

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“EVALUACIÓN DE EFECTOS INDIRECTOS EN UNA REFINERÍA DE
PETRÓLEO COMO CONSECUENCIA DE SISMO SEVERO EN LIMA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
FELIX VILLAFUERTE MERINO**

**ASESOR
Dr. JORGE MILCIADES OLARTE NAVARRO**

LIMA – PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos”.

Villafuerte Merino, Felix

fvillafuertem@uni.pe

+51 991090543

Agradezco a mi familia por haberme apoyado en esta carrera, sin ellos no hubiera podido logra culminarlo.

A la Universidad Nacional de Ingeniería por haberme acogido durante los años de estudios. Y a la facultad de Ingeniería Civil por darme los conocimientos.

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	4
Abstract	5
Prólogo	5
Lista de tablas	6
Lista de figuras	8
Lista de símbolos y siglas	13
Capítulo I: Introducción	14
1.1 Generalidades.....	14
1.2 Descripción del problema de investigación.....	14
1.3 Objetivos del estudio.....	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Hipótesis	15
1.4.1 Hipótesis general	15
1.4.2 Hipótesis específicas.....	16
Capítulo II: Marcos teóricos y conceptuales	17
2.1. El petróleo.....	17
2.1.1. Definición.....	17
2.1.2. Historia del Petróleo en el Perú.....	17
2.1.3. Fases de la industria del petróleo.....	20
2.2. Movimientos sísmicos	25
2.2.1. Definición.....	25
2.2.2. Parámetros de un sismo	26
2.2.3. Origen de los sismos	29
Capítulo III: Refinería en estudio	31
3.1. Información general	31
3.2. Proceso de refinación del petróleo	31
3.3. Productos obtenidos.....	34
3.4. Estructuras involucradas.....	35
3.4.1. Columnas de fraccionamiento.....	37
3.4.2. Hornos	39
3.4.3. Tanques	42
3.4.4. Otras estructuras	44
Capítulo IV: Análisis del peligro sísmico	47

4.1. Análisis del Peligro Sísmico	47
4.1.1. Caracterización del distrito de Lurín	47
4.1.1.1. Ubicación	47
4.1.1.2. Topografía	48
4.1.1.3. Población	48
4.1.1.4. Información climatológica	48
4.1.2. Microzonificación de Lurín	49
4.1.2.1. Geología	50
4.1.2.2. Características geotécnicas del suelo	50
4.1.2.3. Características dinámicas	51
4.1.2.4. Microzonificación sísmica	52
4.1.3. Sismicidad del área de estudio	54
4.1.3.1. Antecedentes	54
4.1.3.2. Evaluación del peligro sísmico	56
4.2. Análisis de vulnerabilidad sísmica de la refinería	59
4.2.1. Metodología para determinar vulnerabilidades	61
4.2.2. Vulnerabilidad sísmica de la refinería en estudio	63
4.2.2.1. Vulnerabilidad de tanques	67
4.2.2.2. Vulnerabilidad de torres de destilación	81
4.2.2.3. Vulnerabilidad de hornos	90
4.2.2.4. Vulnerabilidad de zonas estancas	96
4.2.2.5. Vulnerabilidad de las líneas de conducción	101
4.2.2.6. Vulnerabilidad de otros elementos	108
4.2.3. Consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos de la refinería	109
4.2.3.1. Derrames	111
4.2.3.2. Incendios	116
4.2.3.3. Explosiones	124
Capítulo V: Análisis de los efectos indirectos del sismo	127
5.1. Entorno social	127
5.1.1. Afectación por derrames	128
5.1.2. Afectación por incendios	129
5.1.3. Afectación por explosiones	134
5.2. Entorno geográfico	137
5.3. Entorno económico	139
5.3.1. Costos por interrupción de actividades	140
5.3.2. Desabastecimiento del mercado	143

Conclusiones	147
Recomendaciones	148
Referencias bibliográficas	149
Anexos	160

RESUMEN

La presente tesis titulada “Evaluación de efectos indirectos en una refinería de petróleo como consecuencia de sismo severo en Lima” desarrolla algunos escenarios que pueden presentarse en una refinería debido a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud en la ciudad de Lima.

Para estudiar el riesgo sísmico, se evalúa el peligro sísmico que depende de las características del lugar donde se encuentra la refinería. Además, se analizan las fuentes científicas que determinaron la posibilidad de un terremoto al que está expuesto el lugar donde se ubica la refinería que, según algunos autores se proyecta uno de magnitud superior a los 8 Mw.

Luego se evalúa la vulnerabilidad de la refinería, explicándose el proceso de refinación del petróleo, se reconocen las estructuras de gran tamaño involucradas en el proceso (tanques de almacenamiento, columnas de destilación, hornos, etc.), se estudian los fallos más comunes y usando metodología adecuada se calculan algunos parámetros indicadores de la capacidad resistente.

Por último, siguiendo diferentes normativas, se evalúa el alcance que pueden tener esos fallos en la misma refinería, en la población colindante, y para el mercado local que se abastece de sus productos.

ABSTRACT

This thesis entitled "Evaluation of indirect effects in an oil refinery as a consequence of a severe earthquake in Lima" develops some scenarios that may occur in an oil refinery due to the occurrence of a large earthquake in the city of Lima.

To study the seismic risk, the seismic danger that depends on the characteristics of the place where the refinery is located is evaluated. In addition, the scientific sources that determined the possibility of an earthquake, to which is exposed the place where the refinery is located are analyzed, which according to some authors, is projected to have a magnitude greater than 8 Mw.

Then the vulnerability of the refinery is evaluated, the oil refining process is explained, the large structures involved in the process are recognized (storage tanks, distillation columns, furnaces, etc.), the most common failures are studied, and using appropriate methodology, some parameters indicating the resistant capacity are calculated.

Finally, following different regulations, the scope that these failures may have in the refinery itself, in the surrounding population, and for the local market that supplies its products is evaluated

PRÓLOGO

En el Perú, es de gran importancia identificar en qué forma afectan los sismos a nuestra vida diaria. Al respecto existen diversos estudios sobre la vulnerabilidad sísmica de viviendas, hospitales, colegios, etc., pero pocos estudios se centran en los servicios que también pueden presentar problemas para su normal funcionamiento ante la ocurrencia de sismos, tales como el servicio de alcantarillado, abastecimiento de agua, energía, electricidad, telefonía, etc.

La presente tesis “Evaluación de efectos indirectos en una refinería de petróleo como consecuencias de sismo severo en Lima” sigue una metodología descriptiva, que desarrolla y analiza las formas más probables con las cuales se puede ver afectado el proceso de refinación del petróleo debido a la ocurrencia de un sismo esperado que afecte al área donde se ubica dicha refinería.

En el Capítulo I se establecen las condiciones de desarrollo del trabajo de investigación: generalidades, descripción del problema de investigación, objetivos e hipótesis.

En el Capítulo II se desarrolla el fundamento teórico de las dos variables principales, que son proceso de refinación del petróleo y los sismos.

En el Capítulo III se describe la refinería en estudio, lo cual refiere al estudio del proceso de refinación del petróleo y la identificación y descripción de las estructuras metálicas usadas para estos procesos.

