempo de la descarga expresada en horas por día

Teniendo un caudal de descarga constante. En la Tabla 4.3-26, se encuentra el tiempo de descarga o tiempo de riego expresado en horas por día.

4.3.6.7.12 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 4.3-26.

4.3.6.7.13 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 4.3.3.

4.3.6.7.14 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 detallada de los sistemas y alternativas de tratamiento y manejo se presentan en el numeral 4.3.4. 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.

4.3.6.7.15 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, en el municipio de Restrepo, 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. Para el caso del municipio de Cumaral, como lo menciona el anexo 4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_3 Documentación requerida,

4.3_3.2 Uso del suelo municipal, la alcaldía manifiesta su inconformismo con la exploración y/o explotación de hidrocarburos que pretende adelantar la compañía Ecopetrol S.A., por lo tanto, no da respuesta positiva a las solicitudes de información realizadas. Mientras tanto a continuación se presenta el uso reglamentado encontrado en los POT vigentes para las unidades de suelo solicitadas para vertimiento dentro del Área de Desarrollo Llanos 141:

Tabla 4.3-27 Uso Reglamentado EOT – POT Municipal en las unidades de suelos solicitadas para la realización de vertimiento en suelo

UNIDAD SUELOS	USO_PROPUESTO (POT - EOT)	ÁREA ha	%AIFB
PV2	AGROPECUARIO	4638,03	10,82
	CONSERVACIÓN POMCA	915,21	2,14
	BOSQUE PROTECTOR NO PRODUCTOR	915,33	2,14
	RESTAURACIÓN POMCA	6,36	0,01
	SUELO SUBURBANO TIPO 3	176,11	0,41
	ZONA GANADERA DE DESARROLLO AGRÍCOLA	3721,71	8,68
PV5	AGROPECUARIO	0,09	0
	BOSQUE PROTECTOR NO PRODUCTOR	1798,22	4,2
	CONSERVACIÓN POMCA	4	0,01
	CORREDOR TURÍSTICO	7,41	0,02
	ZONA GANADERA DE DESARROLLO AGRÍCOLA	8380,58	19,55
	ZONA MIXTA EN DESARROLLO AGROPECUARIO	580,89	1,36
PV6	BOSQUE PROTECTOR NO PRODUCTOR	255,91	0,6
	CORREDOR TURÍSTICO	21,18	0,05
	ZONA GANADERA DE DESARROLLO AGRÍCOLA	2075,51	4,84
	ZONA MIXTA EN DESARROLLO AGROPECUARIO	382,97	0,89
RV1	BOSQUE PROTECTOR NO PRODUCTOR	64,01	0,15
	CORREDOR TURÍSTICO	6,16	0,01
	ZONA GANADERA DE DESARROLLO AGRÍCOLA	374,48	0,87
	ZONA MIXTA EN DESARROLLO AGROPECUARIO	226,12	0,53
Total		24550,27	57,27

**Se aclara que, aunque existen usos asociados a áreas de conservación y/o protección, corredores turísticos y suelo suburbano la localización final de los ZODAR deberá contemplar la exclusión de estas áreas nombradas anteriormente con el fin de no afectar áreas protegidas por parte de los municipios. Esto se verá reflejado en los certificados de uso expedidos por las secretarías de planeación municipal de los predios en donde se implementarán los ZODAR.*

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.7.16 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 **4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, 4.3_8 PGRMV** se encuentra el Plan de Gestión para el Manejo del Riesgo de Vertimientos elaborado bajo lo establecido en el Decreto 3930 de 2010, sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales para situaciones y eventos no planeados, suspensiones temporales o fallas entre otros.

4.3.6.8 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 AD Llanos 141, 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.

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.

4.3.6.8.1 Localización georreferenciada de proyecto, obra o actividad.

La información referente a la localización del proyecto se encuentra en el **Capítulo 2.1 Localización** del presente estudio. Adicionalmente, en el **Numeral 4.3.6.7.8** 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.

4.3.6.8.2 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 4.3.2.** del presente capítulo se exponen las actividades generadoras de las aguas residuales que posterior de 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 **numeral 4.3.3** del presente capítulo, se presenta la caracterización de las aguas residuales al igual que en el numeral anterior, discriminadas entre domésticas y no domésticas (industriales); posteriormente en el **numeral 4.3.4** 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 2.2.2 Estrategias de desarrollo** se ahondan cada uno de los temas solicitados en el presente numeral.

4.3.6.8.3 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 del presente estudio, en el cual, se identificó dentro del escenario Con Proyecto, la actividad denominada “Manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica e industrial” que se encuentra en la Fase denominada “ACTIVIDADES TRANSVERSALES”. En esta se evaluaron cuatro impactos que se generan por la realización de la actividad asociada al vertimiento en suelo, los cuales fueron: “Alteración a la calidad del suelo” en donde se expone que esta actividad “está asociado a la disposición final de las aguas residuales (posterior a tratamiento) al suelo mediante campos de aspersión, la cual puede generar un cambio en las propiedades químicas de este, sin embargo, teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de la modelación del vertimiento presentada en el capítulo 7 de este estudio, la probabilidad de contaminación al suelo y las aguas subterráneas es moderada, por lo cual su significancia es Alta negativa. La evaluación determina un efecto directo de

magnitud media, resiliencia tolerante, tendencia estable, extensión local, exposición permanente, recuperabilidad lenta, acumulativo y no sinérgico, con una probabilidad de ocurrencia muy evidente, obteniendo un nivel de importancia LOCALIZADO”.

El segundo impacto identificado es el de “Alteración a la calidad del recurso hídrico subterráneo” en este impacto se expone que “algunas de las opciones para la disposición de residuos líquidos es el vertimiento en ZODAR y riego en vías, estos vertimientos podrían causar un efecto negativo sobre la calidad del agua subterránea si llegaran a alcanzar dichos niveles. El efecto del impacto se considera indirecto ya que el vertimiento no se haría directamente en la zona saturada, de magnitud media dado que las características fisicoquímicas de las aguas a disponer podrían ser diferentes a las naturales del acuífero, y con lo cual se podría causar un cambio de temporal subsanado por la recarga por precipitación debido a que se daría la disolución de los iones. La tendencia es creciente y acumulativo ya que la actividad de vertimiento se realizaría de manera frecuente, con una extensión puntual asociada al ZODAR y vías. El impacto no es sinérgico. La importancia del impacto es MENOR, y es bastante probable que ocurra ya que las aguas vertidas en el ZODAR y en vías tendrían una probabilidad importante de ingresar como parte de la recarga natural de los acuíferos, aunque después de haber sufrido procesos de depuración natural en la zona no saturada, la significancia del impacto es Media (-)”.

El tercer impacto identificado es la “Generación de olores ofensivos” en donde se expone que “La generación de olores ofensivos es directa, la repercusión se presenta como consecuencia primaria del manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica e industrial, la magnitud es alta ya que genera un deterioro o pérdida del ecosistema y/o la comunidad de índole intermedio, es asimilado parcialmente, el ecosistema y/o la comunidad no se recupera fácilmente quedando pequeñas secuelas o consecuencias del impacto, el efecto de los olores ofensivos se mantiene constante con el transcurso del tiempo en los ecosistemas o en la comunidad, estos olores afectarían a la vereda o la comunidad que se encuentre cercana al lugar donde se realice el tratamiento y disposición final del agua residual, la exposición a estos olores es de manera permanente, la recuperabilidad de esta manifestación es moderada mediante técnicas de disminución de olores, el efecto del impacto no se incrementa por la ocurrencia reiterada de una actividad generadora, su probabilidad de ocurrencia es posible que ocurra. Esta evaluación determina una importancia LOCALIZADO y con una significancia Media (-).”

Finalmente, el cuarto impacto identificado es la “Generación y/o alteración de conflictos sociales” En donde se expone que “En lo que tiene que ver con contratación de mano de obra la significancia se estableció media por las posibles incidencias que podría representar el impacto, es decir, los conflictos que pudieran generarse a partir de esta actividad. En función de su carácter negativo y de la incidencia que estas situaciones podrían tener en el desarrollo normal del proyecto, se ha evaluado con duración temporal y reversibilidad y recuperabilidad en el mediano plazo. Se calificó como un impacto sinérgico y acumulativo pues la constante aparición de situaciones de conflictividad podría repercutir en algo más trascendente como un paro que afecte el desarrollo normal de las actividades del proyecto.

- Construcción de obras para cruces de drenajes (ocupaciones de cauce)
- Obras para manejo de drenajes, aguas superficiales y aguas aceitosas
- Transporte, acopio, tendido de tubería
- Transporte, hincado, plomado y cimentado de estructuras de apoyo (incluye instalación del sistema de puesta a tierra)
- Manejo, tratamiento, transporte y disposición final de lodos y cortes de perforación
- Cierre de compromisos sociales y ambientales
- Manejo de Productos químicos y combustibles

- Manejo, tratamiento y disposición final de agua residual doméstica e industrial
- Manejo y disposición de residuos sólidos domésticos, industriales y especiales

Las actividades generadoras que se describen para este impacto son de carácter negativo con una significancia media, considerando que la probabilidad de ocurrencia aunque alta no reviste certeza, dichas actividades se presentarán a lo largo de todas las etapas del proyecto, posibilitando que durante el desarrollo del mismo se pueden presentar conflictos entre la comunidad y el operador por inconformismos con los procesos de información con las comunidades, acuerdos, uso, aprovechamiento y/o afectación de recursos naturales, afectación a predios o conflictos entre personas durante el avance y desarrollo normal de las actividades específicas del proyecto, dentro de la calificación de las actividades es importante resaltar, que la resiliencia del impacto se consideró entre reducido y moderado, con una intensidad de media a alta y una recuperabilidad de corto y largo plazo, y una reversibilidad de corto y mediano plazo, ya que la gestión de responsabilidad social de la operadora, debe garantizar que se dé respuesta a las inquietudes generadas en la comunidad, para permitir el desarrollo armónico del proyecto, por tanto la probabilidad del impacto disminuye.”

La matriz donde se evaluaron los impactos presentados anteriormente se presenta en el Anexo 5.1 Evaluación Ambiental / Matriz_Con_Proyecto-EIA_AD_LLanos_141.

4.3.6.8.4 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, 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).

4.3.6.8.4.1 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 AD Llanos 141, 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 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 la **Tabla 4.3-28**, en los cuales prevalece el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984 - Art 72 y 74 (adoptados por los Art 2.2.3.3.9.14 y 2.2.3.3.9.16 del decreto 1076 del 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.

Tabla 4.3-28 Regulación de calidad del vertimiento

PARÁMETRO	UNIDAD	REGULACIÓN DE AGUA Y USOS DEL RECURSO		
		DECRETO 1594 DE 1984		
		(CITADO POR EL DECRETO 1076 del 2015)		
		ART. 72		ART. 74
		(ARTÍCULO 2.2.3.3.9.14.)		(ARTÍCULO 2.2.3.3.9.16.)
		USUARIOS EXISTENTES	USUARIO NUEVO	CONCENTRACIÓN SUSTANCIAS DE INTERÉS
pH	Unidad	5 a 9	5 a 9	-
Temperatura	°C	<40	<40	-
Sólidos suspendidos domésticos e industriales	mg/L	Remoción >50%	Remoción >80%	-
Material flotante	-	Ausente	Ausente	-
DBO Desechos domésticos		Remoción >20%	Remoción >80%	-
DBO Desechos industriales	mg/L	Remoción >20%	Remoción >80%	-
Grasas y aceites	mg/	Remoción >80%	Remoción >80%	-
Arsénico	mg/L			0,5
Bario	mg/L			5
Cadmio	mg/L			0,1
Cloruros	mg/L			-
Sulfatos	mg/L			-
Cobre	mg/L			3
Cromo	mg/L			0,5
Fenol	mg/L			0,2
Níquel	mg/L			2
Plata	mg/L			0,5
Plomo	mg/L			0,5
Selenio	mg/L			0,5
Nitratos	mg/L			-

Fuente: Decreto 1594 de 1984 adoptado por el Decreto 1076 del 2015, consultado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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 (**Tabla 4.3-29**), 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 (relacionado en el aparte) 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.

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 4.3-29**) 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 4.3-29 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	-	-
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. Modificado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.8.4.2 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 (AR) tratadas. Estas zonas de disposición de aguas residuales (ZODAR) corresponderán a áreas dentro o anexas a cada plataforma 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 Área de Desarrollo Llanos 141, donde se contempla la construcción y operación de plataformas de explotación. Dentro del área de la localización se encuentran incluidos las ZODAR (localizado) o su respectivo Campo de Aspersión.

En los ZODAR se realizará la disposición de las aguas residuales no domésticas 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 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 150 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 25%. 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, la localización de las ZODAR no debe hacerse en sitios en los que su implementación genere tala o desmonte de bosque no intervenido.

➤ 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 las piscinas o tanques de almacenamiento de aguas residuales tratadas. La capacidad de estas piscinas o 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 AR, 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 las piscinas 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 2,72 l/s y una capacidad de filtrado de partículas de 200 Mesh⁵.

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 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).

⁵ Cantidad de orificios por pulgada cuadrada.

Conducción y distribución: Hace referencia al sistema de tuberías y accesorios necesarios para conducir y distribuir las AR desde la (s) piscina(s) o 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, perdidas 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 menor impacto en el paisaje.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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 lámina 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 Kc 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 4,16 mm/día que es el promedio de las estaciones más cercanas al AD Llanos 141 presentadas anteriormente).

- 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)⁶.

- 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

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

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 verano (que agrícola mente hablando son las épocas en las cuales la evapotranspiración supera la precipitación, no en épocas de invierno, cuando la precipitación supera la evapotranspiración).

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

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

Donde:

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

- xi. **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 PV2 y PV6**

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 5022 SD de Boquilla roja de 3.0 mm de la marca NAANDANJAIN, para ser empleado en el diseño de las unidades **PV2 (Cal_Vert_1)** y **PV6 (Cal_Vert_3)**. 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.

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

Tabla 4.3-30 Característica del Aspersor plástico de impacto 5022 SD de boquilla roja de 3.0 mm, Marca NAANDANJAIN

5022SD Tabla de Rendimiento - Boquilla única, Largo SD (negro)									
Tasas de precipitación (mm/h) y uniformidad (CU) para diversos espaciamientos									
Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (m ³ /h)	D (m)	Espaciamiento (m)					
				10x10	10x12	12x12	12x14	14x14	
3.0 Rojo	2.5	0.570	21.0	5.7	4.8	4.0	3.4	2.9	
	3.0	0.630	22.0	6.3	5.3	4.4	3.8	3.2	
	3.5	0.680	23.0	6.8	5.7	4.7	4.1	3.5	
	4.0	0.720	23.0	7.2	6.0	5.0	4.3	3.7	
Código de color - Uniformidad de distribución				CU > 92%	CU 88-92%	CU 85-88%	CU < 85%		



Fuente: Catálogo aspersores NAANDANJAIN, 2018, modificado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ **Unidades Cartográficas de suelos PV5 y RV1**

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 5022 SD de Boquilla verde de 3.2 mm de la marca NAANDANJAIN, para ser empleado en el diseño de las unidades **PV5 (Cal_Vert_2)** y **RV1 (Cal_Vert_4)**. 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 4.3-31**), podrá ser empleado sin que tenga que realizarse variaciones tanto en el diseño como en la operación del sistema.

Tabla 4.3-31 Característica del Aspersor plástico de impacto 5022 SD de boquilla verde de 3.2 mm, Marca NAANDANJAIN

5022SD Tabla de Rendimiento - Boquilla única, Largo SD (negro)									
Tasas de precipitación (mm/h) y uniformidad (CU) para diversos espaciamientos									
Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (m ³ /h)	D (m)	Espaciamiento (m)					
				10x10	10x12	12x12	12x14	14x14	
3.2 Verde	2.5	0.640	21.2	6.4	5.3	4.4	3.8	3.3	
	3.0	0.700	22.2	7.0	5.8	4.9	4.2	3.6	
	3.5	0.760	23.0	7.6	6.3	5.3	4.5	3.9	
	4.0	0.810	23.0	8.1	6.8	5.6	4.8	4.1	
Código de color - Uniformidad de distribución				CU > 92%	CU 88-92%	CU 85-88%	CU < 85%		



Fuente: Catálogo aspersores NAANDANJAIN, 2018, modificado por (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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

El dimensionamiento de las tuberías y sus respectivas pérdidas se calcularon a partir de la ecuación de Hazen-William, tomando la siguiente ecuación (**4_Uso aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_5 Diseños sistemas de riego_Diseño Hidráulico**):

$$F = \frac{10,64 \times Q^{1.852}}{C^{1.852} \times D^{4.871}}$$

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:

$$F * L \leq 20\% Pa / \lambda$$

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 4.3-32** 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

Tabla 4.3-32 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 (Pulgadas)	LONGITUD	ANCHO	ÁREA
	[Pulgadas]	[Pulgadas]	[m]	[m]	[ha]
PV2 (Cal_Vert_1)	2	2	181	111	2
PV5 (Cal_Vert_2)	2	2	152,2	132,2	2
PV6 (Cal_Vert_3)	2	2	181	111	2
RV1 (Cal_Vert_4)	2	2	151,2	131,2	2

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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 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 2” de diámetro en los dos casos con RDE 21 y de PVC.

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

La **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 4.3-33 Parámetros de los sistemas de riego tipo UCS PV2, PV5, PV6 y RV1

UBICACIÓN	UNIDADES DE SUELOS CARACTERIZADAS DENTRO DEL AD LLANOS 141			
	PV2	PV5	PV6	RV1
Unidad de suelo	PV2	PV5	PV6	RV1
Muestreo	Cal_Vert_1	Cal_Vert_2	Cal_Vert_3	Cal_Vert_4
Profundidad radicular [cm]	30	30	30	30
Criterio de riego [%]	40	40	40	40
Lámina neta de riego [mm]	18,82	18,20	21,2	25,72
Lámina bruta de riego [mm]	30,53	24,42	30,53	36,63
Modelo aspersor	5022 SD de Boquilla roja (3,0 mm) y verde (3,2 mm))			
Caudal aspersor [m ³ /hr]	0,57	0,7	0,57	0,64
Presión de operación [bar]	2,5	3	2,5	2,5
Intensidad pluviométrica emisor [mm/h]	5,7	7	5,7	6,4
Diámetro de Humedecimiento [m]	21	22,2	21	21,2
Espaciamiento entre aspersores [m]	10	10	10	10
Espaciamiento entre líneas [m]	10	10	10	10
Número de aspersores por línea	17	14	17	14
Número total de líneas de riego en el área	10	12	10	12
Número de líneas por día	2	3	2	2
Número de líneas regadas simultáneamente	1	1	1	1
Frecuencia de riego [días]	5	4	5	6
Duración de jornada de riego [h]	10,8	10,5	10,8	11,4
Duración de operación por la línea de riego [h]	5,4	3,5	5,4	5,7
Caudal para disponer durante la jornada de riego [lps]	2,7	2,72	2,7	2,5
Volumen diario de agua a disponer [m3]	103,81	102,59	103,81	102,59
Área de aspersión rectangular [ha]	2	2	2	2

**Debido a que el presente es un diseño de los sistemas de riego tipo, puede que las propiedades físicas de las unidades cartográficas varíen al momento de definir los lugares definitivos para la implementación de las ZODAR y que por esta variación también varíe el área necesaria para poder verter el caudal total de hasta 2,7 lps, por ese motivo se solicita el permiso para el área máxima obtenida para las UCS, la cual es 2 ha.*

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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.