En el Capítulo IV se hace el análisis del peligro sísmico, mediante el estudio del peligro sísmico y vulnerabilidad de la refinería, es decir, en base a diferentes fuentes científicas se deduce el sismo al que está expuesto la refinería y los efectos indirectos que se presentarían tras su ocurrencia.

En el Capítulo V se mencionan las afectaciones que se puede tener para con la población circundante, que extensión afectada se tendría y que efectos económicos tras la interrupción de actividades y el efecto sobre el mercado local.

Los siguientes capítulos correspondientes a las Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos completan el estudio realizado.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Refinerías del Perú.....	24
Tabla 2. Descripción de la escala Intensidad de Mercalli Modificada.....	28
Tabla 3. Descripción de la refinería.....	31
Tabla 4. Derivados obtenidos del petróleo y su uso.....	34
Tabla 5. Características principales de la Columna de Destilación Primaria.....	38
Tabla 6. Características de la Columna de Destilación al Vacío.....	39
Tabla 7. Característica de horno de Unidad de Destilación Primaria.....	40
Tabla 8. Característica del horno de la Unidad de Destilación al Vacío.....	41
Tabla 9. Inventario de tanques de almacenamiento en refinería.....	44
Tabla 10. Terremotos que afectaron plantas industriales.....	60
Tabla 11. Clasificación de estructuras en plantas petroquímicas.....	62
Tabla 12. Clasificación de sitio.....	63
Tabla 13. Clasificación del perfil de suelo.....	63
Tabla 14. Ejemplos de valores de R para estructuras específicas.....	66
Tabla 15. Coeficiente de capacidad de disipación de energía R_0 para estructuras especiales en normativa NSR-10.....	67
Tabla 16. Valores máximos del factor de modificación de respuesta R en normativa NCH236-03.....	67
Tabla 17. Causas de colapsos por origen.....	68
Tabla 18. Resumen del análisis de vulnerabilidad de tanques estudiados.....	72
Tabla 19. Factor de Importancia (I) para diferentes usos.....	77
Tabla 20. Factor de modificación de respuesta (R).....	77
Tabla 21. Reacción en la base.....	86
Tabla 22. Valores de reacción para pernos.....	88
Tabla 23. Cargas actuantes en estructura horno.....	93
Tabla 24. Distancias mínimas para tanques.....	100
Tabla 25. Matriz GOFA de refinería.....	111

Tabla 26. Mínimo espaciamiento entre tanques.....	114
Tabla 27. Clasificación de los productos almacenados en la refinería.	117
Tabla 28. Nivel de radiación y sus consecuencias.	119
Tabla 29. Presión de vapor saturado del agua en función de la temperatura.	120
Tabla 30. Cálculo del factor F.....	121
Tabla 31. Valores de Fh para incendio cilíndrico.....	122
Tabla 32. Valores de Fv para incendio cilíndrico.	122
Tabla 33. Valores de Fh para incendio rectangular.	123
Tabla 34. Valores de Fv para incendio rectangular.	123
Tabla 35. Intensidad media de radiación de la superficie de llama.	124
Tabla 36. Irradiación máxima tolerable.....	126
Tabla 37. Datos del lugar y del combustible del tanque N°68.....	131
Tabla 38. Valores de radiación (Ir) para diferentes distancias (c).	132
Tabla 39. Datos iniciales para cálculo de la irradiación.	135
Tabla 40. Irradiación sentida (Ir) para diferentes distancias (c).	136
Tabla 41. Producción de refinería.....	141
Tabla 42. Ingresos por venta de productos en refinería.	142

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perforación de pozo de petróleo en la selva del Perú.	21
Figura 2. Bombeo mecánico de petróleo.	22
Figura 3. Esquema del Oleoducto Norperuano.	22
Figura 4. Diagrama del proceso típico de refinación del petróleo.	23
Figura 5. Diagrama de los flujos físicos de los hidrocarburos en el Perú.	24
Figura 6. Tipo de ondas internas.	25
Figura 7. Tipos de ondas superficiales.	26
Figura 8. Comparación de magnitud de algunos terremotos.	27
Figura 9. Principales placas tectónicas de la Tierra.	29
Figura 10. Interacción entre placas tectónicas.	29
Figura 11. Interacción placas de Nazca y Sudamericana.	30
Figura 12. Esquema de las unidades para refinación de crudo.	32
Figura 13. Vista panorámica de las unidades en la refinería.	33
Figura 14. Diagrama de procesos de refinación del crudo.	33
Figura 15. Estructuras edificios en la refinería.	35
Figura 16. Estructuras que se comportan como edificios.	36
Figura 17. Estructuras no edificios no similar a edificaciones.	36
Figura 18. Componentes no estructurales: equipos eléctricos.	37
Figura 19. Columna de Destilación Primaria.	38
Figura 20. Columna de Destilación al Vacío.	39
Figura 21. Horno de la Unidad de Destilación Primaria.	40
Figura 22. Horno de Unidad de Destilación Primaria.	41
Figura 23. Tanque de almacenamiento.	42
Figura 24. Acumuladores de tope.	45
Figura 25. Filtros de deshidratación.	45
Figura 26. Bombas en el proceso de refinación.	46
Figura 27. Líneas de conducción de crudo y derivados.	46

Figura 28. Ubicación del distrito de Lurín.....	47
Figura 29. Vista de la topografía de la refinería.	48
Figura 30. Mapa climático del Perú.	49
Figura 31. Mapa de microzonificación sísmica-geotécnica para Lima y Callao.	51
Figura 32. Microzonificación sísmica de Lurín.	53
Figura 33. Máximas aceleraciones esperadas en Lurín.	54
Figura 34. Mapa sísmico del Perú.....	55
Figura 35. Mapa de periodos de retorno para las asperezas identificadas.....	57
Figura 36. Mapa de acoplamiento sísmico para la zona de subducción del Perú.....	58
Figura 37. Daños en Refinería Tupras (Turquía).	60
Figura 38. Espectro de respuesta ASCE 7-16 para el lugar de estudio.	64
Figura 39. Espectro de respuesta E.030 para el lugar en estudio.	65
Figura 40. Tanque apoyado sobre el suelo en refinería.	68
Figura 41: Tipos de pandeo elasto plásticos.....	69
Figura 42. Colapso de techo flotante en tanques en terremoto Tokachi Oki (2003).	70
Figura 43. Deslizamiento de tanques por fuerza sísmica.	71
Figura 44. Fallas de tanques por asentamiento, terremoto Kobe 1995.....	71
Figura 45. Volcamiento de tanque en refinería RECOPE, Costa Rica, 1991.....	72
Figura 46. Tanques de mayor capacidad en refinería.....	73
Figura 47. Componentes convectivo e impulsivo en movimiento de tanques.	74
Figura 48. Coeficiente C_i	75
Figura 49. Modelo numérico del tanque en estudio.	80
Figura 50. Esfuerzos de compresión en pared lateral de tanque N°69.	81
Figura 51. Falla en pernos de anclaje.	82
Figura 52. Falla de torres en terremoto de Tupras.....	82
Figura 53. Configuración estructural de la Torre de Destilación Primaria	83
Figura 54. Detalles base de Columna de Destilación Primaria	83
Figura 55. Simbolización simplificada de la torre de destilación.....	84
Figura 56. Modelo en elementos finitos de la Torre de Destilación.	86