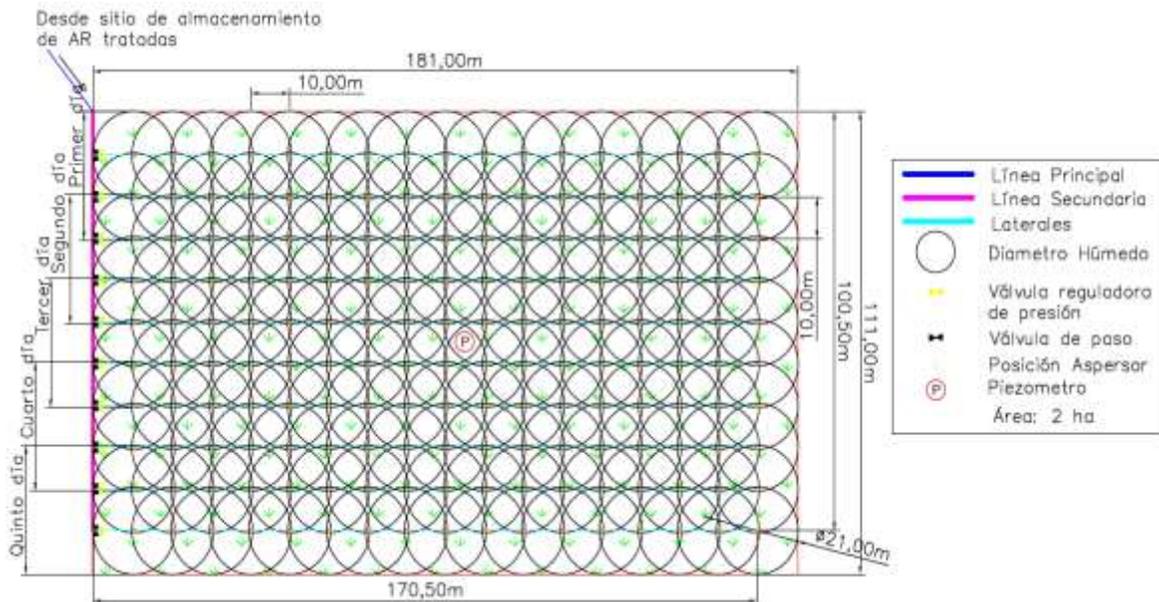
➤ **Distribución espacial y operación de los laterales de riego dentro de cada unidad cartográfica de suelos de interés y apta para vertimientos**

✓ **Unidades PV2 y PV6**

El sistema estará compuesto por 170 aspersores que configuran 10 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 10 m. Diariamente dos (2) laterales de riego deben ser puesta en funcionamiento, de forma tal que cada lateral se riegue durante 5,4 horas. Cuando la primera lateral haya terminado su tiempo de riego, será apagada y la segunda lateral del día se encenderá hasta que se rieguen las dos (2) laterales en 10,8 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la

operación, con las siguientes 2 laterales, esta disposición se realizara 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 sexto día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 5 días. Tal operación efectuará una descarga de 2,7 l/s. En la **Figura 4.3-12**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

Figura 4.3-12 Sistema de riego tipo para las unidades cartográficas de suelo PV2 y PV6, la cual es de interés y apta para riego

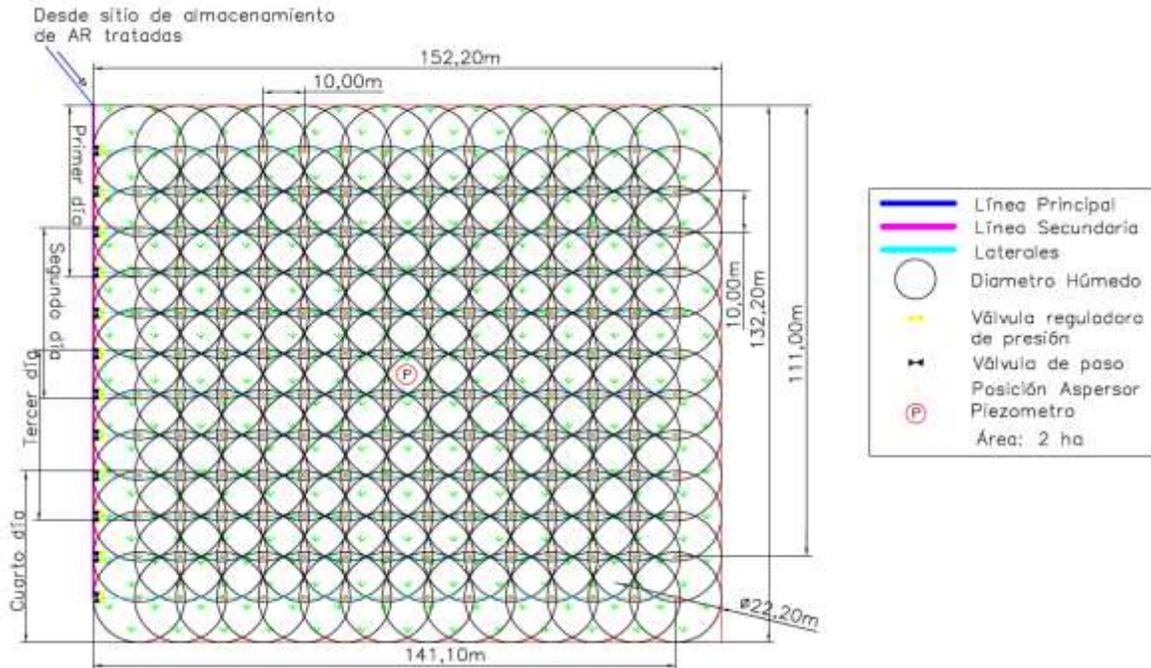


Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ Unidad PV5

El sistema estará compuesto por 168 aspersores que configuran 12 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 10 m. Diariamente tres (3) laterales de riego deben ser puesta en funcionamiento, de forma tal que cada lateral se riegue durante 3,5 horas. Cuando la primera lateral haya terminado su tiempo de riego, será apagada y la segunda lateral del día se encenderá y así sucesivamente hasta que se rieguen las tres (3) laterales en 10,5 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 3 laterales, esta disposición se realizara 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 quinto día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 4 días. Tal operación efectuará una descarga de 2,72 l/s. En la **Figura 4.3-13**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

Figura 4.3-13 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo PV5, la cual es de interés y apta para riego

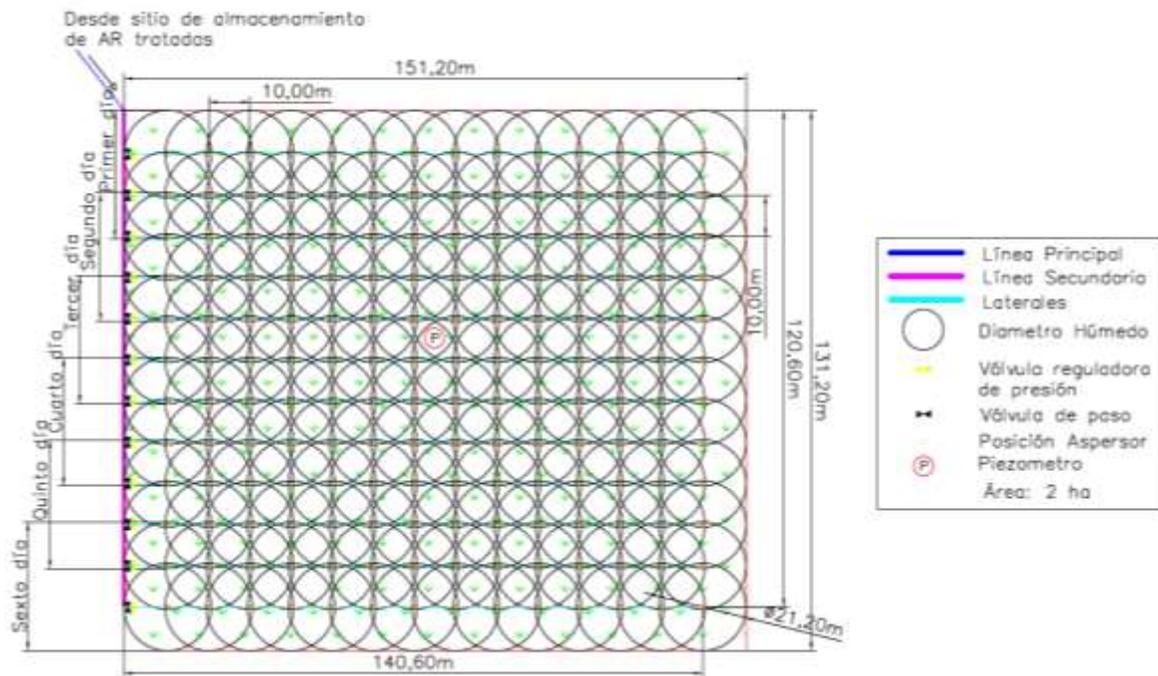


Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ Unidad RV1

El sistema estará compuesto por 168 aspersores que configuran 12 laterales paralelas o posiciones de riego separadas entre sí 10 m. Diariamente dos (2) laterales de riego deben ser puesta en funcionamiento, de forma tal que cada lateral se riegue durante 5,7 horas. Cuando la primera lateral haya terminado su tiempo de riego, será apagada y la segunda lateral del día se encenderá y así sucesivamente hasta que se rieguen las dos (2) laterales en 11,4 horas de vertimiento, al segundo día se repetirá la operación, con las siguientes 2 laterales, esta disposición se realizara 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 séptimo día secuencial cumpliéndose la frecuencia de riego de 6 días. Tal operación efectuará una descarga de 2,5 l/s. En la **Figura 4.3-14**, puede apreciarse la distribución de las diferentes posiciones de los aspersores dentro del área a regar, con las respectivas tuberías de conducción.

Figura 4.3-14 Sistema de riego tipo para la unidad cartográfica de suelo RV1, la cual es de interés y apta para riego



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

➤ 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 de la piscina o tanque para garantizar la succión del equipo de bombeo. La profundidad óptima de bombeo entre la válvula de pie, el fondo de la piscina 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 de la piscina 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 hasta que la tabla de agua disminuya.

4.3.6.8.4.3 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 (provenientes del AD LL141), se modeló el flujo de agua y contaminantes para las cuatro (4) unidades de suelo sobre las cuales se solicitará permiso de vertimiento en suelo:

- Consociación PV2 Humic Dystrudepts familia franco-gruesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica
- Consociación PV5 Humic Dystrudepts familia Franco Gruesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica
- Consociación PV6 Fluventic Humic Dystrudepts familia Franco Gruesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica
- Consociación RV1 Oxic Dystrudepts, fina, semiactiva, isohipertérmica.

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.

- **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.
- **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.
- **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.
- **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.
- **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.
- **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.

➤ 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 HYDRUS1D 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] (positiva 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⁻), sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻) y Grasas y aceites que se consideran para efectos de esta modelación como elementos conservativos, es decir 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. 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 y que están presentes en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_7 Resultados de laboratorio**. También se tuvo en cuenta el coeficiente de difusión molecular en agua que para el Cloruro es de 44,4 mm²/d (R. Kerry, 1996) y para el sulfato es 92,0 mm²/d (Samson, Marchand, & Snyder, 2003).

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 AD LL141, se tomó como línea base para las condiciones edáficas modeladas, las características levantadas en campo para las cuatro (4) 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

UCS	Perfil	Horizonte	Textura	Densidad aparente	0 Kpa	33 Kpa	1500 Kpa
		(cm)		(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
PV2	CAL_VERT_1	0-28	F-Ar	1,08	0,491	0,31	0,168
		28-55	F-Ar	1,41	0,447	0,319	0,172
		55-100	Ar	1,17	0,448	0,32	0,173
PV5	CAL_VERT_2	0-2	F-A	1,37	0,34	0,213	0,115
		2-50	F-Ar-A	1,39	0,355	0,238	0,128
		50-100	F-Ar-A	1,36	0,388	0,276	0,149
PV6	CAL_VERT_3	0-10	F-A	1,49	0,444	0,322	0,179
		10-45	F	1,47	0,34	0,243	0,135
		45-100	F	1,62	0,394	0,282	0,168
RV1	CAL_VERT_4	0-5	F-Ar	1,29	0,463	0,332	0,189
		5-30	F-Ar-A	1,51	0,46	0,329	0,183
		30-60	F-Ar	1,62	0,463	0,336	0,217

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Los resultados obtenidos del proceso de optimización no lineal, entre las curvas teóricas y reales, determinan 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

UCS	Perfil	Horizonte	ThetaR	ThetaS	Alpha	n	Error^2	Kd
		(cm)						(cm ³ /mg)
PV2	CAL_VERT_1	0-28	0	0,490998556	0,004121838	1,986360965	7,17E-13	0,0084
		28-55	0	0,446999415	0,003163841	2,116837404	4,62E-13	0,006
		55-100	0	0,448000015	0,003224658	2,040303047	1,53E-13	0,00792
PV5	CAL_VERT_2	0-2	0,167744398	0,340000311	0,452342786	1,27211822	3,76E-13	0,18336
		2-50	0,221709084	0,354999736	0,163032154	1,54011738	2,77E-14	0,22368
		50-100	0,057664187	0,387999887	0,029511673	1,184667791	9,26E-14	0,16488
PV6	CAL_VERT_3	0-10	0,01415762	0,443999978	0,007669291	1,317390553	1,01E-13	0,10944
		10-45	0,020027605	0,339999077	0,017343166	1,205727468	3,59E-13	0,12192
		45-100	0,027464205	0,39399875	0,098811273	1,106928432	1,23E-12	0,19536
RV1	CAL_VERT_4	0-5	0,018823962	0,462999154	0,01225069	1,241398015	2,82E-13	0,14496
		5-30	0,026761823	0,460000043	0,00811094	1,330299442	1,00E-14	0,11544
		30-60	0	0,462999524	0,010215953	1,247156462	8,96E-13	0,13344

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

➤ 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 diaria incluidos en HYDRUS 1D son promedios diarios multianuales de los últimos 30 años. 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 estaciones 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 **Capítulo 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 cloruro, sulfato, nitratos y grasas y aceites, para las cuatro (4) unidades cartográficas de suelo aptas (PV2, PV5, PV6 y RV1) bajo tres escenarios diferentes (Los ejecutables se presentan en el **4_Uso_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3_6 Memorias de modelación**):

- 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 óptima del sistema de tratamiento de aguas residuales.

En este escenario el agua residual 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 y sulfato en la lámina de riego serían de 150 mg/L en ambas ocasiones; por su parte la concentración de nitrato será de 1,5 mg/L y grasas y aceites de 5 mg/L las cuales corresponden a las concentraciones máximas presentadas en la **Tabla 4.3-7**, a excepción de los nitratos ya que estos no se reportan en las aguas residuales tratadas, por lo cual se toma el valor reportado en la **Tabla 4.3-6** que corresponde a la concentración de las ARD sin tratamiento.

Estos valores de concentración se tomaron pues los valores de las concentraciones de cloruro, sulfato y nitrato del agua residual sin tratar ya sean domésticas e industriales cumplen con la normatividad presentada en la **Tabla 4.3-28**. En cuanto a las grasas, teniendo en cuenta que esta tabla solicita una remoción del 80 %, en valor está acorde con la concentración propuesta para el escenario 3.

- 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 la **Tabla 4.3-28**, se adoptaron los siguientes valores para la lámina de riego: cloruro 250 mg/L (límite establecido en el Decreto 1594 citado por el Decreto 1076 del 2015), sulfatos 400 mg/L (límite establecido en el Decreto 1594 citado por el Decreto 1076 del 2015), nitratos 10 mg/L (límite establecido en el Decreto 1594 citado por el Decreto 1076 del 2015) y grasas 104 mg/L (límite tomado de la **Tabla 4.3-28** el cual corresponde al valor máximo reportado).

Teniendo en cuenta un escenario crítico, cabe resaltar que, según las tablas de caracterización de las aguas residuales, las concentraciones máximas para los cuatro solutos se encuentran por debajo de estos límites modelados, sin embargo, como en el escenario 2 se adoptaron las concentraciones máximas de la normatividad, y la caracterización es teórica, se adoptaran estos límites como críticos para la modelación.

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 4.3-28** y **Tabla 4.3-29**) 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:

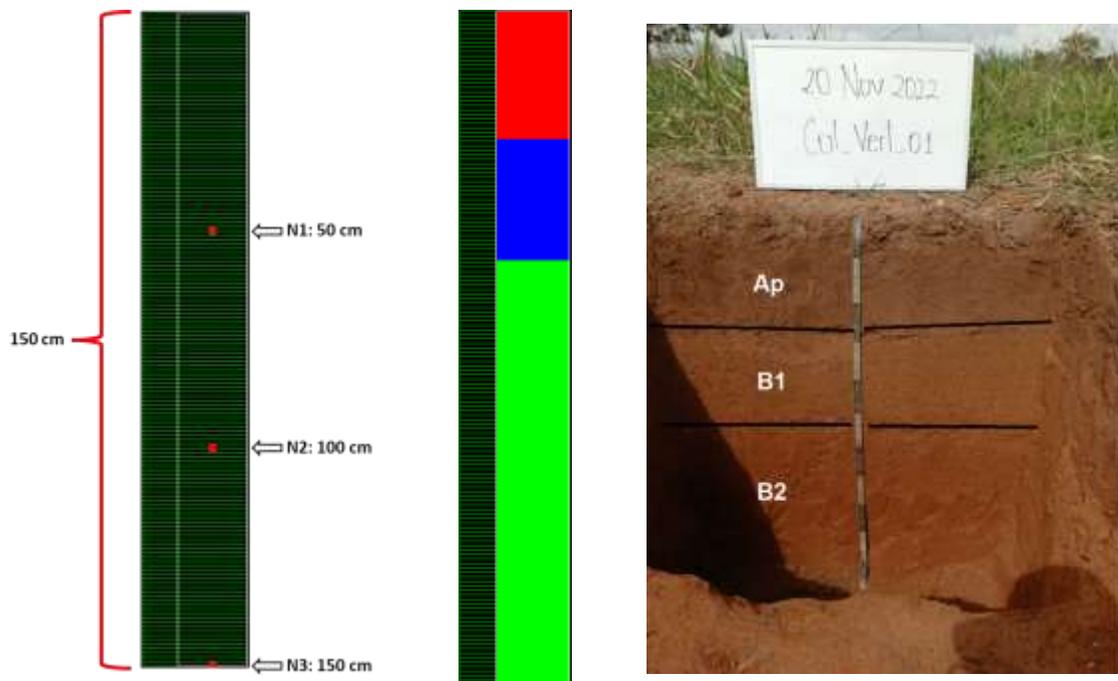
- i. Complejo PV2 Fluvaquentic Dystrudepts, franca fina, activa, isohipertérmica - Fluvaquentic Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica - Aerico Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica: lámina de riego de 18,82 mm y frecuencia de aplicación cada 5 días.
- ii. Consociación PV5 Typic Hapludox, fina, activa, isohipertérmica: lámina de riego de 18,20 mm y frecuencia de aplicación cada 4 días.
- iii. Complejo PV6 Typic Fluventic Dystrudepts, fina, subactiva, isohipertérmica - Oxico Dystrudepts: lámina de riego de 21,20 mm y frecuencia de aplicación cada 5 días.
- iv. Consociación RV1 Oxico Dystrudepts, fina, semiactiva, isohipertérmica: lámina de riego de 25,72 mm y frecuencia de aplicación cada 6 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.

- ✓ **Complejo PV2 Fluvaquentic Dystrudepts, franca fina, activa, isohipertérmica - Fluvaquentic Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica - Aeric Endoaquepts, franca fina, isohipertérmica (Cal_Vert_1)**

El perfil modelado para la unidad de suelo PV2 es de 1,50 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_1, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 50 cm (N1), 100 cm (N2) y 150 cm (N3) **Figura 4.3-15** el primero de ellos a 50 cm (N1), el N2 a 100 cm y el N3 a 150 cm, que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el numeral 4.3.6.5.

Figura 4.3-15 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata Cal_Vert_1, Unidad de suelo PV2.



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- **Escenario 1: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-16** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal Cal_Vert_1 (unidad PV2), 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 4.3-16**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,54 cm/d en el día 148. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 1,40 y 1,34 cm/d, respectivamente.

Figura 4.3-16 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales



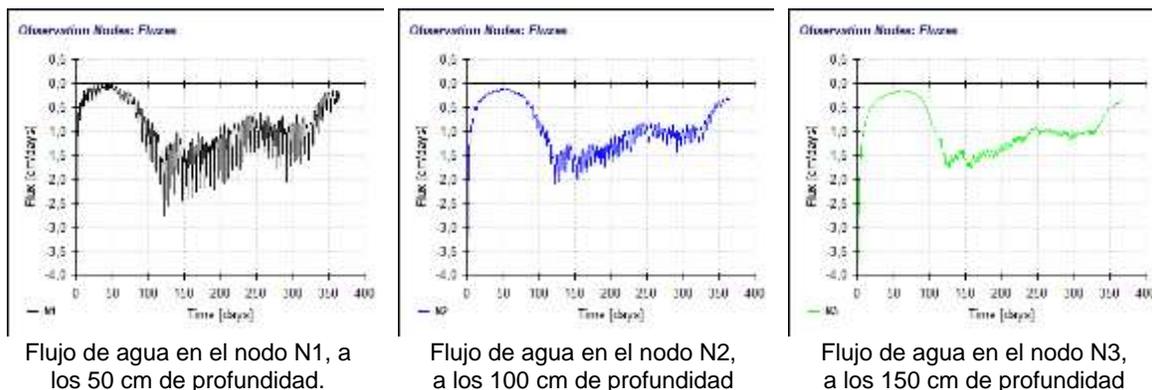
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

○ **Escenario 2-3: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-17** 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 y no domésticas. La lámina de riego para la unidad de suelo PV2 será de 1,882 cm y se aplicará cada 5 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 50 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 2,78 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 2,01 y 1,79 cm/d.

Figura 4.3-17 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

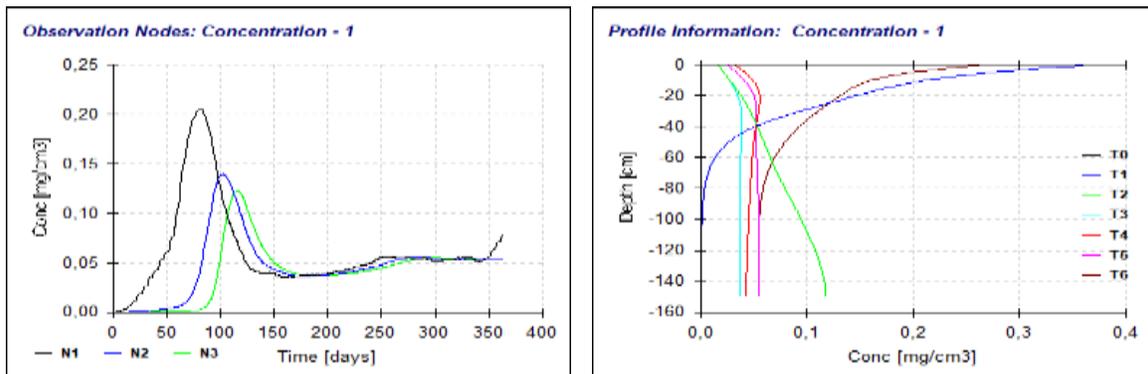
- **Escenario 2: Flujo de cloruro (150 mg/L), sulfato (150 mg/L), nitrato (1,5 mg/L) y grasas (5 mg/L)**

En la **Figura 4.3-18** 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 150 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 150 cm, la concentración mayor ocurre en el T2 con un valor de 0,12 mg/cm³, mientras que en el resto del año, los valores fluctúan entre 0,3 a 0,6 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 81 días para el N1 con un valor de 0,21 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 0,05 mg/cm³, con un ligero aumento en el N1 al finalizar el año, con un valor final de 0.08 mg/cm³.

Figura 4.3-18 Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm)

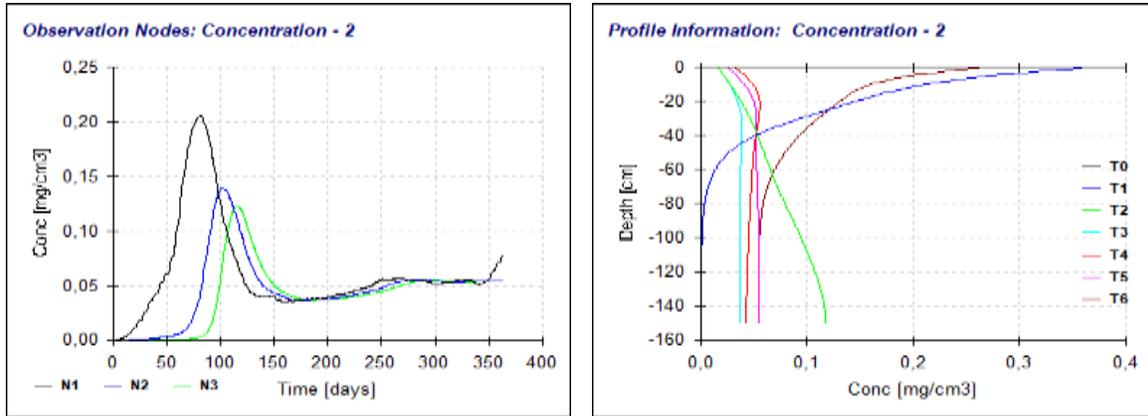
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-19** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 150 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 0,26 mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-19**, las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 81 días del inicio del vertimiento con valor de 0,056 mg/cm³, para N2 0,14 mg/cm³ a los 102 días y en N3 0,12 mg/cm³ a los 115 días de modelación.

Figura 4.3-19 Concentraciones de sulfato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



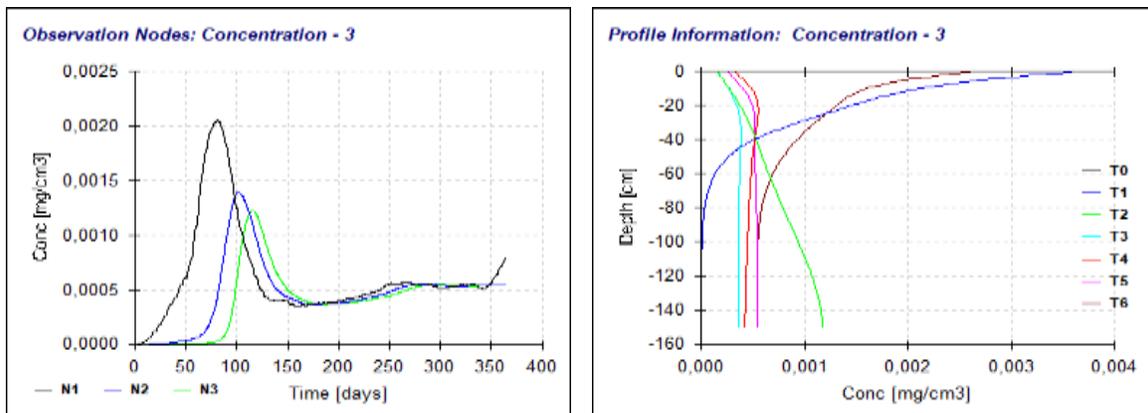
Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-20** se presenta la concentración del nitrato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de nitrato de 1,5 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 nitrato se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de $3,63e^{-3}$ mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-20**, en los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 81 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $2,06e^{-3}$ mg/cm³, a los 102 días para N2 con una concentración de $1,39e^{-3}$ mg/cm³ y a los 115 días de modelación en N3 con un valor de $1,22e^{-3}$ mg/cm³.

Figura 4.3-20 Concentraciones de nitrato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas

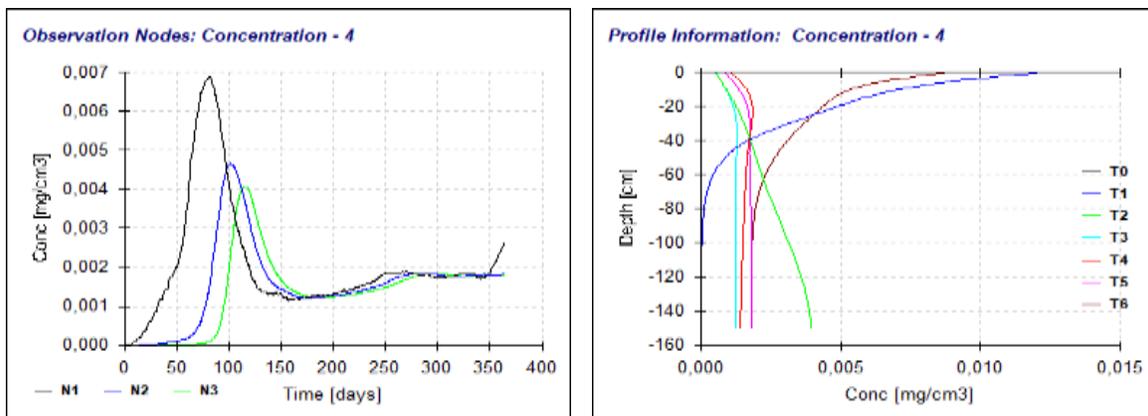


Concentración de nitrato en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

La **Figura 4.3-21** presenta la concentración de grasas en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 150 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de grasas y aceites de 5 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones de grasas se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T1) en los primeros 80 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 81, 102 y 115 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $6,89 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^3$ a los 50 cm (N1), $4,66 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^3$ a los 100 cm (N2) y $4,09 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^3$ a los 150 cm (N3).

Figura 4.3-21 Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

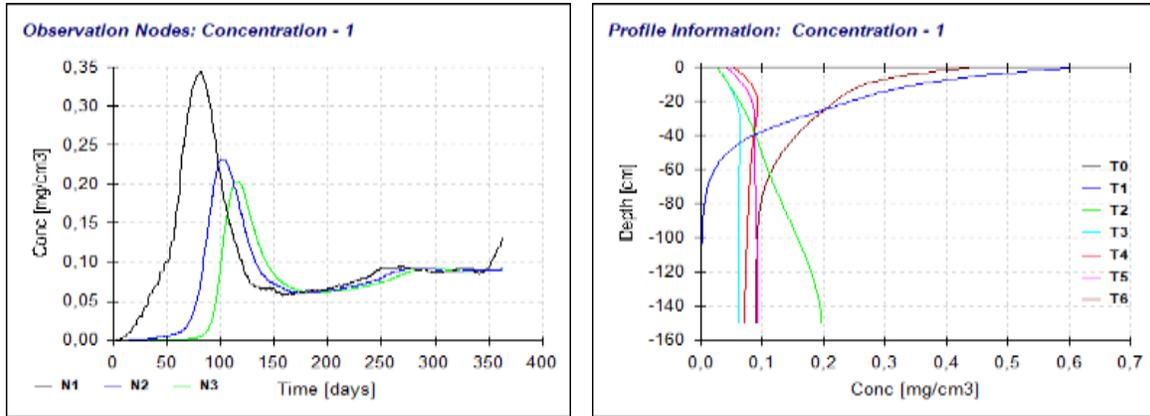
- **Escenario 3: Flujo de cloruro (250 mg/L), sulfato (400 mg/L), nitrato (10 mg/L) y grasas (104,6 mg/L)**

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 250 mg/L, de sulfato de 400 mg/L, nitrato de 10 mg/L y grasas de 104,6 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-22**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de $0,45 \text{ mg/cm}^3$ en los primeros 10 cm de profundidad. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 60 días de la modelación del orden de $0,19 \text{ mg/cm}^3$.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 81 días para el N1 con un valor de $0,34 \text{ mg/cm}^3$, el N2 reporta un valor de $0,23 \text{ mg/cm}^3$ y el N3 $0,20 \text{ mg/cm}^3$, en los días 102 y 115, respectivamente.

Figura 4.3-22 Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

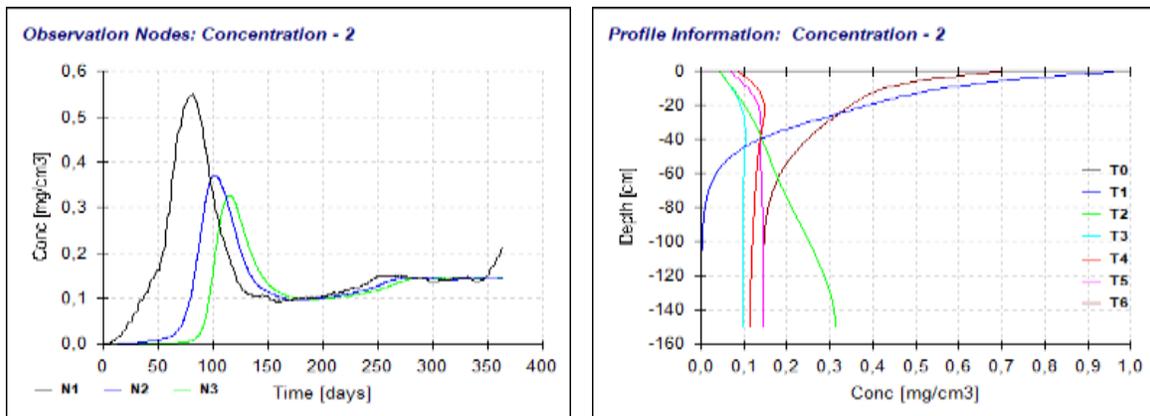


Concentración de cloruro en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-23** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 400 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 0,97 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 0,54 mg/cm³, para N2 de 0,37 mg/cm³ y en N3 de 0,33 mg/cm³.

Figura 4.3-23 Concentraciones de sulfato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

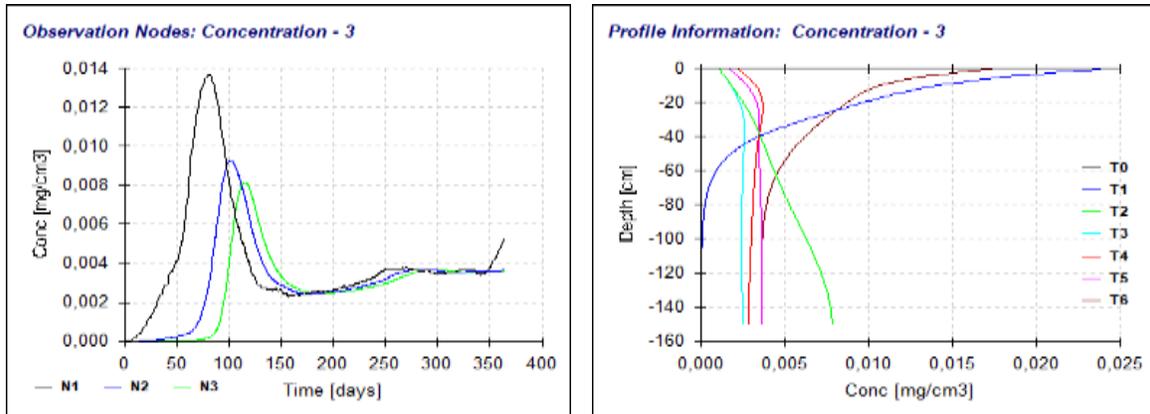


Concentración de sulfato en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Se presenta en la **Figura 4.3-24** la concentración del nitrato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 10 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de nitrato presenten, un valor de 0,0017 mg/cm³, en los primeros 10 cm de profundidad. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 0,014 mg/cm³ para N1, un valor de 9,27e⁻³ mg/cm³ en N2 y 8,15 e⁻³ mg/cm³ para N3.

Figura 4.3-24 Concentraciones de nitrato en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas



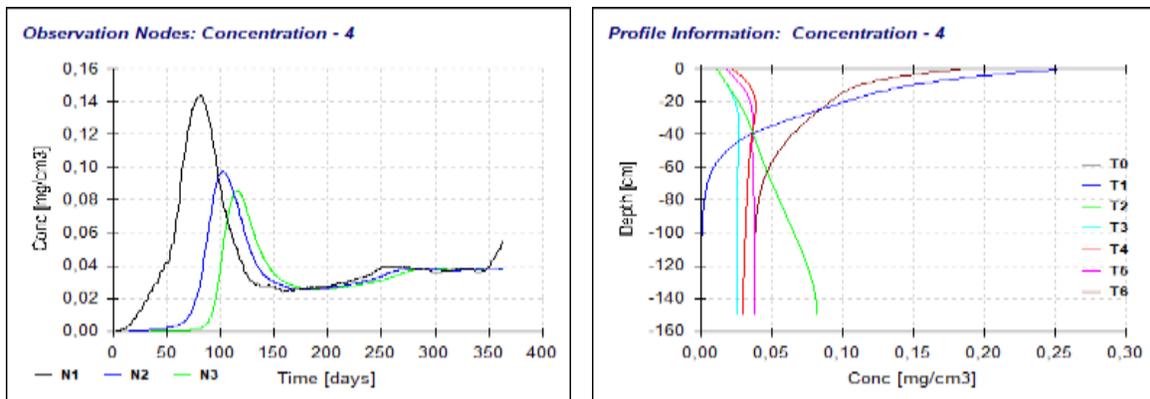
Concentración de nitrato en los puntos de observación N1 (15 cm), N2 (45 cm) y N3 (150 cm).
Concentración de nitrato en la columna de suelo (150 cm)

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-25** se enseñan la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de grasas y aceites de 104,6 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones de las grasas se registrarían en los primeros 10 cm del perfil, y podrían alcanzar un valor máximo de 0,25 mg/cm³, lo cual ocurre en el T6. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,382 mg/cm³, para N2 de 0,0278 mg/cm³ y en N3 de 0,0157 mg/cm³.

Figura 4.3-25 Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas



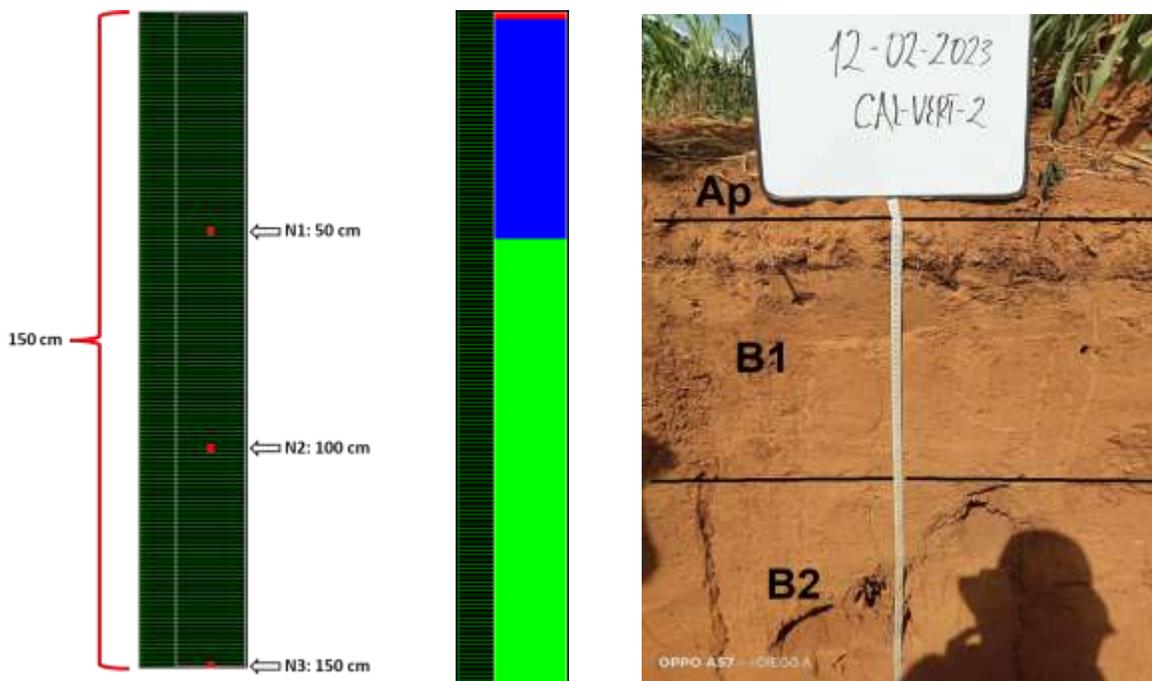
Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (10 cm), N2 (50 cm) y N3 (150 cm).
Concentración de grasas y aceites en la columna de suelo (150 cm)

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- ✓ **Consociación PV5 Humic Dystrudepts familia Franco Guesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica (Cal_Vert_2)**

El perfil modelado para la unidad de suelo PV5 es de 1,50 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_2, para lo cual se establecen tres puntos de observación (**Figura 4.3-26**), el primero de ellos a 50 cm (N1), el N2 a 100 cm y el N3 a 150 cm, que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el numeral 4.3.6.5.

Figura 4.3-26 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_2, Unidad de suelo PV5.

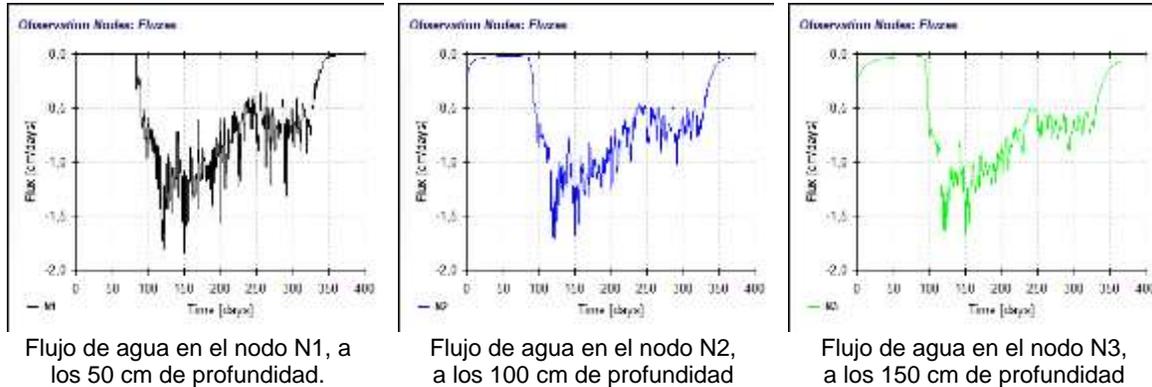


Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- **Escenario 1: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-27** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal Cal_Vert_2 (unidad PV5), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta, se puede observar que la velocidad del flujo de agua disminuye a medida que se profundiza en el perfil de suelo. De esta manera, los primeros 50 cm del suelo responden más rápido a los procesos de precipitación, evapotranspiración e infiltración, respuesta similar en los 100 cm, mientras que, para los 150 cm, se evidencia una menor magnitud de la respuesta. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-27**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,95 cm/d en el día 148. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 1,78 y 1,65 cm/d, respectivamente.