Figura 57. Modelación de pernos como elementos resortes.....	87
Figura 58. Esfuerzo de compresión en base.	89
Figura 59. Fallas en bases de hornos, refinería ENAP Chile, terremoto de 2010.	90
Figura 60. Falla de horno en refinería Tupras.....	90
Figura 61. Detalle de refuerzo en columna base de horno.	91
Figura 62. Simplificación de estructura	91
Figura 63. Vista de estructura de hornos de refinería en estudio.....	92
Figura 64. Sección columna base de hornos.	94
Figura 65. Simplificación de respuestas en el horno.	94
Figura 66. Diagrama de interacción de columna base de horno.....	95
Figura 67. Zonas estancas típicas.....	96
Figura 68. Detalle de fallo de muro estanco de un tanque.	96
Figura 69. Esquema en elevación de zona estanca.	97
Figura 70. Detalle en planta de zona estanca en refinería.	97
Figura 71. Detalles de zonas estancas en tanques de refinería.....	97
Figura 72. Sección típica dique zona estanca.	98
Figura 73. Zona estanca de tanques.	99
Figura 74. Distancia mínima entre tanque y muro de contención de zona estanca.	100
Figura 75. Tubería segmentada.	101
Figura 76. Fallas de líneas de conducción continuas en refinería Izmit.	102
Figura 77. Falla de tubería continua, refinería Tupras.....	102
Figura 78. Fuga de combustible por falla, refinería en Estados Unidos.	102
Figura 79. Fallo por flotabilidad en tuberías.....	103
Figura 80. Caso de falla normal.	103
Figura 81. Caso de falla lateral.....	104
Figura 82. Deslizamientos paralelos de tuberías.....	104
Figura 83. Deslizamiento perpendicular de tuberías.....	104
Figura 84. Deslizamiento oblicuo de tuberías.	105
Figura 85. Soporte estructural para tuberías.	105

Figura 86. Parte de red de tuberías en la conexión bombas y tanques.	106
Figura 87. Manchas de hidrocarburos en unión de tuberías con tanques.....	106
Figura 88. Fugas por fallo en base de tuberías.....	107
Figura 89. Goteo de hidrocarburos en unión de válvulas y tuberías.....	107
Figura 90. Fuga de hidrocarburos en válvula de tanque 74.	107
Figura 91. Manchas de hidrocarburos en zona de rack de tuberías.....	108
Figura 92. Colapso de redes eléctricas tras el terremoto, refinería Tupras.	108
Figura 93. Daño en casetas de bombeos en terremotos de Turquía, 1999.	109
Figura 94. Estaciones de venta de combustibles.....	109
Figura 95. Derrame de crudo debido a tsunami en tanque dañado, refinería Sendai ..	111
Figura 96. Distribución de los tanques N°68 y N°69.....	112
Figura 97. Zonas estancas de tanques.....	112
Figura 98. Caso de derrame por rebose.	113
Figura 99. Derrame por rebose por chapoteo de fluido.....	113
Figura 100. Distancias de separación en tanques más cercanos en refinería.	115
Figura 101. Corrosión en hornos.	116
Figura 102. Incendio de tanques dañados por terremoto, refinería Izmit (1999).	116
Figura 103. Zonas clasificadas en un incendio.....	119
Figura 104. Expansión explosiva BLEVE en tanque.....	125
Figura 105. Poblaciones circundantes a la refinería.....	127
Figura 106. Plano Catastral de Villa el Salvador.	128
Figura 107. Sentido de derrame en caso de colapso de tanques.....	129
Figura 108. Distancias horizontales desde tanques hasta poblaciones.	130
Figura 109. Tanque N°68 y su zona estanca.	131
Figura 110. Afectación de la radiación por incendio del tanque N°68.....	133
Figura 111. Cercanía tanques – vivienda.....	133
Figura 112. Alcance de la radiación de incendios.....	134
Figura 113. Alcance por irradiación producto de una Bleve.	136
Figura 114. Áreas afectadas por derrames.....	137

Figura 115. Zonas de peligros por radiación.....	138
Figura 116. Efectos de Irradiación.	139
Figura 117. Vulnerabilidad de las áreas económicas de mayor interés por.....	140
Figura 118. Cantidad de Estaciones de servicio por departamento.....	144
Figura 119. Producción de combustibles, según refinerías, 2021.	144
Figura 120. Producción por refinerías, 2021.	145
Figura 121. Recursos esenciales vulnerables del abastecimiento de energía.....	146

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

API	American Petroleum Institute.
ASCE	American Society of Civil Engineers.
Bls	Barriles.
CISMID	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
DGH	Dirección General de Hidrocarburos.
ECHO	Dirección General de Protección Civil y Ayuda Humanitaria de la Unión Europea.
GSEDPF	Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities.
IFO	Marine fuel oil (diesel marino).
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil.
IPC	Internation Petroleum Company.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
MBD	Miles de barriles diarios.
MGO	Marine gas oil.
MM	Escala sísmológica de Mercalli Modificada.
MMBPD	Millones de barriles de petróleo por día.
MMMBS	Miles de millones de Barriles.
Mw	Magnitud de Momento.
NFPA	National Fire Protection Association.
NTP	Nota Técnica de Prevención.
Osinergmin	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
Petroperú	Petróleos del Perú.
PLAM	Plan Metropolitano de Desarrollo Urbano de Lima y Callao.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El Perú es un país ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde ocurre más del 90% de sismos que afectan al planeta. Frente a sus costas ocurre la subducción de la placa de Nazca sobre la Sudamericana se genera liberación de energía manifestándose en movimientos sísmicos frecuentes. Esto ocasiona pérdidas humanas y materiales que se han ido reportando desde tiempos históricos.

En específico, la ciudad de Lima no experimenta un movimiento sísmico de gran magnitud desde hace más de 200 años, por lo que se espera uno de grado superior a los 8 Mw (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2017). Además, en Lima se concentra el 60% del PBI industrial nacional (Sociedad Nacional de Industrias [SNI], 2021). Dentro de este contexto, cabe preguntar cómo se han tomado las previsiones para minimizar los daños a las instalaciones industriales, que son centros productivos de suma importancia económica.

En la actualidad no se cuenta con normativa local específica multidisciplinaria que determine de qué maneras dichas instalaciones industriales se puede diseñar o evaluar ante la acción movimientos sísmicos importante, como por ejemplo, a nivel de Sudamérica se tiene la norma chilena NCH2369: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Crear una normativa de las mismas características permitirá clasificar el peligro sísmica de estas estructuras en función de su ubicación, tipos de procesos e importancia para evitar desabastecimientos futuros del país.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el Perú existen 7 refinerías donde se procesa petróleo y se obtienen sus derivados. De ellas, 3 (En Callao, Lima y Piura) se ubican en la costa que corresponde a la zona sísmica 4 según la normativa NTP E.030 (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO], 2018), lo cual representa un riesgo por la alta actividad sísmica a las que pueden estar sometidas.