Figura 4.3-27 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales



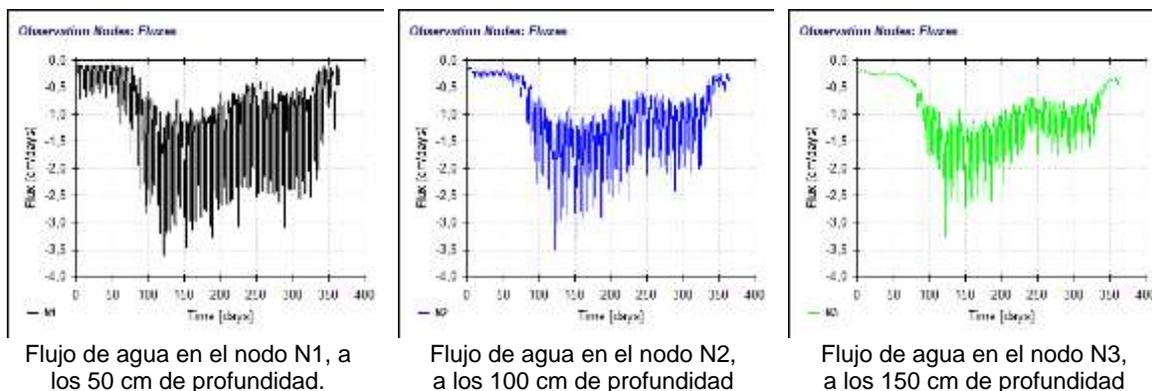
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

○ **Escenario 2-3: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-28** 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 y no domésticas. La lámina de riego para la unidad de suelo PV2 será de 1,820 cm y se aplicará cada 4 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 50 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 3,62 cm/d, valor superior al escenario 1 por 1,7 cm/d. Los nodos N2 y N3, también presentan un aumento similar al primero, al registrar flujos máximos diarios de 3,51 y 3,23 cm/d. sin embargo, la diferencia de los dos escenarios se evidencia en los meses de baja precipitación en donde el escenario 1 reporta valores muy cercanos a cero, mientras que con la aplicación del riego se evidencia el incremento del flujo de agua en aproximadamente 0,5 cm/d en el primer nodo (hasta 50 cm de profundidad).

Figura 4.3-28 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

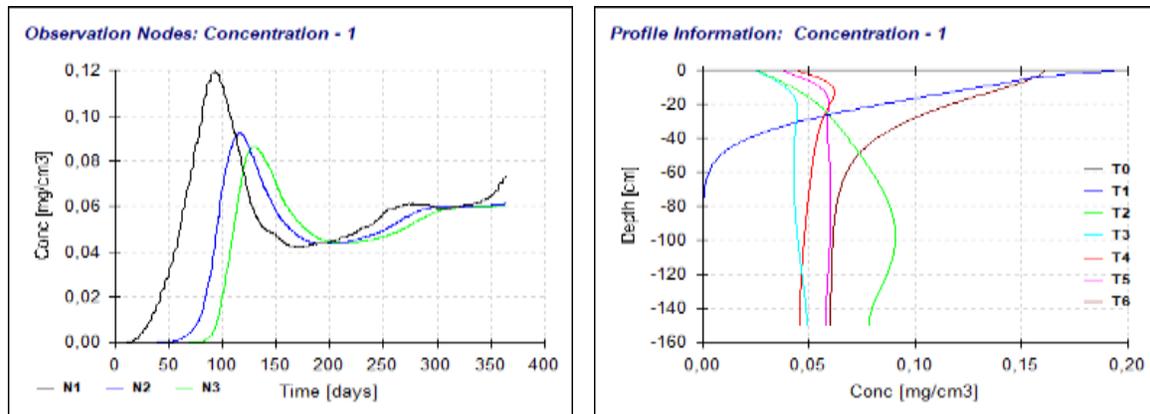
- **Escenario 2: Flujo de cloruro (150 mg/L), sulfato (150 mg/L), nitrato (1,5 mg/L) y grasas (5 mg/L)**

En la **Figura 4.3-29** 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 150 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) se esperaría que el cloruro disuelto en la lámina de riego no se distribuya en todo el perfil, sino que se concentre en los primeros 80 cm. Al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro se reportan para el N1, y la acumulación máxima de 0,197 mg/cm³ en la superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 30 días de la modelación del orden de 0,078 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 93 días para el N1 con un valor de 0,120 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos con valores de 0,092 y 0,086 mg/cm³. Al finalizar el año, tienden a estabilizarse cerca de los 0,06 mg/cm³ en los tres nodos, con un ligero aumento en el N1 que no supera al pico máximo de los 93 días.

Figura 4.3-29 Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).

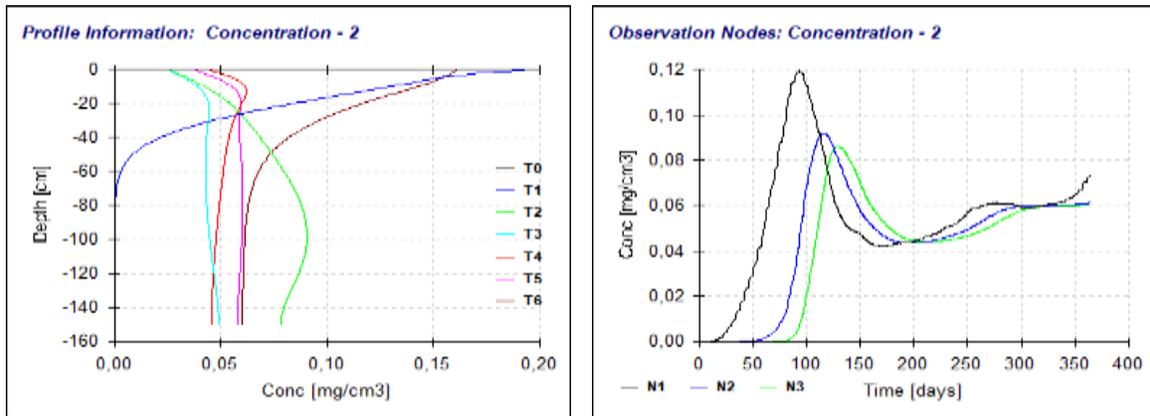
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-30** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 150 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 en el 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 superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,196 mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-30**, las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 93 días del inicio del vertimiento con valor de 0,120 mg/cm³, para N2 0,092 mg/cm³ a los 116 días y en N3 0,086 mg/cm³ a los 129 días de modelación.

Figura 4.3-30 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



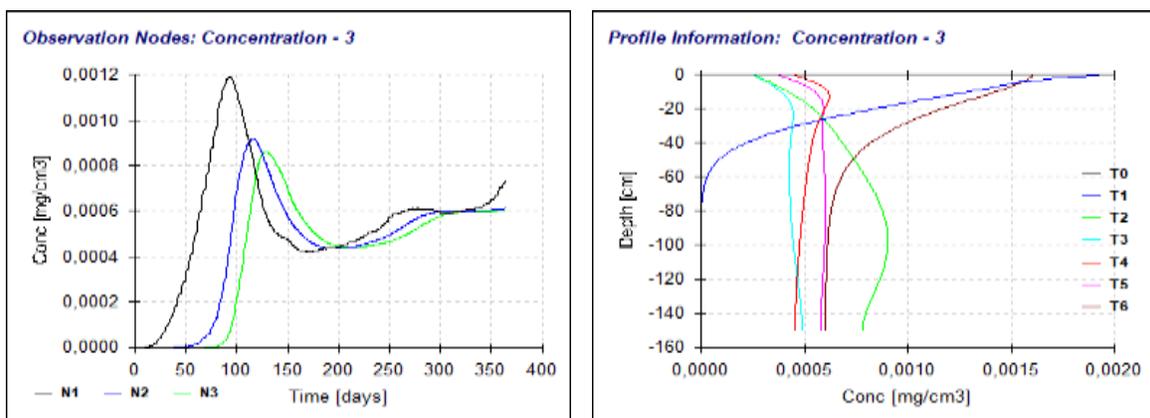
Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-31** se presenta la concentración de nitrato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de nitrato de 1,5 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 nitrato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 1,95e⁻³ mg/cm³.

Figura 4.3-31 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).

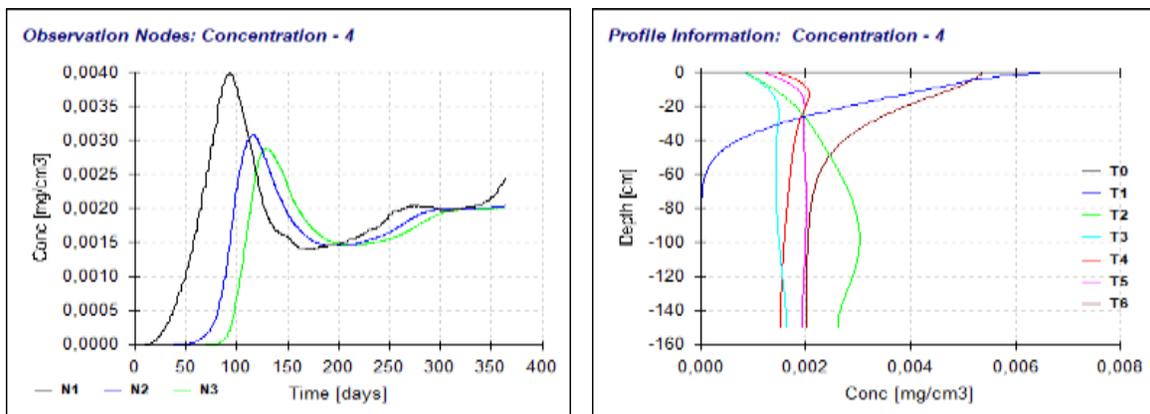
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Como se observa en la **Figura 4.3-31**, en los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 93 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,19e^{-3}$ mg/cm³, a los 116 días para N2 con una concentración de $9,18e^{-4}$ mg/cm³ y a los 129 días de modelación en N3 con un valor de $8,59e^{-4}$ mg/cm³.

La **Figura 4.3-32** presenta la concentración de grasas en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 150 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de grasas y aceites de 5 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones de grasas se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T1) en los primeros 60 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 93, 116 y 129 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $3,99e^{-3}$ mg/cm³ a los 50 cm (N1), $3,08e^{-3}$ mg/cm³ a los 10 cm (N2) y $2,88e^{-3}$ mg/cm³ a los 150 cm (N3).

Figura 4.3-32 Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
de Concentración de grasas y aceites en la columna de suelo (150 cm)
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

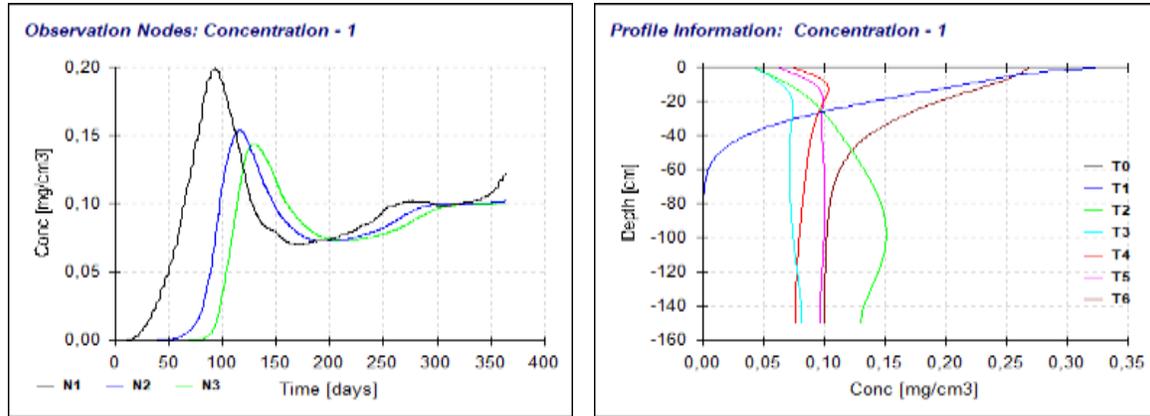
- **Escenario 3: Flujo de cloruros (250 mg/L), sulfatos (400 mg/L), nitratos (10 mg/L) y grasas (104,6 mg/L)**

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 250 mg/L, de sulfato de 400 mg/L, nitrato de 10 mg/L y grasas de 104,6 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-33**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de $0,328$ mg/cm³ en superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los días de la modelación del orden de $0,13$ mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 93 días para el N1 con un valor de $0,199$ mg/cm³, el N2 reporta un valor de $0,153$ mg/cm³ y el N3 $0,144$ mg/cm³, en los días 113 y 129, respectivamente.

Figura 4.3-33 Concentraciones de cloruro en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

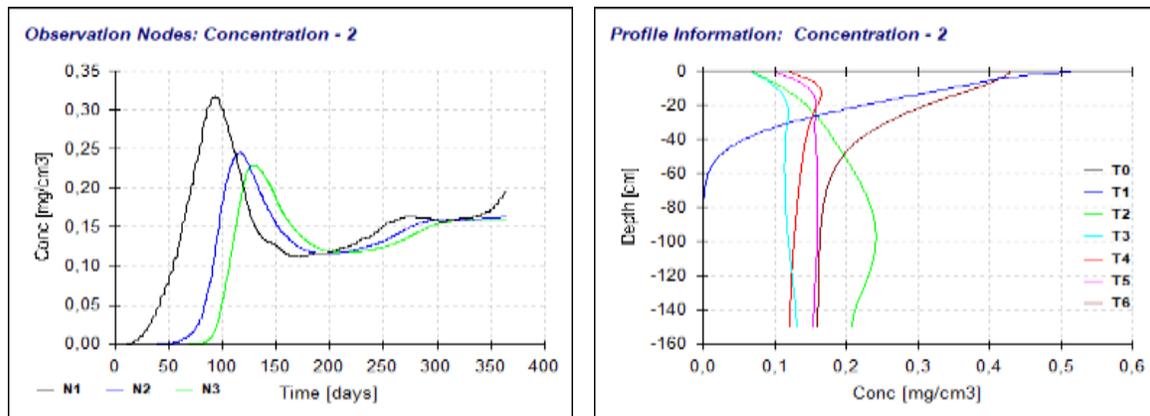


Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-34** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 400 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,523 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 0318 mg/cm³, para N2 de 0,245 mg/cm³ y en N3 de 0,229 mg/cm³.

Figura 4.3-34 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

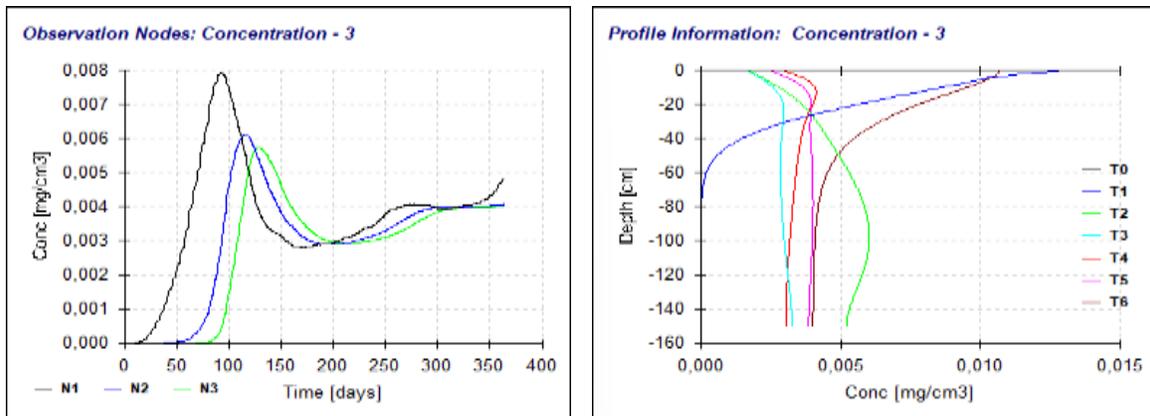


Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Se presenta en la **Figura 4.3-35** la concentración de nitratos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 10 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de nitrato presenten un valor de 0,011 mg/cm³ en superficie. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 7,94e⁻³ mg/cm³ para N1, un valor de 6,12e⁻³ mg/cm³ en N2 y 5,72e⁻³ mg/cm³ para N3.

Figura 4.3-35 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

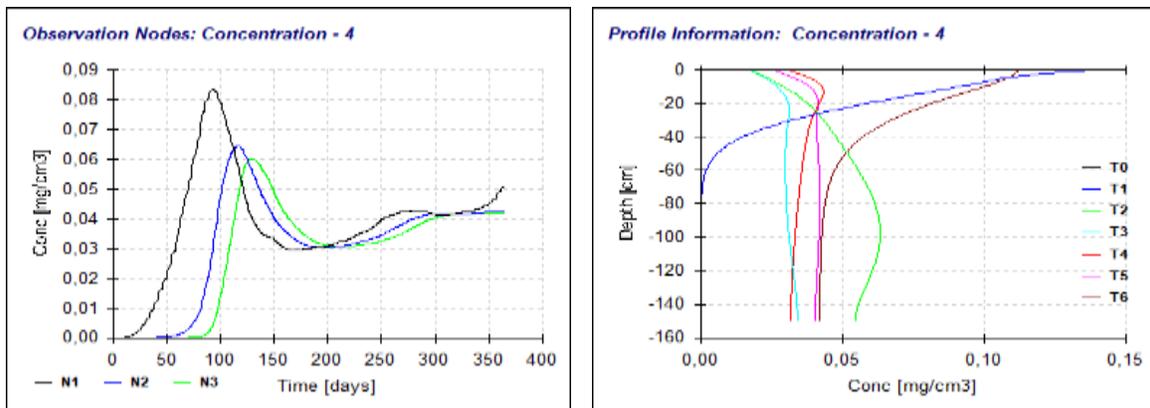


Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-36** se enseñan la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de grasas de 104,6 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones de las grasas se registrarían en la superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,084 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 0,140 mg/cm³, para N2 de 0,64 mg/cm³ y en N3 de 0,060 mg/cm³.

Figura 4.3-36 Concentraciones de grasas y aceites en el perfil modal de la unidad de suelo PV5. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

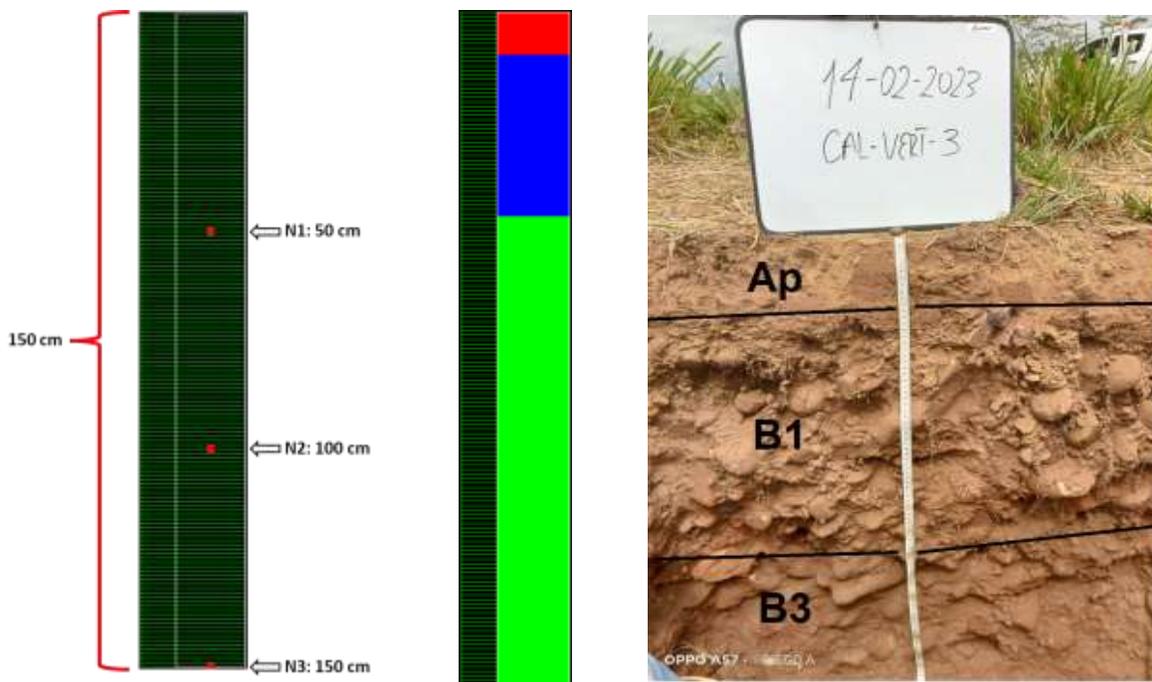


Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- ✓ **Consociación PV6 Fluventic Humic Dystrudepts familia Franco Guesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica (Cal_Vert_3)**

El perfil modelado para la unidad de suelo PV6 es de 1,50 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_3, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 50 cm (N1), 100 cm (N2) y 150 cm (N3) (**Figura 4.3-37**), el primero de ellos a 50 cm (N1), el N2 a 100 cm y el N3 a 150 cm, que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el numeral 4.3.6.5.

Figura 4.3-37 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_3, Unidad de suelo PV6.

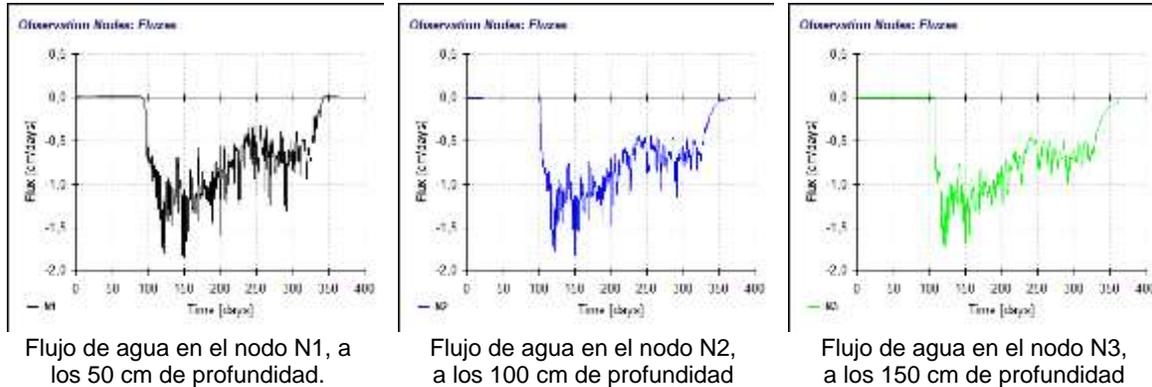


Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- **Escenario 1: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-38** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal Cal_Vert_3 (unidad PV6), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta, se puede observar que el flujo de agua disminuye a medida que se profundiza en el perfil de suelo. De esta manera, los primeros 50 cm del suelo responden más rápido a los procesos de precipitación, evapotranspiración e infiltración, respuesta similar en los 100 cm, mientras que, para los 150 cm, se evidencia una menor magnitud de la respuesta. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-38**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,96 cm/d en el día 148. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 1,95 y 1,91 cm/d, respectivamente.

Figura 4.3-38 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales



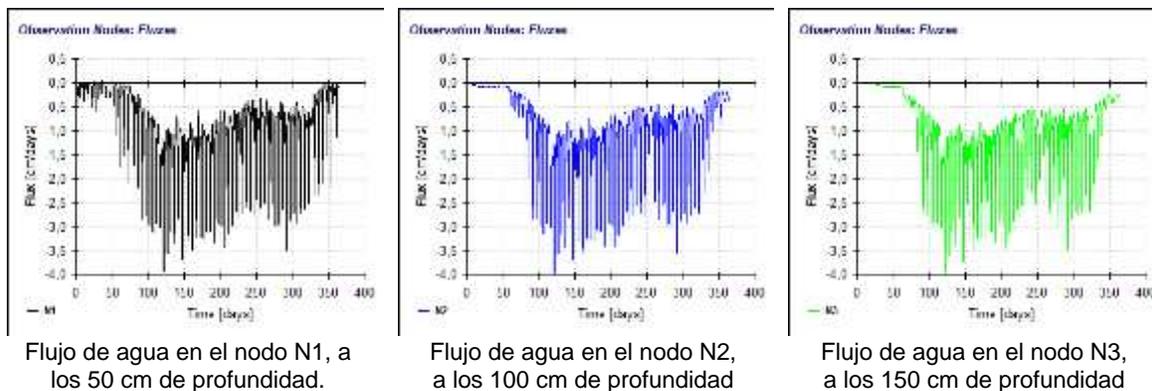
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

○ **Escenario 2-3: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-39** 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 y no domésticas. La lámina de riego para la unidad de suelo PV2 será de 2,120 cm y se aplicará cada 5 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 50 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 3,97 cm/d, valor superior por 2 cm/d con respecto al reportado en el escenario 1. Los nodos N2 y N3, también presentan un aumento similar al registrar flujos máximos diarios de 3,96 y 3,95 cm/d. sin embargo, la diferencia de los dos escenarios se evidencia en los meses de baja precipitación en donde el escenario 1 reporta valores muy cercanos a cero, mientras que con la aplicación del riego se evidencia el incremento del flujo de agua en aproximadamente 05 cm/d en el primer nodo (hasta 50 cm de profundidad).

Figura 4.3-39 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

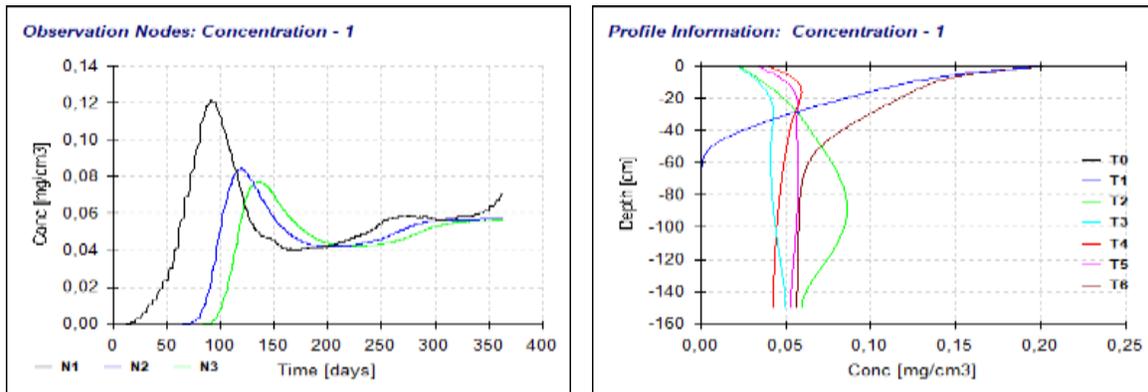
- **Escenario 2: Flujo de cloruro (150 mg/L), sulfato (150 mg/L), nitrato (1,5 mg/L) y grasas (5 mg/L)**

En la **Figura 4.3-40** 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 150 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) se esperaría que el cloruro disuelto en la lámina de riego no tenga ninguna acumulación anormal en ningún horizonte del perfil. Al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro se reportan para el N1, y la acumulación máxima de 0,202 mg/cm³ en la superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a partir de los 60 días de la modelación del orden de 0,059 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 91 días para el N1 con un valor de 0,127 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos. Al finalizar el año, las concentraciones se estabilizan en 0,6 mg/cm³.

Figura 4.3-40 Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



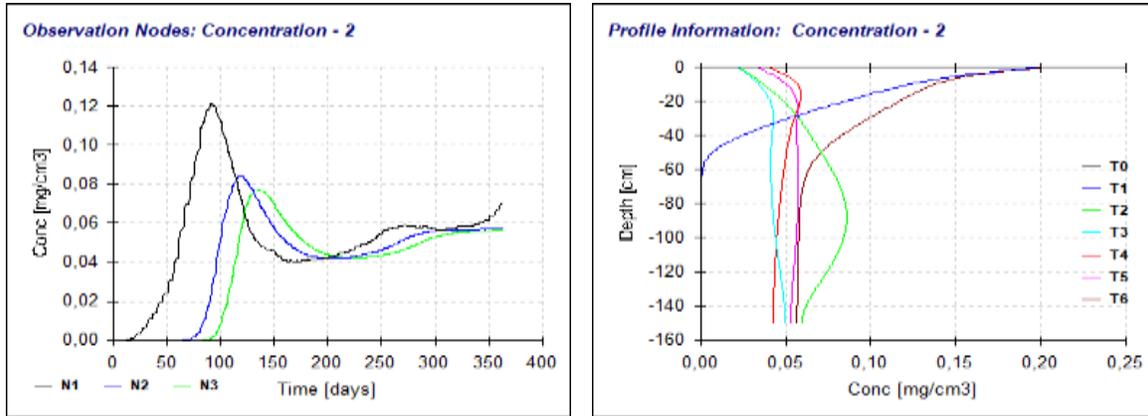
Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-41** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 150 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 3, 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 superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,20 mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-41**, las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 91 días del inicio del vertimiento con valor de 0,121 mg/cm³, para N2 0,084 mg/cm³ a los 119 días y en N3 0,077 mg/cm³ a los 135 días de modelación.

Figura 4.3-41 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



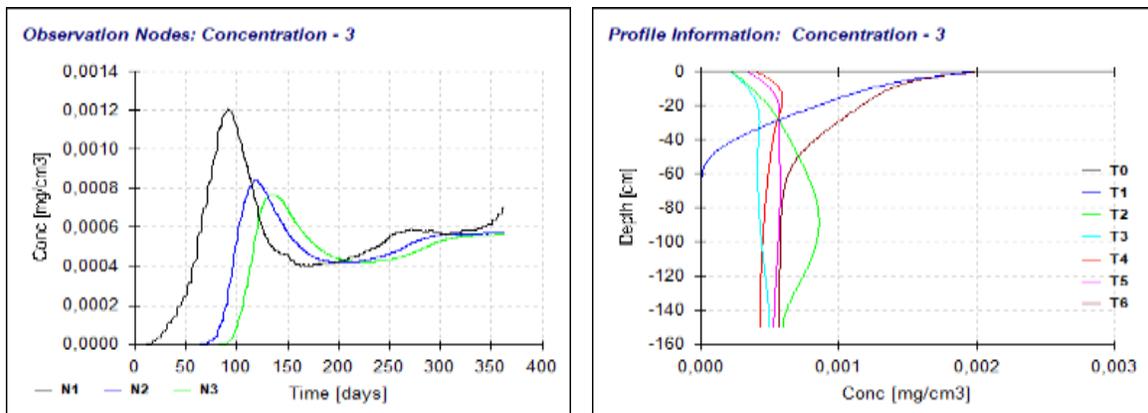
Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-42** se presenta la concentración del nitrato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 1,5 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 nitrato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de $1,98e^{-3}$ mg/cm³.

Como se observa en **Figura 4.3-42**, en los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 91 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,21e^{-3}$ mg/cm³, a los 119 días para N2 con una concentración de $8,39e^{-4}$ mg/cm³ y a los 135 días de modelación en N3 con un valor de $6,78e^{-4}$ mg/cm³.

Figura 4.3-42 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas

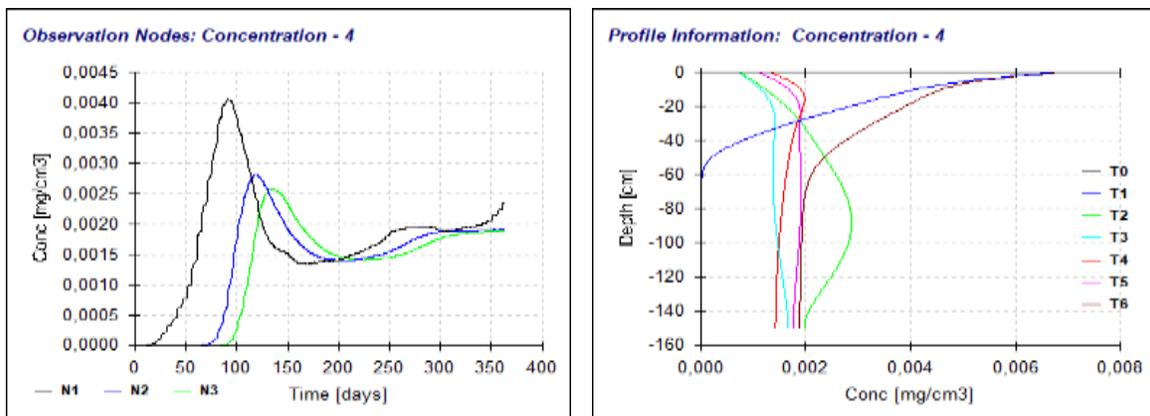


Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

La **Figura 4.3-43** presenta la concentración de grasas en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 150 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de grasas y aceites de 5 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones de grasas se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T1) en los primeros 60 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 90, 119 y 135 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $4,07e^{-3}$ mg/cm³ a los 50 cm (N1), $2,82e^{-3}$ mg/cm³ a los 100 cm (N2) y $2,57e^{-3}$ mg/cm³ a los 150 cm (N3).

Figura 4.3-43 Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

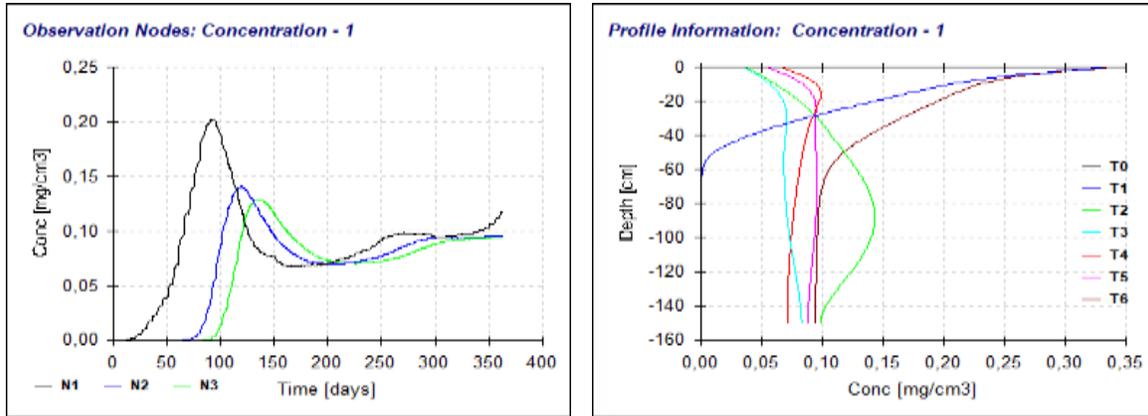
- **Escenario 3: Flujo de cloruros (250 mg/L), sulfatos (400 mg/L), nitratos (10 mg/L) y grasas (104,6 mg/L)**

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 cloruros de 250 mg/L, de sulfatos de 400 mg/L, nitratos de 10 mg/L y grasas de 104,6 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-44**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 0,34 mg/cm³ en superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 600 días de la modelación del orden de 0,099 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruros para los tres nodos se registran a los 91 días para el N1 con un valor de 0,203 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 0,141 mg/cm³ y el N3 0,123 mg/cm³, en los días 119 y 135, respectivamente.

Figura 4.3-44 Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

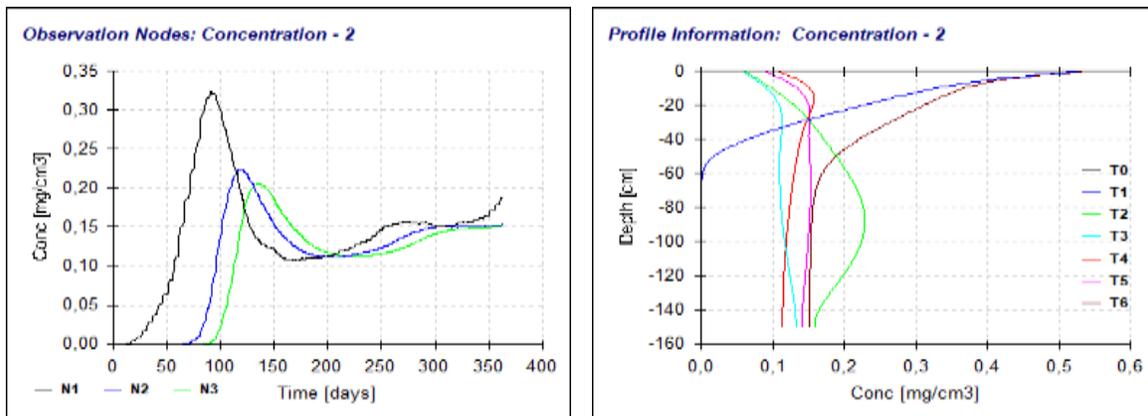


Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-45** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 400 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,54 mg/cm³, lo cual ocurre en el T6. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,323 mg/cm³, para N2 de 0,224 mg/cm³ y en N3 de 0,205 mg/cm³.

Figura 4.3-45 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

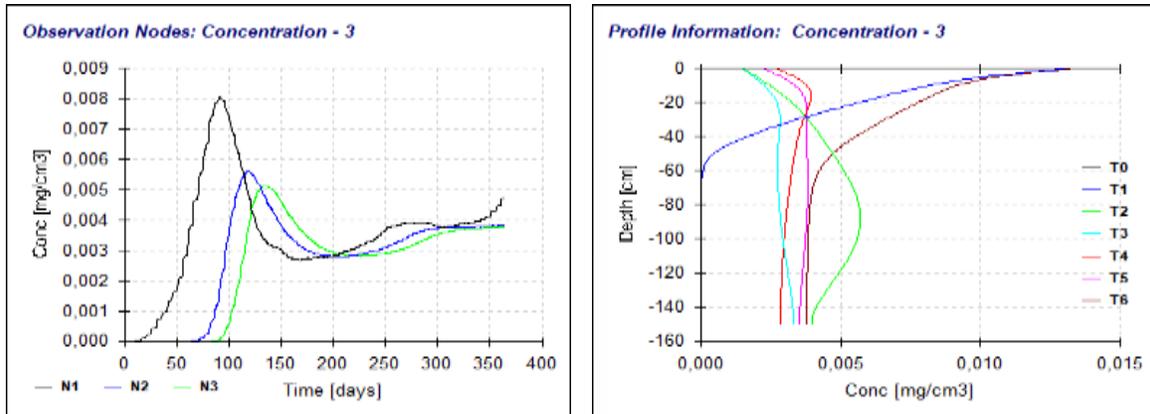


Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Se presenta en la **Figura 4.3-46** la concentración de nitratos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 10 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de nitrato presenten un valor de 0,013 mg/cm³ en superficie. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 8,06 e⁻³ mg/cm³ para N1, un valor de 5,59e⁻³ mg/cm³ en N2 y 5,12 e⁻³ mg/cm³ para N3.

Figura 4.3-46 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

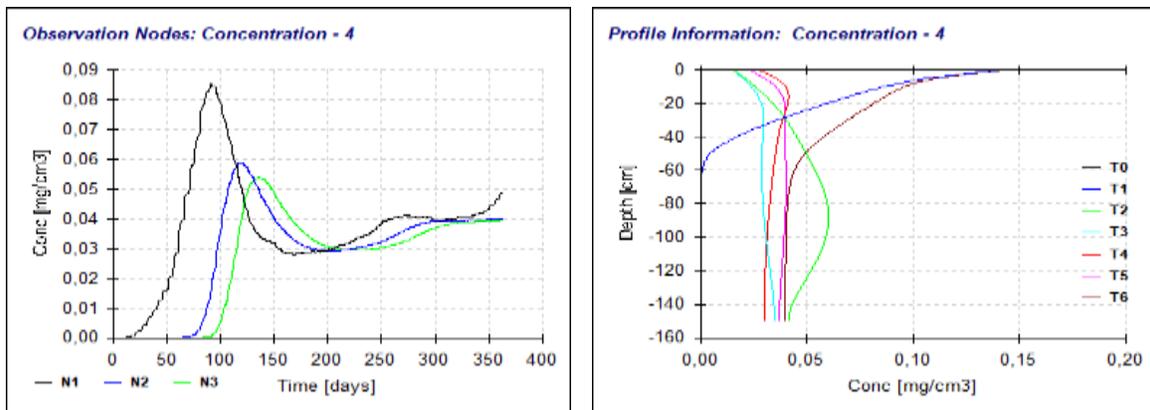


Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-47** se enseñan la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de grasas de 104,6 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones de las grasas se registrarían en la superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,086 mg/cm³, lo cual ocurre en el T6. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,085 mg/cm³, para N2 de 0,059 mg/cm³ y en N3 de 0,053 mg/cm³.