Se tiene, por ejemplo, el caso de la refinería Iquitos, localizado en la región Loreto; el 26 de junio de 2019, un sismo de 7.5 Mw afectó sus instalaciones y según informes de Petroperú (2019), se reveló que se tuvo que suspender el bombeo del tramo 1 del Oleoducto Norperuano tras haberse detectado algunos daños en la infraestructura de la estación, esto como medida preventiva y hacer las evaluaciones pertinentes. Así mismo

en la refinería Talara, el mismo sismo produjo una fuga en una tubería del muelle, que fue controlada con ayuda de la Capitanía de Puerto. Se informó también que en las refinerías Conchán (Lima) y El Milagro (Amazonas), así como en sus plantas de ventas, no se reportaron daños, manteniendo sus operaciones con normalidad.

A decir de la Sociedad Peruana de Hidrocarburos (SPH, 2019), el sector hidrocarburos es importante para el desarrollo del Perú, no solo porque de todas las fuentes de energía que consumimos los peruanos, los hidrocarburos representan el 64%; sino también porque cada vez es más importante su aporte al Producto Bruto Interno (PBI) ubicándose por encima del sector eléctrico, saneamiento y pesca. En el año 2019 tuvo su máximo aporte al PBI con el 4%.

De lo mencionado anteriormente, se entiende que existe la necesidad de hacer un análisis de peligros indirectos ocasionados por sismos (peligro principal), tales como: fugas, derrames, incendios, explosiones, etc. que se produzcan en la refinería en estudio y que pueden afectar a la población colindante y sobre todo interrumpir el normal abastecimiento del mercado local. Por tal motivo se propone estudiar una refinería de Lima y su entorno geográfico, social y económico.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Analizar los efectos indirectos tales como derrames, incendios, explosiones, etc. que se produzcan en una refinería de Lima tras la ocurrencia de un movimiento sísmico esperado de gran magnitud.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Realizar estudio de vulnerabilidad física de la refinería.
- b) Determinar el alcance espacial de las zonas afectadas.
- c) Determinar la cantidad de población afectada.
- d) Estimar el impacto económico por la interrupción del abastecimiento al mercado local.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

Realizar un análisis de los peligros indirectos producidos por terremotos que puede ocurrir en la refinería en estudio tendrá un impacto sensibilizador e informativo para la sociedad involucrada y preventivo para las autoridades locales.

1.4.2 Hipótesis específicas

- a) El estudio de vulnerabilidad física de la refinería permitirá estimar la capacidad de las estructuras ante la demanda sísmica esperada.
- b) Determinar la extensión geográfica afectada nos permitirá tener una referencia de los daños materiales, viviendas, etc.
- c) Estimar la cantidad de personas que se vería afectada de manera directa permitirá realizar planes de prevención.
- d) Identificar las consecuencias del desabastecimiento por accidentes en la refinería ayuda a crear planes alternativos para abastecer a la ciudad.

CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES

2.1. El petróleo

2.1.1. Definición

El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos, resultado de muchos años de descomposición orgánica en el subsuelo. La materia orgánica (restos de plantas, animales y materia viva en general) se transforma debido a las condiciones de presión y temperatura originados por el peso de los estratos que lo contienen. Los estados en los que se encuentran los hidrocarburos son líquido, sólido y gaseoso, de acuerdo a las condiciones en la que se forman.

La palabra petróleo proviene del latín *petroleum*, que es la combinación de *petro* (piedra) y *óleum* (aceite) que le da el significado de aceite de piedra. Se le dio ese nombre en el antiguo medio oriente ya que se usaban brotes de los esquistos rocosos impregnados. La palabra petróleo se testimonia por primera vez en el idioma castellano en una crónica al final del siglo XIII en unas escrituras llamadas Gran Conquista de Ultramar y que describía el uso de este fluido en los viajes marinos (Junta de Castilla y León, 2022).

El proceso de formación del petróleo es:

- **Diagénesis:** comienza con la reorganización de las células de la materia orgánica por acción de las bacterias del aire y agua que la transforman en querógeno.
- **Catagénesis:** ocurre la transformación del querógeno en los hidrocarburos en estado líquido y gaseoso por acción de las condiciones de presión y temperatura.
- **Metagénesis:** se rompen los hidrocarburos en cadenas más cortas y livianas, por lo que se produce abundante material gaseoso, ocurre entre los 150°C y 200°C.

2.1.2. Historia del Petróleo en el Perú

El petróleo en el Perú tiene uso desde hace más de 1000 años. Según historiadores, se tiene evidencia de su uso desde las épocas prehispánicas, cuando las culturas usaban materiales como la brea para producir fuego, para impermeabilizar instrumentos de guerra, repelentes, preservación de momias y para el alumbrado de ceremonias, entre otros.

A decir de Carreño (2008), quien refiere que en el Valle del Chira se encontraron restos de huacos de la cultura Tallán (ocuparon Piura y Tumbes entre los años 500 y 1470)

que fueron impermeabilizados con brea y que en los años posteriores a 1700, los españoles comenzaron con la masificación del uso de las navíos y embarcaciones usadas para viajar a Europa, por lo que usaban brea para impermeabilizar y aparejar las naves.

En 1826, Antonio de la Quintana recibió las minas de brea llamada Cerro Cruz, como recompensa por la ayuda de sus padres a la guerra de la independencia. Este personaje las vende a José de la Quintana y a su muerte, su hija Doña Josefa la denomina La Brea y la llega a unir a otra hacienda llamada Pariñas. De allí, a la muerte de Josefa, nace la hacienda La Brea y Pariñas. Posteriormente pasa por varios propietarios como Juan Helguero e hijos, hasta que, en 1863, el empresario estadounidense E.P. Larkin, arrienda la hacienda y forma la primera compañía peruana de petróleo e inicia de esta manera la historia de la industria petrolera (Municipalidad Provincial de Talara, 2017).

Ese mismo año se realizó la primera perforación en América del Sur de un pozo en busca de petróleo. Ocurrió en el yacimiento de Zorritos en Tumbes. Esta empresa duró hasta 1869, año en que E.P. Larkin decide irse del país después de algunas incursiones fracasadas.

En 1871 se constituye la Compañía Peruana de Refinación de Petróleo, empresa dedicada a la producción de kerosene en Tumbes, siendo después trasladada al distrito de Zorritos. Nueve años después se forma Sudamérica Petróleo, empresa dedicada a la explotación de petróleo en la zona de Lobitos, llegándose a perforar varios pozos petroleros, la mayoría en el distrito Punta Lobitos.

Desde el año 1891 comenzaron a crearse varias empresas dedicadas a la explotación del petróleo, operando la mayoría en el norte costero del Perú. Muchas de estas empresas eran de capitales norteamericanos, ya que durante esa época se vivió la fiebre del petróleo, lo que atraía la migración de empresarios estadounidenses. De todas estas empresas formadas, destacaron algunas como London Pacific, Petróleo de Zorritos, Imperial Oil, entre otras.

En 1913 la multinacional Standar Oil de New Jersey llega a Perú y adquiere a London Pacific, llamándola Internacional Petroleum Company (IPC). He aquí el inicio de una controversia, ya que no se sabía ni tenía registro de cuanta área era explotada por la London Pacific. Según denuncia de Ricardo Deustua, la IPC explotaba 41 614 pertenencias y no las 10 que registraba (10 pertenencias = 1644 km²). Dicha diferencia generó disputas entre el estado peruano, la prensa y la empresa. Después de varios cálculos y estudios

hecho por ingenieros como Héctor Bozo y Alberto Jochamowitz se confirmaron las estimaciones de Deustua, por lo que a la negativa de la IPC, se tuvo que ir a un laudo arbitral que fue adverso al Perú.

En 1916 comienza la construcción y operación de la refinería Talara, la primera del país, que comienza operaciones con la refinación de 10 000 barriles de petróleo por día (BPD). Hasta 1922 no se tenía una normativa clara para el procesamiento, control y negocios del petróleo, por lo que se promulga la Ley N°5542 que norma todo el ámbito del negocio del petróleo. En 1924, la empresa International Petroleum Company adquiere la propiedad de la hacienda La Brea y Pariñas, con lo que paso a ser la empresa más grande en el país (Refinería Talara, 2019).

En 1939 se forma la primera empresa petrolera estatal: Yacimientos Petroleros Fiscales en los campos de Zorritos, posteriormente llamada Petroperú. En 1948, por ley N°10410 se crea la Facultad de Ingeniería de Petróleo en la Escuela Nacional de Ingenieros, como una respuesta a la creciente industria del petróleo y necesidad de formación de profesionales peruanos.

Recién en la década de los sesenta se alcanza el auge en la explotación de los hidrocarburos, destacando una empresa en especial: la International Petroleum Company, la cual explotaba la mayoría de las cuencas del norte peruano, pero pagaba impuestos por pocas extensiones. En 1969, el gobierno del presidente Juan Velasco Alvarado, debido a los problemas suscitados por la página 11 decide expropiar los campos de la International Petroleum Company y las entregó a la estatal Petroperú.

En el año 1983, la empresa multinacional Shell, luego de realizar algunas actividades exploratorias buscando petróleo, encontró un importante yacimiento de gas natural en el departamento de Cusco, específicamente en la zona conocida como Camisea (lote 88). Lamentablemente, luego de varios problemas económicos, la empresa no pudo concluir con el proyecto y se retiró del país en 1998, siendo finalmente reactivada en el año 2000 por el consorcio Camisea para la explotación del gas natural (Rios, 2012).

En 1993 con la aprobación de la Constitución Política durante el gobierno de Alberto Fujimori, se aprobó la Ley Orgánica de Hidrocarburos (LOH) que creó Perupetro y privatiza la mayoría de los bienes de Petroperú. Dicha ley regula los modelos de contratos de exploración, explotación y regula las acciones en las que el estado puede intervenir.

2.1.3. Fases de la industria del petróleo

Para transformar el petróleo en sus diferentes derivados, la industria de los hidrocarburos tiene algunas etapas bien definidas, tales como:

2.1.3.1. Exploración

Esta etapa consiste en la búsqueda, cuantificación y confirmación de reservas de hidrocarburos. Dichas reservas de petróleo se encuentran varios kilómetros debajo de la superficie terrestre por lo que debe hacerse ciertos estudios para delimitar el área de exploración.

- Exploración geológica: Consiste en examinar y estudiar las rocas que conforman la superficie terrestre y los estratos interiores para encontrar cualidades que sean favorables para el depósito de petróleo. En esta etapa se busca encontrar la “roca madre” que es aquel estrato formado de arcillas que hacen que el flujo de petróleo se detenga y almacene de manera natural. Las propiedades más estudiadas de las rocas son: dureza, porosidad, permeabilidad, saturación de fluidos, etc.
- Exploración geofísica: Estos métodos buscan determinar los cambios físicos en las rocas, tales como elasticidad, magnetismo y densidad. Estas propiedades cambian con la profundidad del subsuelo y con la presencia de fluidos como el petróleo.
- Exploración gravimétrica: La gravimetría permite detectar el cambio de la atracción de la gravedad de las rocas. Esta variación puede suministrar evidencia de la presencia de estructuras geológicas que en determinadas condiciones de presión y temperatura contiene fluidos como el petróleo.
- Exploración sísmica: Este método busca medir la variación de la velocidad de las ondas que se generan sobre determinados estratos del subsuelo. Se usan sismógrafos y geófonos para la medición de las ondas. Si las ondas son más rápidas, indican que son estratos más consolidados, por lo que pueden almacenar fluidos.
- Exploración por perforación: Este es el único método para saber si de verdad existe petróleo en determinada zona. Se realiza después de haber agotado todas las anteriores, ya que es de elevado costo. Para la perforación de un pozo se usan estructuras metálicas llamadas comúnmente torres de perforación. El geólogo acompaña este proceso y determina hasta donde se debe perforar. Si se encuentra petróleo, se procede con la completación y posterior producción, sino simplemente se abandona el pozo.

2.1.3.2. Perforación

La perforación se realiza después de haber realizado todas las exploraciones posibles, solo perforando pozos se puede saber al 100% si realmente existe petróleo en la zona de estudio. Se suele denominar pozo exploratorio al primer pozo perforado, a los siguientes se les llama pozo de producción. Se usa una torre metálica para elevar la tubería que insertará la broca hacia el estrato objetivo; para evitar peligros por la inestabilidad del suelo, conforme se hace más profundo el avance, se circula un fluido llamado lodo de perforación, que es una mezcla de aditivos como baritina, bentonita, etc.

Mientras se perfora un pozo, se procede con la completación, que implica colocar forros metálicos tubulares para evitar desmoronamientos a lo largo del subsuelo y facilitar la inserción de tuberías para mejorar la producción. Según el Balance Nacional de Energía del Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2020) el pozo más profundo perforado en el Perú tiene 19 000 pies (5800 m), perforado en el Lote 64 en el departamento de Cuzco.



Figura 1. Perforación de pozo de petróleo en la selva del Perú.

Fuente: Petróleos del Perú (Petroperú), 2018.

2.1.3.3. Producción

En esta etapa se retira el petróleo del fondo de pozo que puede subir de manera natural a superficie por que el pozo tiene suficiente presión o se pueden usar técnicas para hacer que el petróleo suba de manera artificial. En la Figura 2 se puede observar una forma de producción muy usada en el Perú llamada bombeo mecánico, se recurre a esto porque la mayoría de los pozos en el Perú pierden presión a los pocos años de iniciar la producción (fenómeno conocido como depletación).

metálica vertical que separa al petróleo en sus derivados de acuerdo con sus temperaturas de ebullición. Este proceso es continuo, es decir que nunca se detiene el ingreso petróleo, debido al propio requerimiento del mercado que se abastece.

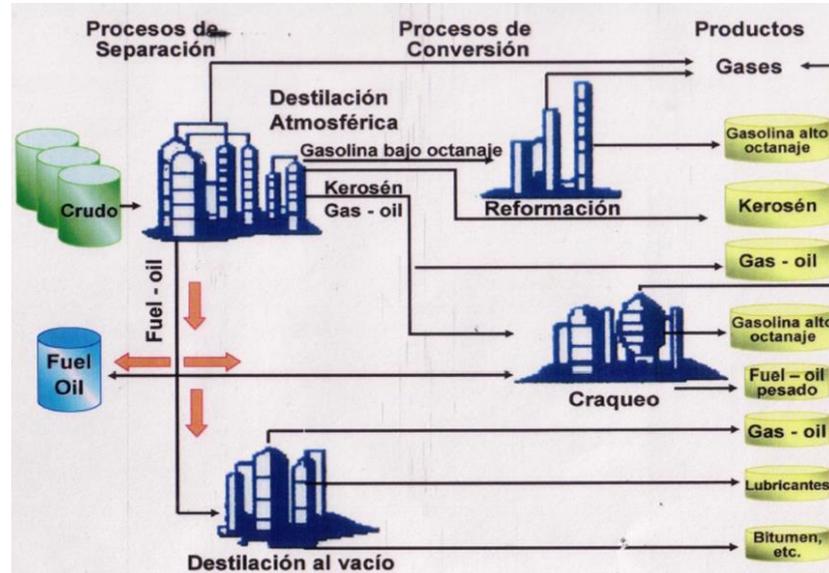


Figura 4. Diagrama del proceso típico de refinación del petróleo.