Figura 4.3-47 Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo PV6. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

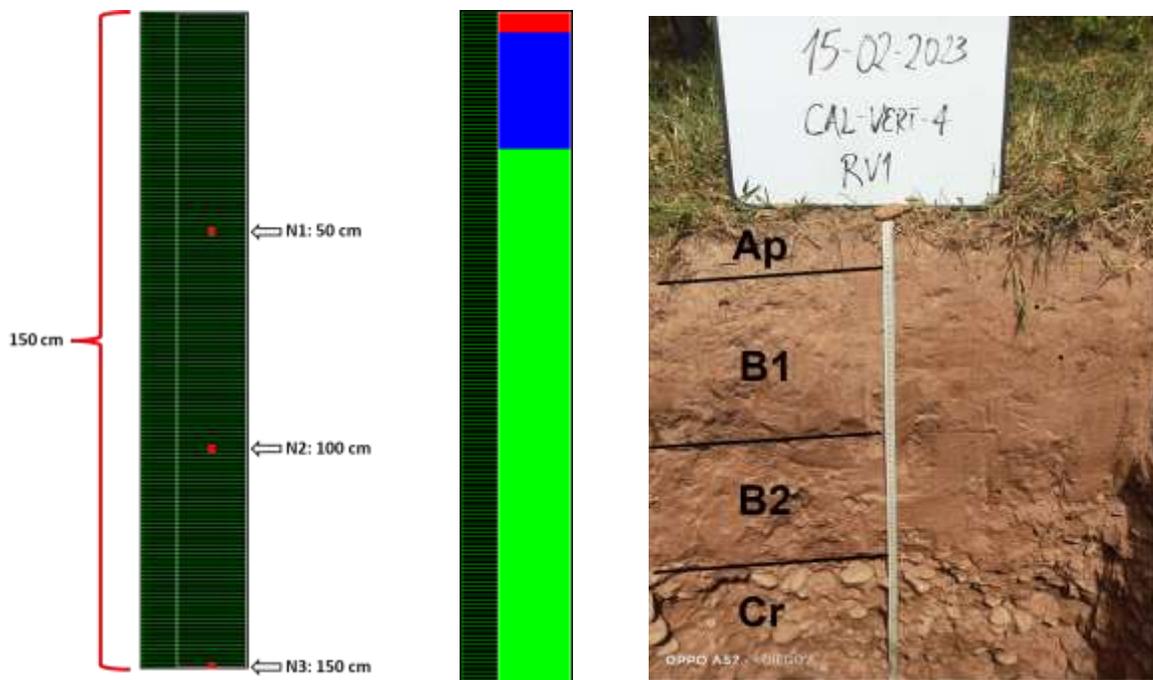


Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- ✓ **Consociación RV1 Fluventic Humic Dystrudepts familia Franco Guesa, mezclada, superactiva, isohipertérmica (Cal_Vert_4)**

El perfil modelado para la unidad de suelo RV1 es de 1,50 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_4, por lo cual, se definieron tres horizontes de suelo y se ubicaron tres puntos de observación en el modelo a los 50 cm (N1), 100 cm (N2) y 150 cm (N3) (**Figura 4.3-48**), el primero de ellos a 50 cm (N1), el N2 a 100 cm y el N3 a 150 cm, que corresponde a la profundidad del nivel estático del agua subterránea establecida en el numeral 4.3.6.5.

Figura 4.3-48 Puntos de observación de los flujos con base en el perfil de la calicata CAL_VERT_4, Unidad de suelo RV1.



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

- **Escenario 1: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-49** se presenta el flujo de agua en la zona vadosa del perfil modal Cal_Vert_4 (unidad RV1), para las condiciones naturales del escenario 1. En esta, se puede observar que el flujo de agua disminuye a medida que se profundiza en el perfil de suelo. De esta manera, los primeros 50 cm del suelo responden más rápido a los procesos de precipitación, evapotranspiración e infiltración, respuesta similar en los 100 cm, mientras que, para los 150 cm, se evidencia una menor magnitud de la respuesta. Con base en los resultados obtenidos, los máximos flujos en el N1 (**Figura 4.3-49**) tendrán una tasa de infiltración diaria máxima de 1,70 cm/d en el día 148. En cuanto a los nodos N2 y N3, los valores máximos reportados son de 1,50 y 1,43 cm/d, respectivamente.

Figura 4.3-49 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 1: condiciones naturales



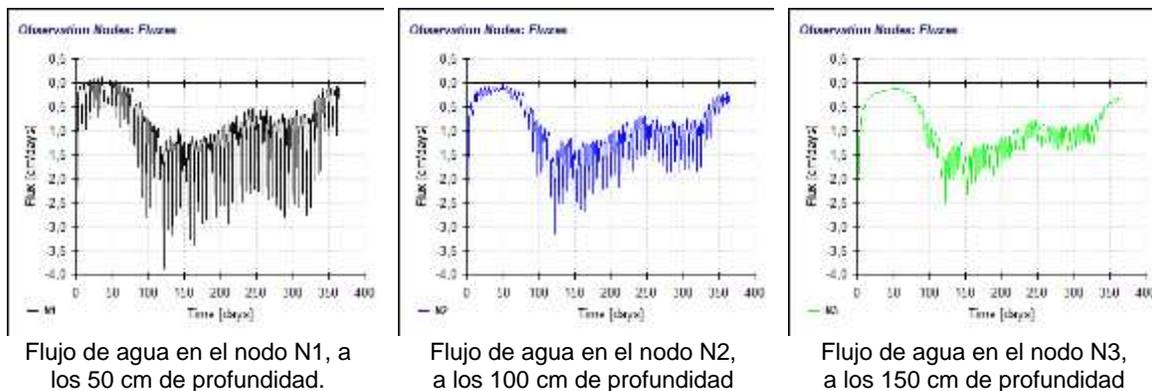
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

○ **Escenario 2-3: Flujo de agua**

En la **Figura 4.3-50** 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 y no domésticas. La lámina de riego para la unidad de suelo PV2 será de 2,572 cm y se aplicará cada 6 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 50 cm de profundidad el flujo de agua alcance un máximo de 3,87 cm/d, valor superior al reportado en el escenario 1 por más de 2 cm/d. Los nodos N2 y N3, también presentan respuestas similares al primero, reportando flujos máximos diarios de 3,14 y 2,53 cm/d. sin embargo, la diferencia de los dos escenarios se evidencia en los meses de baja precipitación en donde el escenario 1 reporta valores muy cercanos a cero, mientras que con la aplicación del riego se evidencia el incremento del flujo de agua en aproximadamente 1 cm/d en el primer nodo (hasta 50 cm de profundidad).

Figura 4.3-50 Flujos de agua en el perfil modal de la unidad de suelo PV2. Escenarios de modelación número 2 y 3: vertimiento de aguas residuales domésticas y no domésticas



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

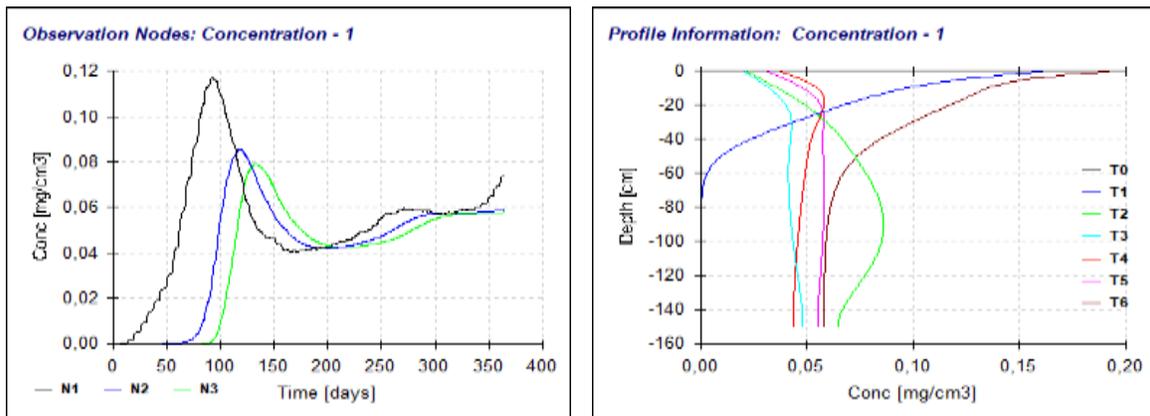
- **Escenario 2: Flujo de cloruro (150 mg/L), sulfato (150 mg/L), nitrato (1,5 mg/L) y grasas (5 mg/L)**

En la **Figura 4.3-51** 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 150 mg/L.

Durante los primeros 60 días del año modelado (T1) se esperaría que el cloruro disuelto en la lámina de riego no tenga ninguna acumulación anormal en ningún horizonte del perfil. Al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro se reportan para el N1, y la acumulación máxima de 0,196 mg/cm³ en la superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a partir de los 60 días de la modelación del orden de 0,065 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruro para los tres nodos se registran a los 91 días para el N1 con un valor de 0,117 mg/cm³, donde posteriormente se presenta una disminución que responde al aumento de la concentración máxima en los otros dos nodos con valores de 0,085 y 0,079 mg/cm³.

Figura 4.3-51 Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).

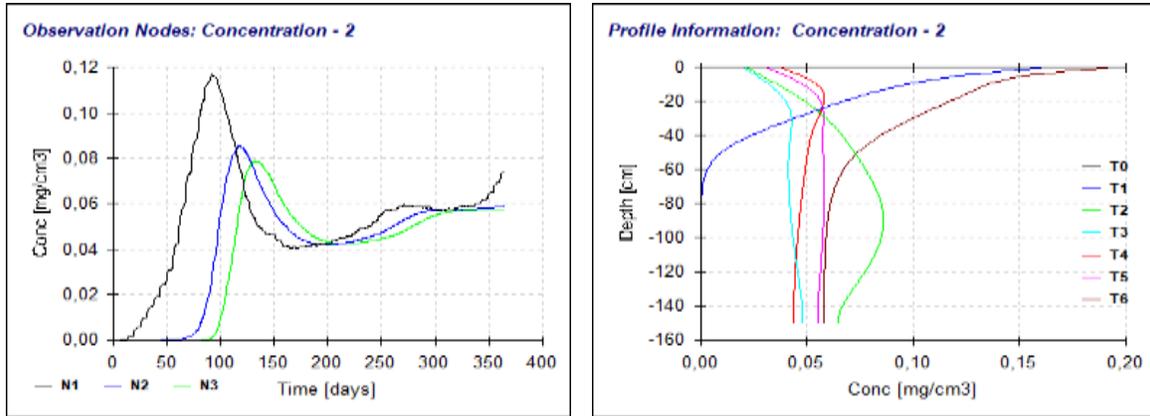
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-52** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 150 mg/L.

De acuerdo con los resultados de la modelación obtenidos, 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 se concentran en los primeros 70 cm y posterior a esto tienden a presentar valores homogéneos en toda la columna. Sin embargo, al finalizar el año de modelación, las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,195 mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-52**, las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control ocurrirían para N1 a 91 días del inicio del vertimiento con valor de 0,117 mg/cm³, para N2 0,085 mg/cm³ a los 117 días y en N3 0,078 mg/cm³ a los 132 días de modelación.

Figura 4.3-52 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



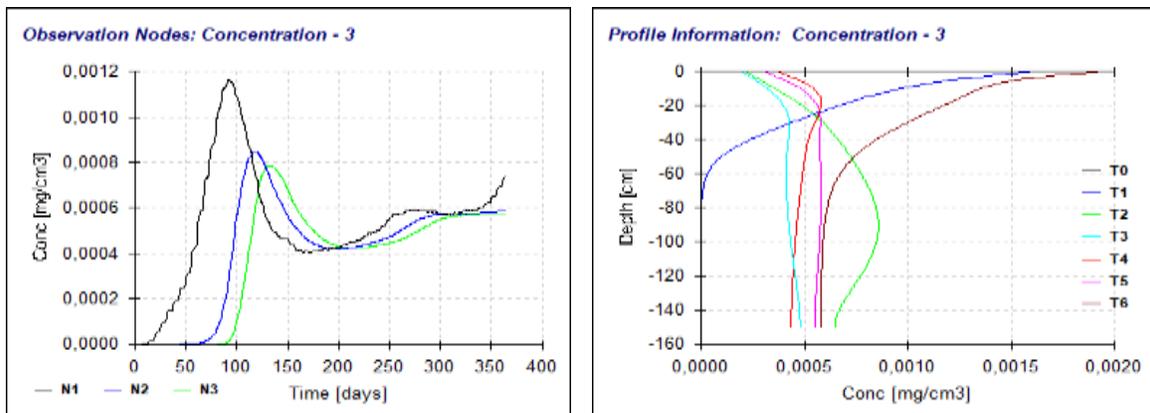
Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-53** se presenta la concentración del nitrato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales tratadas con una concentración de sulfato de 1,5 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 nitrato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de $1,94e^{-3}$ mg/cm³.

Como se observa en la **Figura 4.3-53**, en los puntos de control las concentraciones máximas de este soluto se presentan a 91 días del inicio del vertimiento para N1 con valor de $1,16e^{-3}$ mg/cm³, a los 117 días para N2 con una concentración de $8,51e^{-4}$ mg/cm³ y a los 132 días de modelación en N3 con un valor de $7,86e^{-4}$ mg/cm³.

Figura 4.3-53 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas

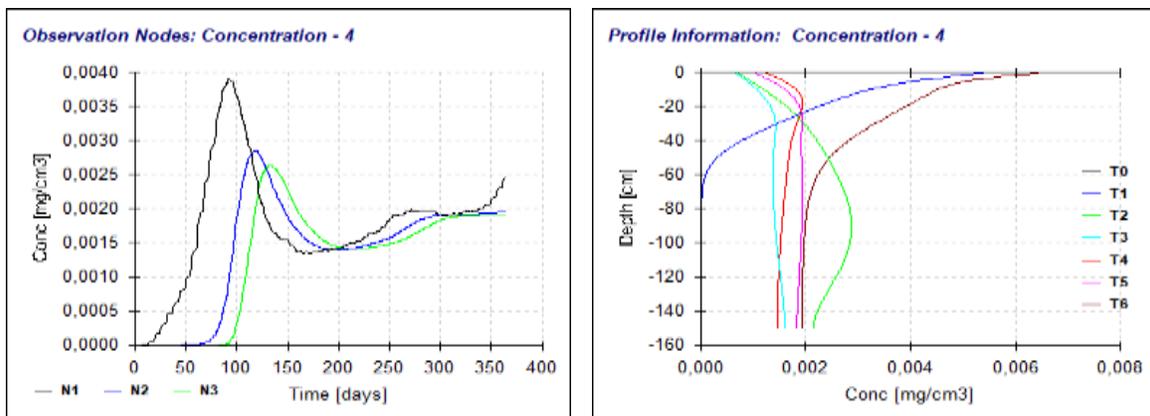


Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

La **Figura 4.3-54** presenta la concentración de grasas en los puntos de control, así como su distribución en el perfil modal de 150 cm para los tiempos T1 a T6. Esta modelación contempló el vertimiento de aguas residuales tratadas con una concentración de grasas y aceites de 5 mg/L.

De acuerdo con los datos proyectados por el modelo, el perfil de concentraciones de grasas se evidencia la mayor acumulación a los 60 días (T1) en los primeros 50 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 64, 89 y 364 en los nodos N1, N2 y N3, respectivamente, con concentraciones de $2,94e^{-3}$ mg/cm³ a los 50 cm (N1), $1,91e^{-3}$ mg/cm³ a los 100 cm (N2) y $9,55e^{-4}$ mg/cm³ a los 150 cm (N3).

Figura 4.3-54 Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 2: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de grasas y aceites en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

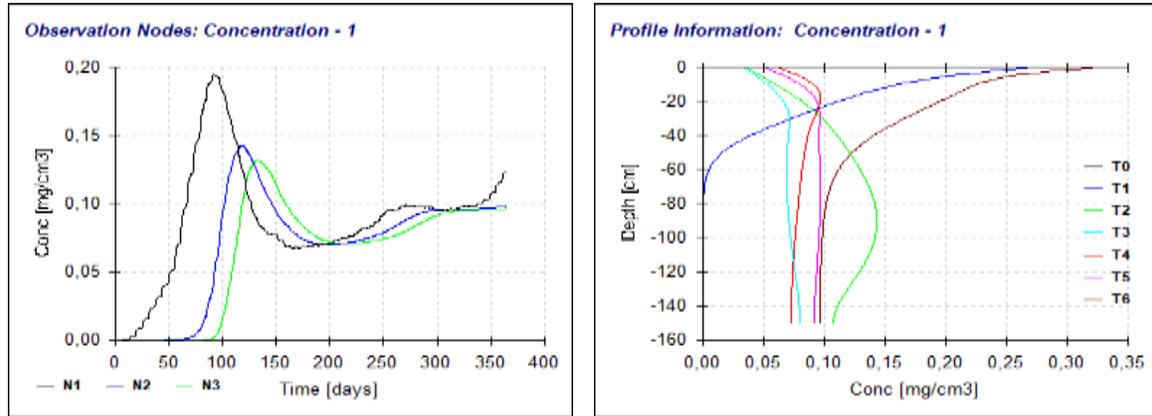
- **Escenario 3: Flujo de cloruros (250 mg/L), sulfatos (400 mg/L), nitratos (10 mg/L) y grasas (104,6 mg/L)**

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 cloruros de 250 mg/L, de sulfatos de 400 mg/L, nitratos de 10 mg/L y grasas de 104,6 mg/L.

Al igual que en el escenario 2 y como se evidencia en la **Figura 4.3-55**, se espera que al finalizar el año de modelación (T6) las mayores concentraciones de cloruro reporten un valor de 0,326 mg/cm³ en superficie. En cuanto a concentración máxima a 150 cm de la superficie (en contacto con el acuífero) se daría a los 60 días de la modelación del orden de 0,108 mg/cm³.

Las concentraciones máximas de cloruros para los tres nodos se registran a los 91 días para el N1 con un valor de 0,195 mg/cm³, el N2 reporta un valor de 0,142 mg/cm³ y el N3 0,131 mg/cm³, en los días 117 y 132, respectivamente.

Figura 4.3-55 Concentraciones de cloruros en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

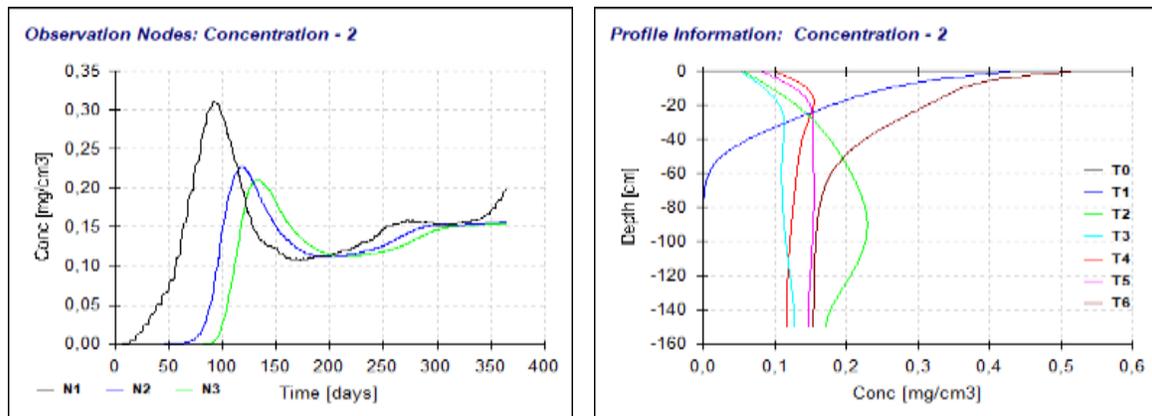


Concentración de cloruros en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-56** se enseñan la concentración del sulfato en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de sulfato de 400 mg/L.

De acuerdo con los resultados las mayores concentraciones de sulfato se registrarían en superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,520 mg/cm³, lo cual ocurre en el T6. En cuanto a las concentraciones máximas de sulfato en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,311 mg/cm³, para N2 de 0,227 mg/cm³ y en N3 de 0,210 mg/cm³.