Fuente: Petroperú, 2018.

Los procesos en una refinería varían en función del tipo de crudo que transforman, del tipo de producto obtenido y de la tecnología disponible, siendo las más comunes:

- Destilación primaria
- Destilación al vacío
- Craqueo térmico
- Craqueo catalítico
- Reformación térmica
- Reformación catalítica
- Polimerización
- Alquilación
- Isomerización

En el Perú existen 7 refinерías de petróleo, que se detallan en la Tabla 1:

Nombre	Ubicación	Capacidad de Almacenamiento (barriles)
La Pampilla	Callao, Callao	117 000
Talara	Talara, Piura.	65 000
Conchán	Lima, Lima	15 500
Iquitos	Maynas, Loreto	12 000
Pucallpa	Portillo, Ucayali	3 300
Shiviyacu	Loreto, Loreto	2 000
El milagro	Utcubamba, Amazonas	1 900
Total:		216 700

Tabla 1. Refinerías del Perú.

Fuente: Osinergmin, 2019.

Cada refinería procesa el petróleo procedente de diferentes cuencas petrolíferas. En la Tabla 5 se puede apreciar el origen y destino del crudo procesado por las refinerías y plantas del Perú.

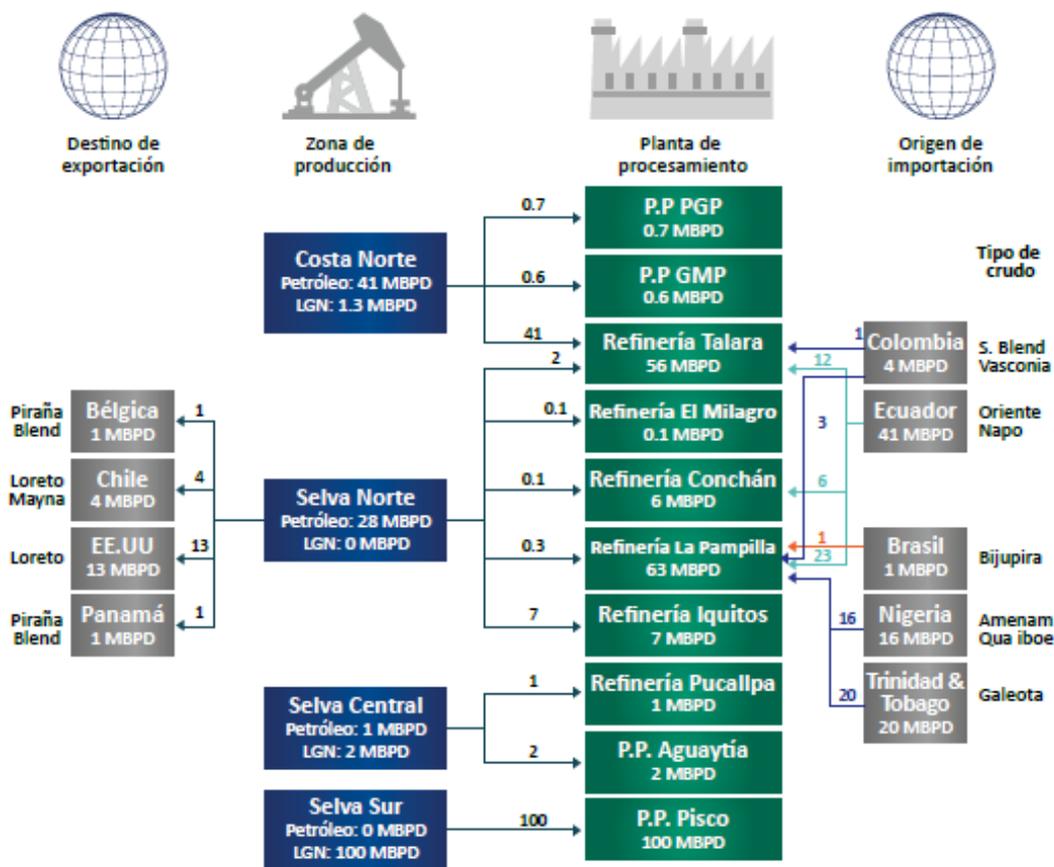


Figura 5. Diagrama de los flujos físicos de los hidrocarburos en el Perú.

Fuente: Osinergmin, 2019.

2.2. Movimientos sísmicos

2.2.1. Definición

Son movimientos bruscos en un determinado intervalo de tiempo de la corteza terrestre producto de liberación de energía debido a desplazamiento de material en el interior de la Tierra. La palabra sismo proviene del griego $\sigma\epsilon\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma$ que significa temblor, mientras que la palabra terremoto proviene del latín terra (tierra) y moto (movimiento), de donde se entiende que ambos términos aluden al mismo fenómeno (Etimologia.com, 2019).

Los sismos se pueden clasificar por su origen, siendo los más comunes los del tipo tectónicos que son aquellos originados por la fricción del movimiento de placas tectónicas. Desde tiempos antiguos se ha estudiado a los sismos como una manera de entender que ocurre en el interior de la Tierra. La ciencia que estudia a los sismos se le llama Sismología.

La propagación de ondas sísmicas se realiza en diferentes trayectorias y maneras, las que permite distinguir una de otras. Algunos tipos de ondas relacionadas a los sismos son:

- a) Ondas internas: Son las que se propagan en el interior de la tierra atravesando el manto y el núcleo, se mueven por medios elásticos homogéneos e isótropos, está constituido por: (i) Ondas P: también conocidas como ondas longitudinales, son las primeras que se pueden reconocer en los sismógrafos ya que tienen alta velocidad de desplazamiento debido a que se transportan por cualquier medio. Su efecto es la generación de esfuerzos dilatacionales y compresionales; y (ii) Ondas S: también llamadas ondas de corte o transversales, son de inferior velocidad en comparación a las ondas P, por lo que aparecerá registrados en los sismógrafos después de ésta. Se propaga en medios sólidos.

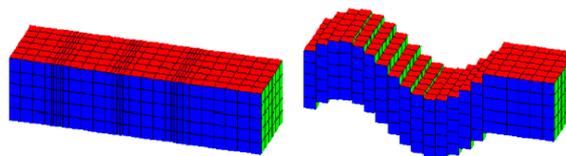


Figura 6. Tipo de ondas internas.

Nota: Ondas P (izquierda) y ondas S (derecha).

Fuente: Universidad da Coruña (UdC), 2007.

- b) Ondas superficiales: Son las ondas que durante su desplazamiento se confinan en alguna superficie o capa, representan la mayor energía observable en los sismogramas, está formada por: (i) Ondas Love: llamada así en reconocimiento de Augustu E. Hough Love, físico quien las estudió. Sus partículas se mueven de forma perpendicular a la dirección de propagación, son de menor velocidad que las ondas internas; y (ii) Ondas Rayleigh: Se forman a partir de las de la interacción de las ondas S y P, pero viajan a menor velocidad que estas. Son diez veces más rápidas que la velocidad del sonido.