Figura 4.3-56 Concentraciones de sulfatos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

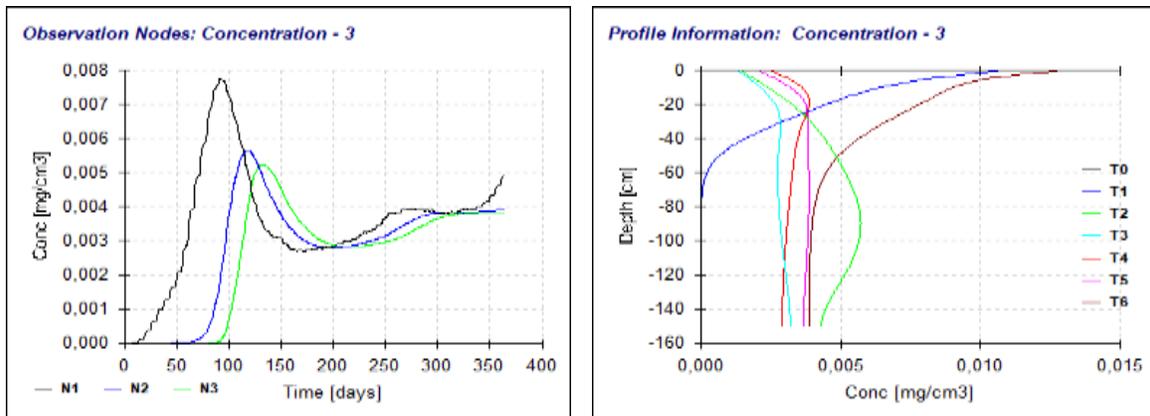


Concentración de sulfatos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Se presenta en la **Figura 4.3-57** la concentración de nitratos en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de 10 mg/L.

Al igual que en el escenario 2, se espera que para el tiempo T6, las mayores concentraciones de nitrato presenten un valor de 0,013 mg/cm³ en superficie. Las concentraciones máximas de este soluto para los tres nodos corresponden a 7,76e⁻³ mg/cm³ para N1, un valor de 5,67e⁻³ mg/cm³ en N2 y 5,24e⁻³ mg/cm³ para N3.

Figura 4.3-57 Concentraciones de nitratos en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas

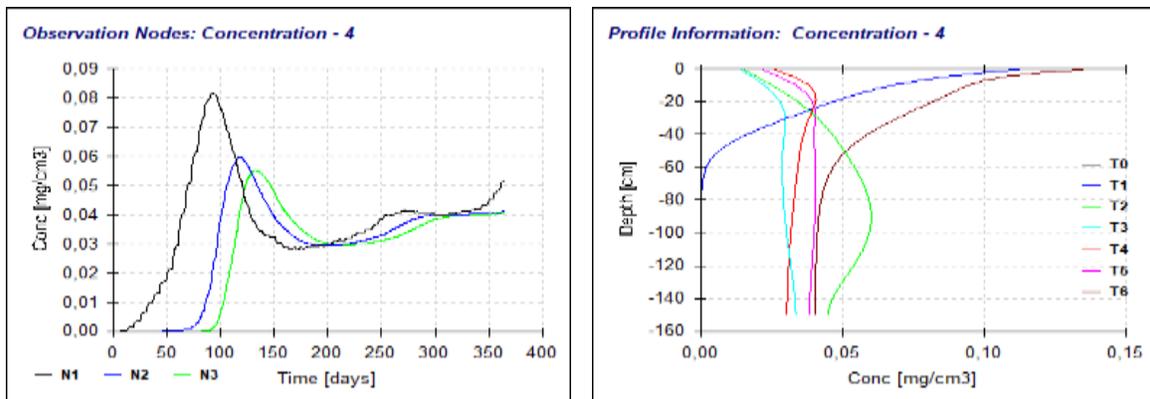


Concentración de nitratos en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la **Figura 4.3-58** se enseñan la concentración de grasas en los puntos de control y su distribución en el perfil de suelo de 150 cm para diferentes tiempos (T1-T6). La modelación del escenario dos contempla el vertimiento aguas residuales sin tratamiento con una concentración de grasas de 104,6 mg/L.

Los resultados evidencian que las mayores concentraciones de las grasas se registrarían en la superficie y podrían alcanzar un valor máximo de 0,137 mg/cm³, lo cual ocurre en el T6. En cuanto a las concentraciones máximas en los puntos de control, los valores reportados son en N1 de 0,082 mg/cm³, para N2 de 0,060 mg/cm³ y en N3 de 0,055 mg/cm³.

Figura 4.3-58 Concentraciones de grasas en el perfil modal de la unidad de suelo RV1. Escenario de modelación número 3: vertimiento de aguas residuales tratadas



Concentración de grasas en los puntos de observación N1 (50 cm), N2 (100 cm) y N3 (150 cm).
Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ **Conclusión de la modelación con Hydrus 1-D**

Teniendo en cuenta los resultados presentados para el escenario 2, se concluye que, tras un año de vertimiento, las aguas residuales tratadas penetrarían en su totalidad la zona vadosa de los perfiles modales representativos de las unidades de suelo: PV2, PV5, PV6 y RV1. Igualmente, el modelo predice transporte y concentraciones de los solutos cloruros, sulfatos, nitratos y grasas y aceites (provenientes de los vertimientos de aguas residuales), en todos los perfiles modales; lo cual se explicaría por las texturas moderadamente gruesas, medias, medianamente finas y finas de los horizontes de cada unidad, y las tasas de infiltración moderadas (PV5 y PV6) y moderadamente lenta (PV2 y RV1). Asimismo, se prevé que, al finalizar el año de vertimiento de aguas residuales tratadas, las mayores concentraciones de los cuatro solutos anteriormente mencionados en los 3 perfiles modales ocurrirían muy cerca de la superficie en los primeros 10 cm de profundidad.

Las concentraciones de solutos finales se calcularon con base en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, estimada con el software HYDRUS 1D, como un parámetro calculado a partir de las texturas, la densidad aparente y las curvas de retención de humedad, en el horizonte de contacto con el acuífero y se presentan a continuación en la **Tabla 4.3-36**. En esta se puede apreciar que en los cuatro perfiles evaluados ninguno de los cuatro solutos supera las concentraciones máximas permitidas, en donde para el caso de los cloruros, es el soluto que más se acerca a los límites permitidos por la norma, sin embargo, los valores obtenidos no superan el 25 % de estos. En cuanto a los sulfatos representa el 15 %, los nitratos menos del 10 % y las grasas representan un porcentaje cercano al 5 %, lo cual garantiza el cumplimiento de la normatividad vigente.

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.				
	PV2	PV5	PV6	RV1	
	Cal_Vert_1	Cal_Vert_2	Cal_Vert_3	Cal_Vert_4	
Cloruro	0,054	0,060	0,057	0,058	250 mg/l*
	mg/cm3				
	54,21	60,11	56,53	57,84	
Sulfato	mg/l				400 mg/l*
	0,054	0,060	0,057	0,058	
	mg/cm3				
Nitrato	54,2	60,11	56,53	57,83	10 mg/l*
	mg/l				
	0,001	0,001	0,001	0,001	
Grasas	mg/cm3				41,4 mg/l*
	0,54	0,60	0,57	0,58	
	mg/l				
	0,002	0,002	0,002	0,002	
	mg/cm3				
	1,81	2,00	1,89	1,93	
mg/l					

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Para el escenario 3, el cual contempla un vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, los resultados presentados en la **Tabla 4.3-37** evidencia que al igual que el escenario 2 para ninguno de los solutos modelados, en los cuatro perfiles modales al finalizar un año de vertimiento, se superan los límites máximos permitidos Decreto 1594 de 1984, Artículo 38 (citado por el Decreto 1076 del 2015 Art. 2.2.3.3.9.3), a excepción de la unidad PV5, que para el caso de las grasas, estas

superan el límite permitido por 0,52 mg/l al finalizar el periodo de la modelación, sin embargo como se ha mencionado, este es un escenario crítico que contempla el vertimiento de las AR sin tratar durante todo el periodo de modelación, por lo cual es considerado como una contingencia.

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.				
	PV2	PV5	PV6	RV1	
	Cal_Vert_1	Cal_Vert_2	Cal_Vert_3	Cal_Vert_4	
Cloruro	0,090	0,100	0,094	0,096	250 mg/l*
	mg/cm3				
	90,34	100,2	94,22	96,39	
Sulfato	mg/l				400 mg/l*
	0,145	0,160	0,151	0,154	
	mg/cm3				
Nitrate	144,5	160,3	150,7	154,2	10 mg/l*
	mg/l				
	0,004	0,004	0,004	0,004	
Grasas	mg/cm3				41,4 mg/l*
	3,61	4,01	3,77	3,86	
	mg/l				
Grasas	0,038	0,042	0,039	0,040	41,4 mg/l*
	mg/cm3				
	37,80	41,92	39,43	40,33	
mg/l					

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

4.3.6.8.4.4 Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero asociado, a la salud humana y al ambiente

De acuerdo con 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 contaminados⁷, “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.

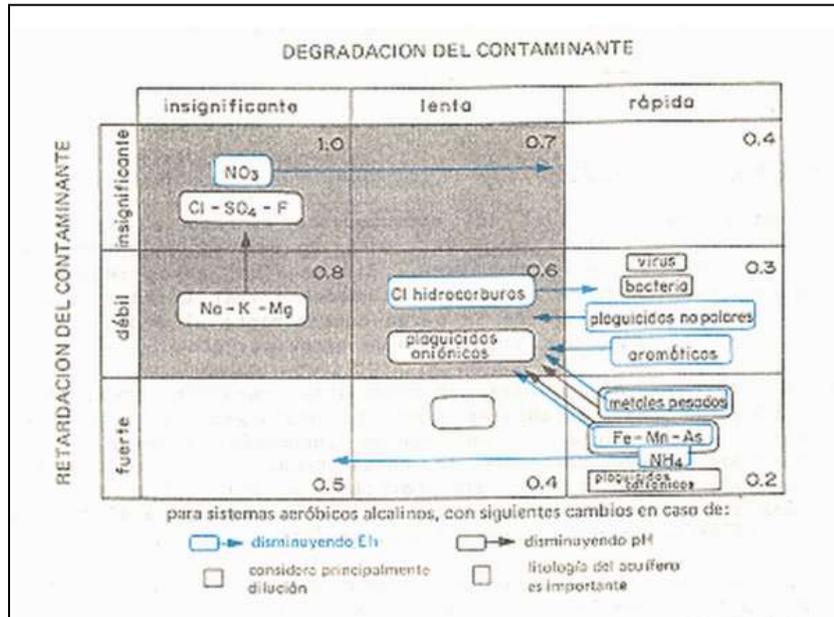
➤ Amenaza por Contaminación

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 4.3-59**), intensidad de la contaminación - B

⁷ Tomado de: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/suelos-contaminados/guia_tecnica_contaminantes_suelo_declaracion_suelos_tcm7-3204.pdf

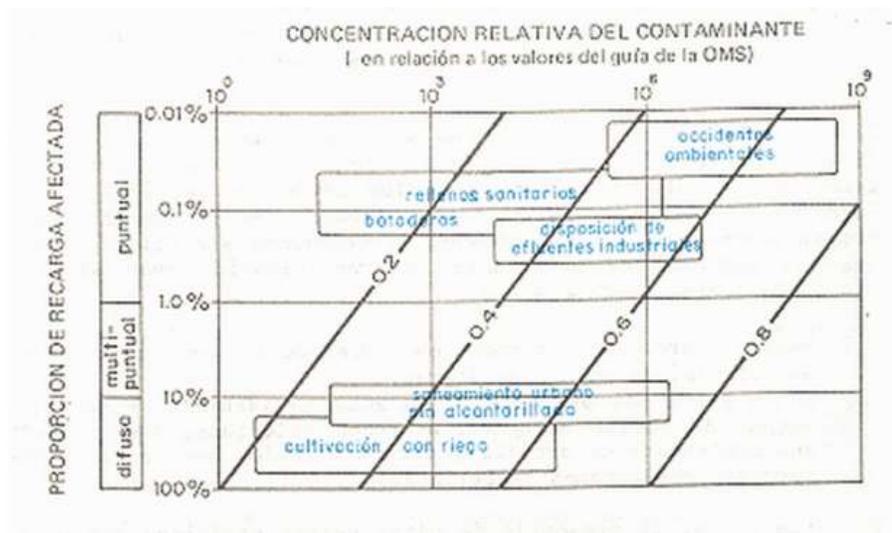
(Figura 4.3-60), modo de disposición del contaminante - C (Figura 4.3-61) y tiempo de aplicación de la carga contaminante - D (Figura 4.3-62). A cada característica se le asignó un valor de 0 a 1, de acuerdo con las caracterizaciones obtenidas con las gráficas que se presentan a continuación:

Figura 4.3-59 Clase de contaminante (A)



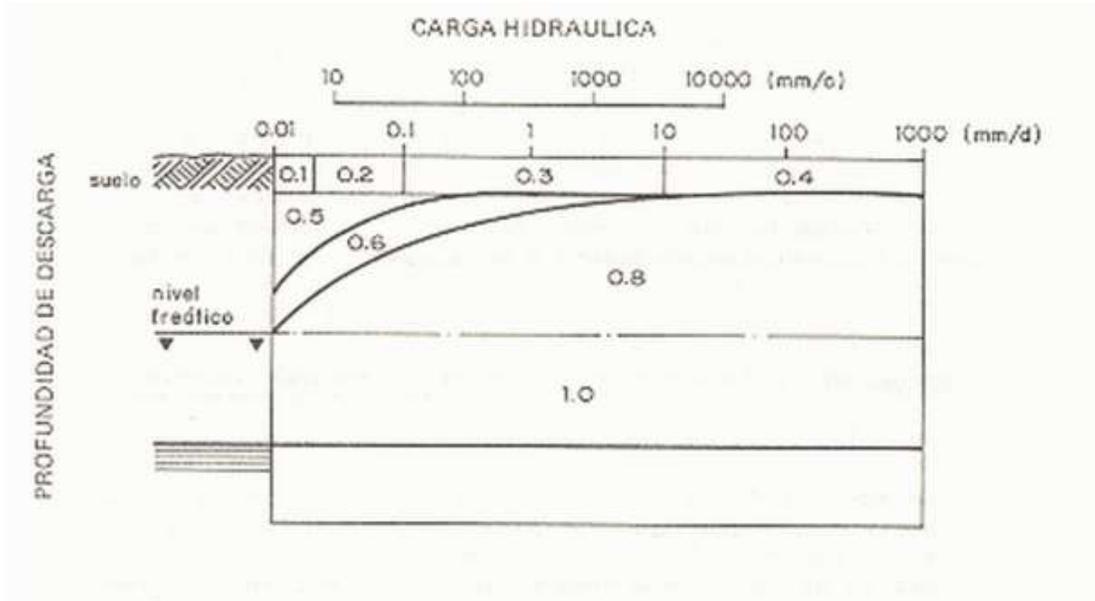
Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

Figura 4.3-60 Intensidad de contaminante (B)



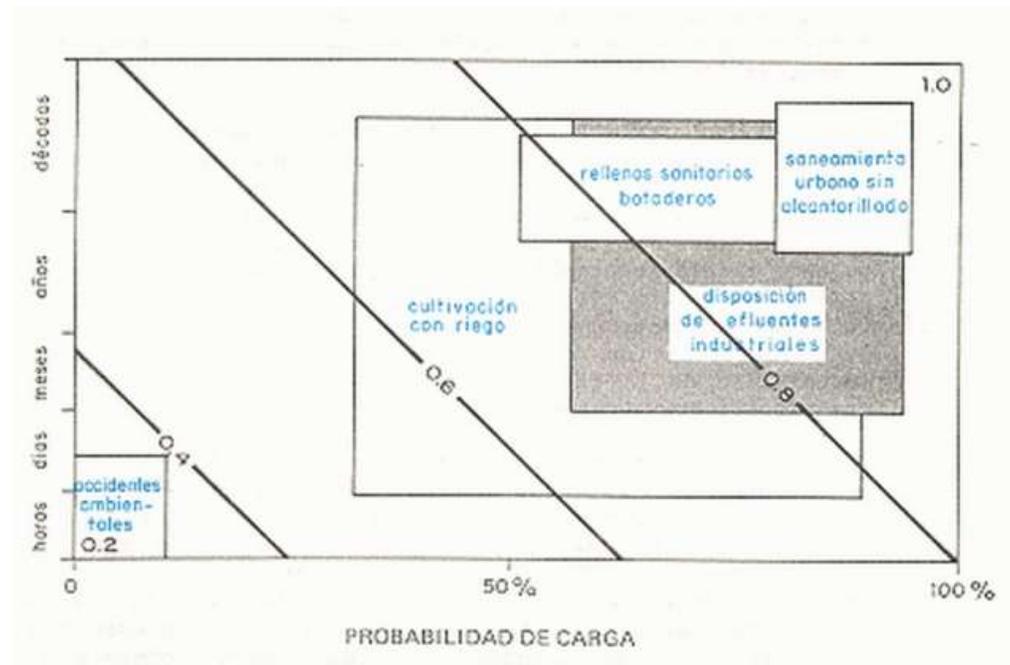
Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

Figura 4.3-61 Modo de disposición de contaminante (C)



Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

Figura 4.3-62 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				
Nitratos	1.0	0.2	0.4	0.7	0.57 Moderada
Grasas y aceites	0,6				0,47 Moderada

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

➤ **Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (método cualitativo)**

De acuerdo con el capítulo 3 (Numeral 3.2.1.10 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a contaminación), en el área de influencia del AD Llanos 141, los acuíferos son vulnerables a contaminantes relativamente móviles y/o persistentes o bien a eventos de contaminación continuos causados durante largos periodos de tiempo. Esta vulnerabilidad fue calculada a partir del método DRASTIC, en donde se estimó que la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero libre, varía entre alta, moderada y baja, para los acuíferos asociados a las unidades de suelo en las cuales se solicita el permiso de vertimiento dependiendo de la profundidad en la que se encuentra la tabla de agua, también se encuentran sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea, tal como se puede ver en la **Tabla 4.3-39**.

Tabla 4.3-39 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos obtenida para el AD Llanos 141

UNIDAD DE SUELO	VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS ASOCIALES A LAS UNIDADES DE SUELO MÉTODO DRASTIC	ÁREA DENTRO DEL AD LLANOS 141 ha
PV2	Baja	8565,6
	Moderada	1745,48
PV5	Baja	11,02
	Moderada	10489,17
	Alta*	131,99
PV6	Baja	2,73
	Moderada	2650,85
	Alta*	70
RV1	Moderada	666,01
	Alta*	3,66

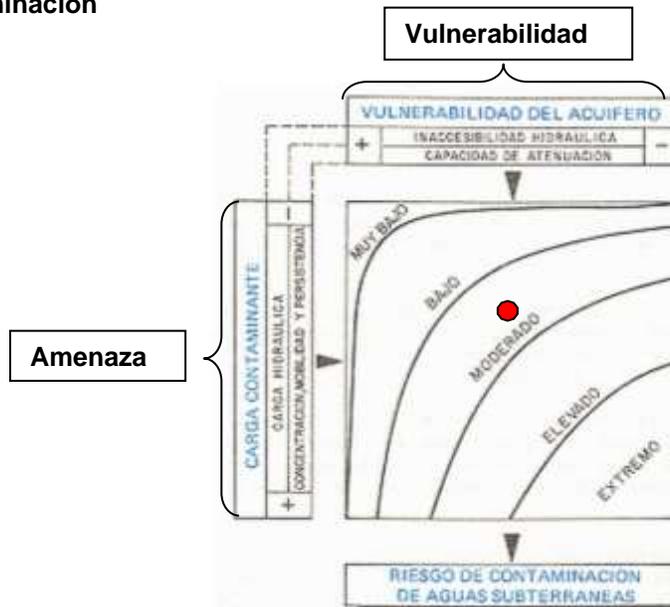
* Aunque la solicitud de permiso de vertimiento se realice sobre la unidad cartográfica de suelo, y existan áreas dentro de las UCS con vulnerabilidad alta, estas se excluirán por zonificación ambiental y de manejo para la solicitud del permiso, por lo cual en la unidad parte donde se podrán implementar ZODAR serán en UCS solicitadas con vulnerabilidad muy baja, baja o moderada.

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

✓ **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 4.3-63** se aprecia la relación vulnerabilidad versus amenaza por la carga de contaminante y el producto del riesgo de contaminación.

Figura 4.3-63 Relación vulnerabilidad del acuífero, amenaza por carga contaminante y riesgo de contaminación



- **Riesgo de contaminación para las unidades:** Complejo PV2, Consociación PV5, Consociación PV6 y Consociación RV1.

Fuente: (Foster & Hirata, 1988)

- **Conclusión de la evaluación del riesgo por la realización del vertimiento en suelo**

En el caso del área de influencia del AD Llanos 141, 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: Complejo PV2, PV5, PV6 y RV1, debido principalmente por las características intrínsecas de los acuíferos reflejadas en sus valores de vulnerabilidad.

Según lo anterior, las 4 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 e industriales tratadas, siempre y cuando, se sigan las acciones de manejo planteadas en la ficha de manejo de residuos líquidos dentro del programa de manejo del recurso suelo: numeral 7.1.1.5; 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 1,5 m de profundidad. Cabe mencionar que se recomienda operar el sistema de vertimiento en periodos de bajas precipitaciones y en periodos de alta precipitación se deben operar con restricciones (que para el área del AD Llanos 141 serían entre inicios de abril a principios de noviembre) y/o de amenazas por inundación, pues en este periodo climático en esos casos se debe esperar a que el suelo este por debajo de su capacidad de campo para reiniciar operaciones, ósea dejar un periodo del número de días que corresponda la frecuencia de riego para cada unidad cartográfica de suelo, la cual puede variar entre 4 a 6 días (96 a 144 horas) y pasado este tiempo, reiniciar la operación del vertimiento, para que el suelo se recupere y no se presenten encharcamientos ni sobresaturaciones.

4.3.6.8.5 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 AD Llanos 141, las cuales se detallan en el Capítulo 4.8_Residuos_Solidos del presente EIA.

4.3.6.8.6 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 AD Llanos 141 y a fin de minimizar el impacto sobre el recurso suelo y aguas subterráneas se seguirán las medidas indicadas en las fichas: LL141_PM_AB5 Manejo de residuos líquidos, LL141_PM_AB13 Manejo de aguas residuales domésticas (ARD) y no domésticas (ARNd), y LL141_PM_AB12 Manejo de aguas subterráneas 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 generadas a partir de las actividades en el AD Llanos 141 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: La ubicación de los ZODAR se proyectarán en áreas con usos de pastoreo o en su defecto áreas sin vegetación de tipo arbórea, es así, que no habrá afectación a los recursos forestales.

4.3.6.8.7 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 LL141_PM_S1 Información y participación comunitaria, LL141_PM_S2 Manejo de atención a comunidades (IPQR) 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.

4.3.6.9 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 domésticas en suelo:

4.3.6.9.1 Línea base del suelo

Tal como se ha expuesto en todo el numeral 4.3.6 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 dar cumplimiento a lo establecido en el Decreto 050 del 2018, se realizó

por unidad cartográfica por medio del laboratorio Chemnilab, el cual cuenta con acreditación IDEAM 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, los resultados se expusieron en el **numeral 4.3.6.2** del presente capítulo para los parámetros físicos, químicos y biológicos (**Tabla 4.3-14**), adicionalmente los resultados de los laboratorios originados por Chemnilab se encuentran en el **4_Usos_aprovechamiento_RN, 4.3_Vertimiento, ZODAR, Anexo 4.3.7 Resultados de laboratorio.**

4.3.6.9.2 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 realizó la selección de 21 puntos, que incluyen nueve (9) aljibes entre 3,1 y 11,24 m de profundidad, cuatro (4) pozos entre 13 y 67 m de profundidad y ocho (8) manantiales de los cuales dos (2) puntos se hallaron secos (NC282 y NC-267), para un total de 19 puntos monitoreados. Los puntos se destinan para uso doméstico, agrícola, pecuario, recreativo e industrial (construcción) en su mayoría. La selección de la red de monitoreo de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua subterránea se realizó tomando como base el inventario de puntos de agua subterránea, aplicando un método geoestadístico (Kriging) utilizando como variable espacial la conductividad eléctrica. Ver **Anexo 3_Caracterización Ambiental, 3.2.7_Hidrogeología, Resultados De Calidad e Hidrogeoquímica De Agua Subterránea.**

4.3.6.9.3 Sistema de disposición de los vertimientos.

A continuación, se presenta la información concerniente al sistema de disposición de los vertimientos:

4.3.6.9.3.1 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 4.3.6.8.4.**

4.3.6.9.3.2 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 4.3.6.3**, adicionalmente, la determinación del área de vertimiento se presentó en el **Numeral 4.3.6.8.4.2**, 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 4.3.6.4.1.**

4.3.6.9.3.3 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 4.3.6.8.4.2** 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.

4.3.6.9.3.4 Determinación de la variación del nivel freático

Este ítem se presentó en el **Numeral 4.3.6.5**, en el cual se realizó un análisis del nivel freático con base en los SEV's realizados para el estudio en el área de influencia del EIA AD Llanos 141.

4.3.6.9.3.5 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación

Para la determinación y mapeo de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, se empleó el método DRASTIC desarrollado por Aller et al., (1987) para la EPA; correspondiente a un método de índice y superposición, que involucra varios parámetros de evaluación.

El análisis se realizó a partir de información generada para el presente EIA en escala 1: 10.000 de los componentes de geología, pendientes, hidrogeología (inventario de puntos de agua subterránea, caracterización hidrogeológica y pruebas de bombeo) y suelos.

Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica - SIG, se realizó la superposición de las capas, obteniendo como resultado la vulnerabilidad escala 1:10.000 para el área de evaluación

En el **Numeral 4.3.6.8.4.4**, se presenta la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.

4.3.6.9.4 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 AD Llanos 141, 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 AD 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.

Adicionalmente se realizó la consulta de los usos de suelo a la Secretaria de Planeación del municipio de Cumaral y Restrepo, para lo cual el AD Llanos 141 está localizado en 3 diferentes áreas cuyo uso normativo es: Agroforestal, recuperación geomorfológica y de conservación.

4.3.6.9.5 Plan de monitoreo

El plan de monitoreo se presentó en el **numeral 4.3.6.8.6**, el cual se remite a las medidas adoptadas en las fichas de manejo: 7 LL141_PM_AB5 Manejo de residuos líquidos, LL141_PM_AB13 Manejo de aguas residuales domésticas (ARD) y no domésticas (ARNd), y LL141_PM_AB12 Manejo de aguas subterráneas con su correspondiente ficha de seguimiento y monitoreo presentadas en el Cap. 8 (LL141_SM_AB1 Programa de seguimiento y monitoreo a aguas residuales y aguas superficiales; LL141_SM_AB2 Programa de seguimiento y monitoreo al agua subterránea, LL141_SM_AB5 Programa de seguimiento y monitoreo al suelo). Dentro de las medidas allí descritas están el monitoreo de los suelos en los lugares de los ZODAR, medidas de nivel freático, monitoreo de parámetros de las aguas posterior al sistema de tratamiento y que serán vertidas en ZODAR, monitoreo de aguas subterráneas, entre otros, los cuales buscan asegurar el adecuado manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domésticas y no domésticas generadas a partir de las actividades en el AD Llanos 141 y evitar la afectación a los recursos suelo y aguas subterráneas.

4.3.6.9.6 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.

4.3.6.9.6.1 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 AD Llanos 141; ECOPETROL S.A plantea procedimientos para el desmantelamiento 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 ECOPETROL S.A lograra esta recuperación ambiental, pretendiendo mantener las condiciones adecuadas en todas las áreas utilizadas para el vertimiento en suelo en el AD Llanos 141, independientemente del resultado de la actividad.

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 reconfiguración 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 4.3-64**.

Figura 4.3-64 Plan de desmantelamiento y abandono para las ZODAR



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

➤ **Objetivos**

- Establecer un plan que permita el desmantelamiento ordenado del proyecto de vertimiento de agua residual domestica e industrial tratada en suelo, o de sus partes, y la reparación de los efectos causados por las diferentes actividades desarrolladas por el desmante 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 agrologico del área intervenida del proyecto mediante la ejecución de procesos de revegetalización y empradización 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 AD Llanos 141 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 (**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 no domésticas, campamentos temporales y/o generadores de energía	Se retirarán de los sitios
Tanques de almacenamiento	Adecuación para uso comunitario y/o se retirarán de los sitios
Aspersores	Adecuación para uso comunitario y/o se retirarán de los sitios
Vías de acceso	Adecuación para entrega a la comunidad

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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 AD Llanos 141 puede darse por algunas circunstancias, como la terminación por parte de ECOPEPETROL

S.A., 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 ECOPETROL S.A. 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 AD.

➤ **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 AD Llanos 141, 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.

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 e 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, 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 AD Llanos 141 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 AD Llanos 141, 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 reconformadas. 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 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 ECOPETROL S.A. 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: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

En la infraestructura construida con la finalidad de recolectar y tratar el agua residual industrial, se deben contemplar los manejos descritos en la **Tabla 4.3-42**.

Tabla 4.3-42 Elementos a dismantelar en estaciones de tratamiento de agua residual doméstica e industrial y otra infraestructura

INFRAESTRUCTURA	ACCIONES
Equipos	Estos equipos se dismantelan 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 dismantelarán y se llevarán a los sitios designados por ECOPETROL S.A., 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 dismantan y se almacenan. Su disposición final podrá ser a través de un tercero autorizado, reutilización en estaciones existentes o proyectadas pertenecientes a ECOPETROL S.A. En caso de que estos elementos no se puedan reutilizar, se almacenaran en sitios adecuados en el AD 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 ECOPETROL S.A. 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 dismantarlos. Estos serán almacenados en un sitio autorizado por ECOPETROL S.A. y podrán ser reutilizados por la empresa.
Sistema de abastecimiento de agua residual doméstica e 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.

INFRAESTRUCTURA	ACCIONES
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 dismantelarán y los segmentos serán almacenados en el sitio dispuesto por ECOPETROL S.A., ya sean predios de su propiedad, en bodegas, en acopios o en sitios adecuados dentro de las Estaciones
Estructura en concreto	Se dismantelará 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. Estructura en concreto Se dismantelará 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 reconfiguración 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 los mismos y se retirará la infraestructura existente (líneas de flujo, aspersores, etc.) en caso de requerirse.

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

➤ **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 dismantelarán y se almacenarán los equipos y accesorios en un área de acopio definida por ECOPETROL S.A. para su almacenaje y/o reutilización en otros proyectos, en casos de que los equipos y accesorios no puedan ser reutilizados, estos serán dismantelados, 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 de Cumaral y Restrepo 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 dismantelamiento. Los suelos inertes serán dispuestos en las ZODME aprobados para el AD Llanos 141. 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, dismantelamiento 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 dismantelar, 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 AD; 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 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 exploración 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 comunidad, involucrándola en los procesos de recuperación, mediante inducciones prácticas, talleres, ya que ellos serán los que deberán seguir y realizar la extensión, en pos 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 de análisis de suelos “in situ” con el propósito de determinar cómo está esa área químicamente y así determinar sus necesidades en los elementos y los requerimientos en abonos, fertilizantes y enmiendas para el desarrollo de la revegetación, de maquinaria, equipos y comunidad 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 4 unidades cartográficas aptas y de interés para implementar las ZODAR asociadas a las unidades PV2, PV5, PV6 y RV1, 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 implementarán ZODAR en rondas hídricas que tengan características de inundabilidad, además, se emplearán zonas que tengan pendientes menores al 25% (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 alta y muy alta, al igual que zonas que presenten niveles freáticos superficiales y finalmente se respetarán las rondas a la infraestructura social existente.

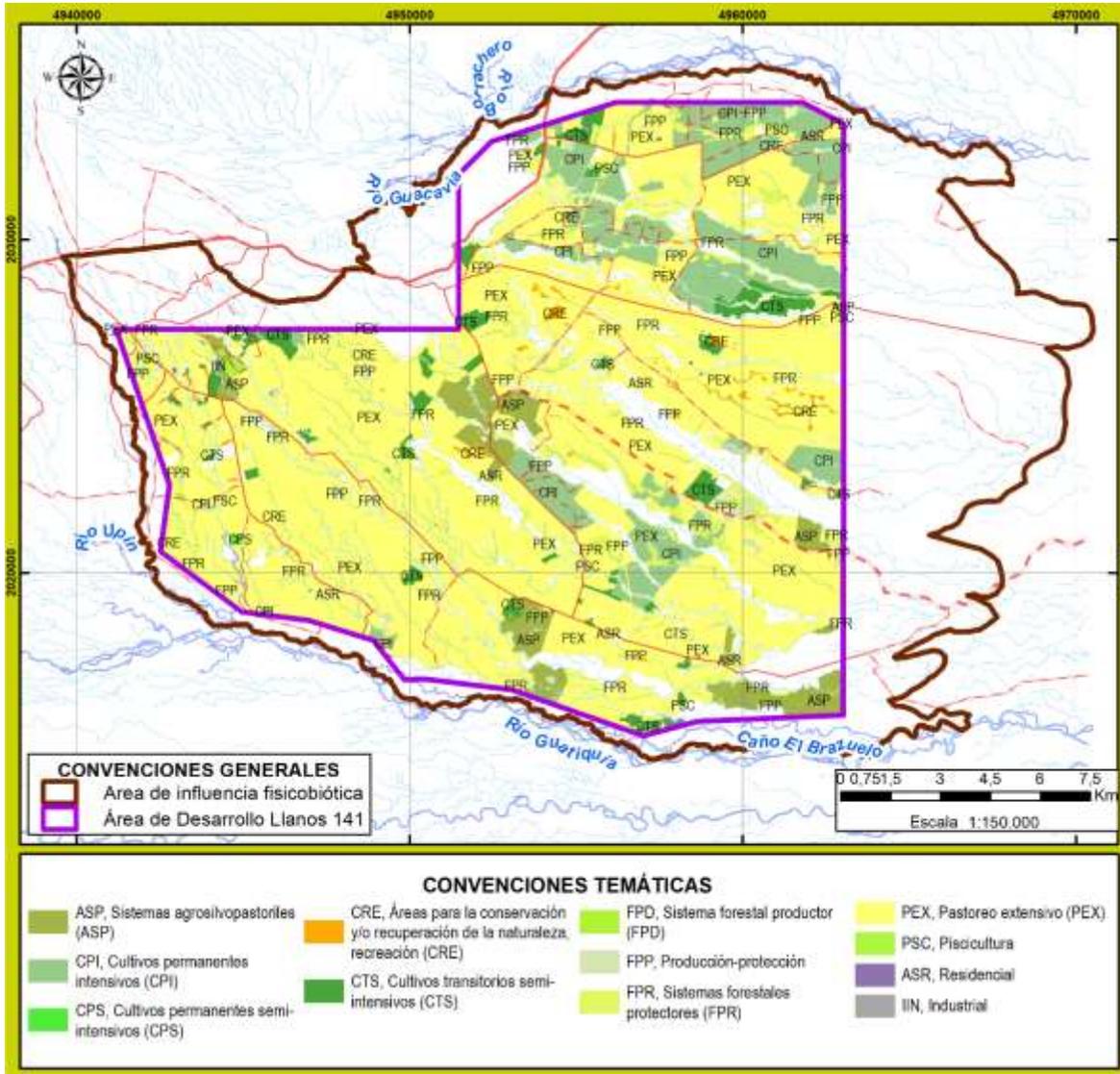
Teniendo en cuenta lo anterior, los usos que se deben implementar posterior al desmantelamiento y abandono de las áreas utilizadas para la implementación de las ZODAR, deben estar encaminados a la reutilización de las áreas en los usos que se tenían antes de ser intervenidos por el proyecto, y que no 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 y se obtuvo el resultado presentado en la **Tabla 4.3-43**.

Tabla 4.3-43 Usos actuales presentes en las unidades cartográficas de suelo aptas, de interés y solicitadas para realizar vertimiento

USO ACTUAL	UNIDA DE SUELO SOLICITADA PARA VERTIMIENTO
Ganadería – Pastoreo extensivo (PEX) Agricultura - Cultivos transitorios semi-intensivos	PV2, PV5, PV6 y RV1

Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

Figura 4.3-65 Área de influencia del AD Llanos 141. Uso actual sobre las unidades cartográficas de suelo solicitados para permiso de vertimiento



Fuente: (ANTEA COLOMBIA S.A.S., 2023)

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 actividades ganaderas de tipo Pastoreo extensivo, agrícolas de cultivos transitorios semi-intensivos o en las áreas que se permita realizar actividades agroforestales de tipo silvopastoriles o agrosilvopastoriles.

4.3.7 Disposición de agua mediante reinyección e Inyección

Ecopetrol S.A., mediante el presente Estudio de Impacto Ambiental solicita a la autoridad ambiental incluir la actividad de reinyección e inyección de agua en el Área de Desarrollo Llanos 141 la cual tendrá como objetivo el mantenimiento o aumento de la presión de los yacimientos para maximizar el factor de recobro de hidrocarburos (recuperación secundaria y terciaria) en las unidades que

resulten productoras con las formaciones Une (Unidad operacional K2), Chipaque o Guadalupe (Unidad operacional K1), San Fernando (Unidad operacional T2) y los niveles arenosos de la Formación Carbonera (Unidades operacionales Arenisca T1, Areniscas de Carbonera, Unidad C1 y Areniscas Superiores), e igualmente solicita incluir la actividad de reinyección con el objeto de disposición final en las mismas unidades, resulten o no productoras. La inyección de agua podría hacerse a través de una sola zona o múltiples zonas (inyección selectiva), es decir, el completamiento puede variar desde completamientos sencillos o completamientos selectivos.

Una de las estrategias de desarrollo para el proyecto Área de Desarrollo Llanos 141, contempla la perforación de varios tipos de pozos como son; pozos productores, pozos de inyección de agua para recobro, pozos disposal y pozos Near Field Exploration (NEF). Los pozos estarán ubicados en diez (10) plataformas que serán ubicadas por zonificación de manejo ambiental y se plantea perforar hasta cincuenta (50) pozos en total y estarán ubicados en un máximo hasta de cinco (5) pozos por plataforma. Del total de pozos planeados, máximo 20 pozos serán destinados para el desarrollo de la actividad de reinyección e inyección de fluidos como mecanismo para el mantenimiento de la presión del yacimiento y disposición final de agua asociada y estarían distribuidos estratégicamente en las plataformas solicitadas de acuerdo con las necesidades del proyecto

Se proyecta inyectar un caudal máximo por pozo de hasta 25.000 bwpd, pero el caudal final de inyección estará supeditado a los resultados de admisión que muestren las pruebas de inyectividad en cada pozo inyector, con la limitante de presión que no sobrepase la presión de fractura en la unidad receptora y no se superaría un volumen total de 160.000 bwpd en todo el proyecto. Los pozos podrían ser pozos nuevos perforados específicamente para la actividad de inyección, pero también se contempla la opción de convertir, pozos que pueda haber resultado secos o que muestren baja productividad.

Los volúmenes de agua requeridos para el mantenimiento de presión dependerán de las condiciones de presión de los yacimientos y su comportamiento durante la explotación. En el estado del proyecto no se conoce con exactitud el caudal de agua que demandará para la recuperación secundaria, pero la estrategia contempla el uso principalmente de agua asociada a producción de la misma Área de Desarrollo Llanos 141 y de ser necesario se complementará con otras fuentes externas disponibles y autorizadas, relacionadas con agua fresca captada en fuentes superficiales y/o agua subterránea, agua mejorada con polímeros, aguas de formación asociadas a la producción de hidrocarburos de otros campos y agua de origen industrial proveniente de infraestructura operada por Ecopetrol S.A., en la misma cuenca.

Aunque no se tienen datos de pruebas de inyectabilidad en el sitio, se conoce que las unidades operativas K2 (Une), K1 (Chipaque o Guadalupe), T2 (San Fernando) y la Formación Carbonera (Unidades operacionales Arenisca T1, Areniscas de Carbonera, Unidad C1 y Areniscas Superiores), tienen propiedades para almacenar hidrocarburos y en los campos cercanos (Bloque Apiay), también han sido usadas para reinyección de agua y han mostrado buen comportamiento en la recepción de la misma, sin afectar su integridad y con sellos regionales supra e infrayacentes que aseguran que no habrá comunicación con otras zonas, especialmente con las zonas acuíferas someras, relacionado con los acuíferos de la Formación Guayabo Nivel Superior y de los Depósitos Cuaternarios.

La inyección de agua para mantenimiento de la presión del yacimiento y el recobro secundario y terciario, no requiere permiso y será manejada dentro del Estudio de Impacto Ambiental, en las actividades de la operación de los campos y aunque no existen términos de referencia específicos, se presenta información de las condiciones y el proceso a implementar, para facilitar el análisis de la solicitud por parte de la autoridad, toman como guía los apartes considerados en el numeral 4.3. (Vertimientos – Disposición de aguas mediante reinyección) de los términos de referencia para

explotación de hidrocarburos HI- TER 1-03 de 2010, Numeral 4.3, emitidos por el MAVDT ahora MADS y el programa de disposición estaría acorde con la legislación ambiental, descrita en los mismos términos relacionados y a continuación se consigna, la información requerida para la inclusión de las actividades en el Área de Desarrollo Llanos 141. Documento que puede ser revisado y evaluado en el Anexo Modelo de Inyección.

Una vez se vaya realizando el completamiento de cada uno de los pozos inyectoros, se presentaría la información detallada, incluyendo el diseño mecánico, las pruebas de inyektividad, la conceptualización de la Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH acerca de la viabilidad en las unidades que serían sujetas a inyección / reinyección. En la Tabla 1 se relaciona la información.