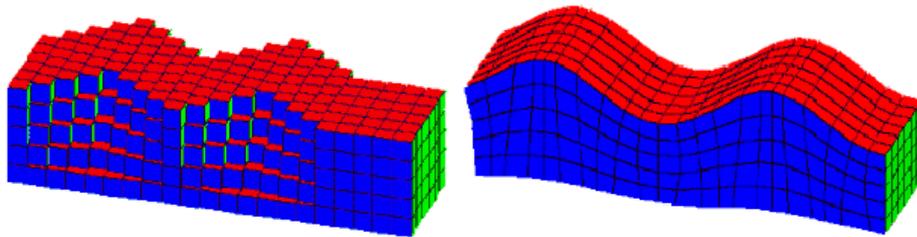


Figura 7. Tipos de ondas superficiales.

Nota: Ondas Love (izquierda) y ondas Rayleigh (derecha).

Fuente: Universidad da Coruña (UdC), 2007.

2.2.2. Parámetros de un sismo

Para caracterizar a los sismos se usa información basada en ubicación, tipos y formas de ondas que se registran en las estaciones sísmicas. Los parámetros básicos que definen a un sismo son:

- Foco sísmico: es el punto dentro de la superficie terrestre desde donde comienza la liberación de energía y liberación de energía.
- Hora origen: indica la hora de ocurrencia del sismo, que es el momento en que las ondas comienzan a desplazarse saliendo del foco.
- Epicentro: es un punto de proyección vertical desde el foco hacia la superficie de la Tierra, se usan las coordenadas geográficas (longitud y latitud) para su localización.
- Magnitud: existen diversas metodologías para determinar la magnitud de un sismo, pero todas miden de manera cuantitativa la energía liberada en el foco del sismo.

Algunas formas de medirla son:

- Magnitud Momento (M_w), es una escala logarítmica desarrollada por Kanamori, se define la magnitud espectral basada en el momento sísmico (parámetro que relaciona la rigidez del medio donde se producen, el área de dislocación y el

desplazamiento medio de dicha área) y basado en la medición de la energía total que se libera en un sismo. Es una de las más usadas para medir terremotos.

- Escala Sismológica de Richter (ML): es también conocida como magnitud local, se nombró en honor al sismólogo Francis Richter. La magnitud se obtiene a partir de un tipo de onda superficial a la que se aplica una escala logarítmica, de modo que cada magnitud es 32 veces superior a la precedente.

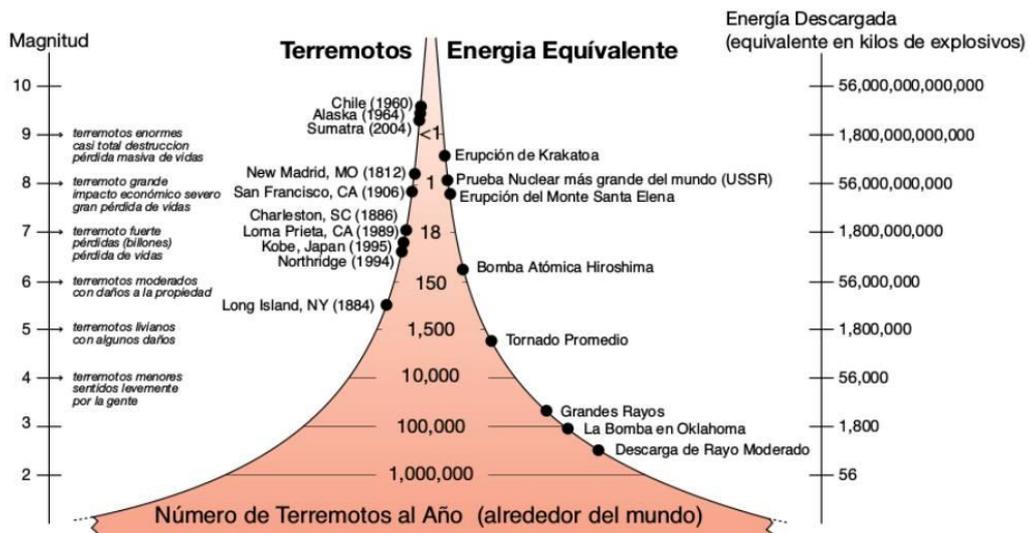


Figura 8. Comparación de magnitud de algunos terremotos.

Fuente: Geología de Segovia, 2021.

- e) Intensidad: Se define como la sensación de un sismo y se mide por los efectos destructivos que causa sobre las estructuras, sobre las personas y la naturaleza; debido a lo anterior, es una medida relativa o subjetiva.

Las primeras escalas en usarse fueron producto del trabajo de S. de Rossi y F. Forel en Italia, que en el año 1883 propusieron una escala dividida del I al X. Posteriormente se modificó en 1902, en una adaptación realizada por G. Mercalli y Cantani, quienes la ampliaron del I al XII, de esta manera se sentó la base para usarse hasta la actualidad. En América Latina se prefiere usar la escala de Mercalli Modificada (Tabla 2), propuesta por F. Newmann y H. Wood en 1931. Existen varias adaptaciones de acuerdo con el lugar que se desea describir.

Grados	Descripción
I	No se siente, excepto por algunos en circunstancias especiales y favorables. Se observa únicamente por medio de instrumentos sísmicos
II	Se nota únicamente por pocas personas en condiciones de quietud absoluta, especialmente en los pisos altos de edificios o en localidades muy sensibles. Objetos suspendidos oscilan ligeramente.
III	Sentido por muchas personas, principalmente en los pisos altos de los edificios, pero muchas personas no lo reconocen hasta haber encontrado que otras personas también sintieron en diferentes localidades el mismo fenómeno. Se sienten vibraciones semejantes al paso de un camión. La duración puede ser estimada.
IV	Generalmente observado por muchas personas en el interior de los edificios. Sin embargo, por algunas personas en la superficie del suelo. No causa pánico. Causa vibraciones de los muebles. Vajillas, ventanas, puertas producen sonidos, así como los muros. Oscilaciones leves en objetos suspendidos. Sensación como que un camión pesado golpeo contra el edificio. Automóviles oscilan en forma notable.
V	Observado generalmente por todas las personas. Muchas se despiertan causando pánico en algunas de ellas, pero no causa pánico en las personas al nivel del suelo. Algunas ventanas se rompen. En algunos casos grietas en los recubrimientos. Objetos mal colocados se voltean o se desplazan. Se notan perturbaciones en árboles, postes u otros objetos altos.
VI	Sentido por todos en edificios y con pánico de escapar al exterior. Los muebles se desplazan o se voltean. Se caen objetos en las casas, así como recubrimientos en los muros. Daños ligeros en edificios no muy sólidos. En general los daños no son muy importantes.
VII	Observado con pánico y deseo de todos de abandonar los edificios. Difícil de mantenerse parado. Daño ligero en edificios con buen diseño y construcción que contengan estructuras comunes, pero bien construidas. Daños considerables en edificios mal construidos con estructuras mal diseñadas. Notado por todas las personas que conducen vehículos. Deslizamientos pequeños. En general el daño en los edificios no es muy grande.
VIII	Observado con gran pánico. Ruina parcial de edificios y gran daño en otros. Generalmente sin víctimas, excepto en casos muy especiales. Daños ligeros en edificios bien diseñados con estructuras especialmente diseñadas para sismos. Daños considerables y colapso parcial o total en estructuras mal diseñadas. Caída de tanques elevados, monumentos, columnas o muros solos. Arena y limos expulsados en pequeñas cantidades.
IX	Pánico general. Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas. Estructuras bien diseñadas se inclinan por daños en cimentación. Puede existir colapso parcial. Los edificios pueden ser desplazados de su cimentación. La tierra se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen. Deslizamientos en taludes. Desplazamiento de vías férreas y caminos. Comunicaciones suspendidas. Puentes dañados.
X	Ruina de muchos edificios y puentes con el saldo de muchas víctimas. Grandes grietas en la tierra y deslizamientos en las montañas. Edificios destruidos incluyendo sus cimentaciones. Vías de comunicación fuertemente dañadas. Suspensión de comunicaciones. Movimiento de las orillas de los ríos. Aparecen manantiales y cráteres de arena. Inundaciones, etc.
XI	Una que otra estructura de mampostería muy resistente puede quedar en pie. Los puentes destruidos. Grandes grietas en el suelo. Servicios de comunicaciones rotos y suspendidos. Movimiento de la corteza terrestre. Deslizamientos en suelos blandos.
XII	Destrucción total. Ondas sísmicas visibles. Los objetos son expulsados al aire.

Tabla 2. Descripción de la escala Intensidad de Mercalli Modificada.

Fuente: Zamudio, 2003.

2.2.3. Origen de los sismos

La principal razón del origen de los sismos es la interacción de las placas tectónicas, que se definen como fragmentos de litosfera que se deslizan sobre la astenósfera. Existen 15 grandes placas (Figura 9) y varios de pequeño tamaño; el encuentro de estas placas genera zonas de subducción (una placa se introduce dentro de otra, generando fricción y destrucción de bordes) o abducción (las placas se separan y emerge material magmático, generando nuevas cordilleras) tal como se aprecia en la Figura 10.

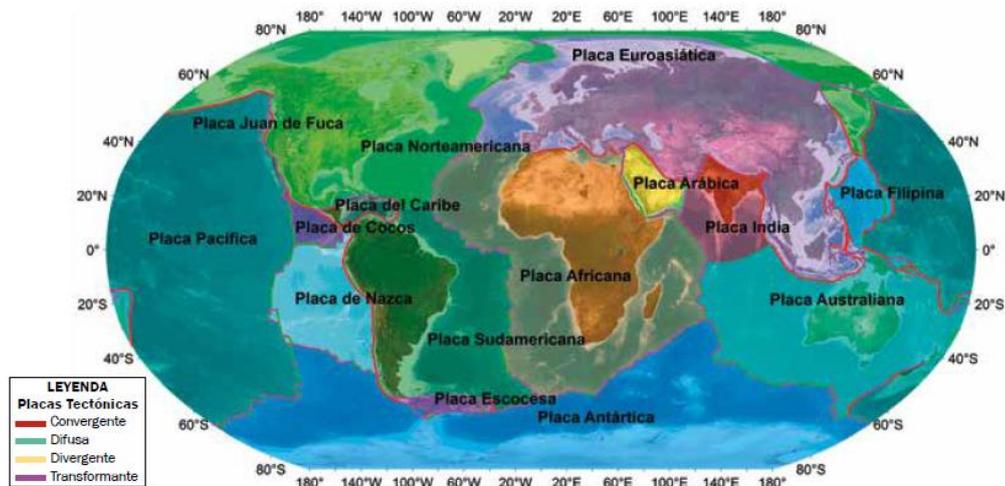


Figura 9. Principales placas tectónicas de la Tierra.

Fuente: U.S. Geological Survey (USGS), 2022.

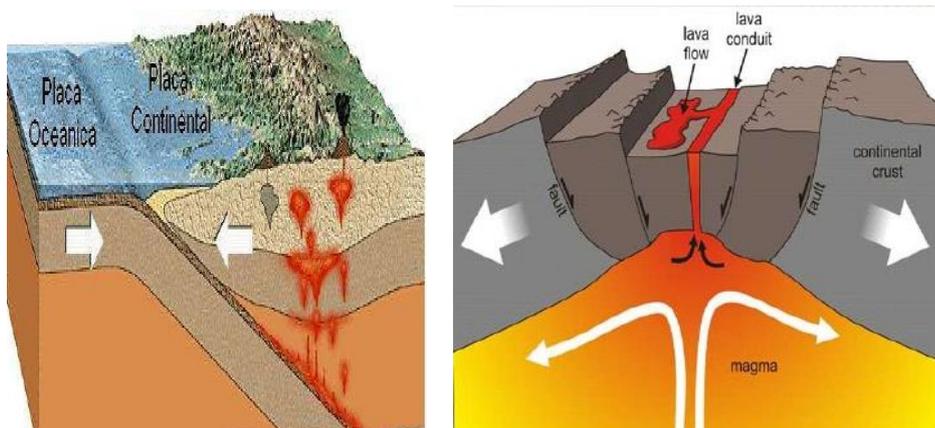


Figura 10. Interacción entre placas tectónicas.

Fuente: Geoxnet, 2022.

El movimiento de las placas produce acumulación de enormes cantidades de energía potencial elástica, que al no ser soportadas por las rocas produce los movimientos

sísmicos. Es específico, el Perú se encuentra en una zona de subducción, donde la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamérica, es por ello que la mayoría de sismos ocurre en la costa y en la fosa marina. Los elementos tectónicos principales presentes del Perú son la dorsal de Nazca, la fosa Peruano - Chilena y la Cordillera de los Andes.



Figura 11. Interacción placas de Nazca y Sudamericana.

Fuente: BBC News, 2017.

CAPÍTULO III: REFINERÍA EN ESTUDIO

3.1. Información general

Ubicación	Distrito de Lurín, Departamento de Lima.	
Área	500 000 m ² (50 hectáreas)	
Elevación	4 a 80 msnm	
Descripción del área	Ligeramente plana en parte frontal del acceso donde se ubican las oficinas y se realiza la refinación. En la parte opuesta, donde se ubica los tanques de almacenamiento, se asciende por las laderas inferiores del cerro Lomo de Corvina.	
Planta de procesos	Unidad de Destilación Primaria	15.5 Miles de barriles de petróleo por día (MBPD)
	Unidad de Destilación al Vacío	10.0 MBPD
Capacidad de almacenamiento	2 051 354 barriles de hidrocarburos y derivados líquidos.	
Ventas	32 MBPD	

Tabla 3. Descripción de la refinería.

Fuente: Petroperú, 2018.

3.2. Proceso de refinación del petróleo

En la refinería en estudio, el petróleo llega por vía marina, se almacena y pasa por las siguientes unidades:

- a) **Unidad de Destilación Primaria (UDP):** tiene una capacidad de procesamiento de 15.5 miles de barriles diarios (MBD). En esta unidad se obtiene:
- Gasolinas Regular y Premium (antes 84, 90, 95 y 97 octanos).
 - Gasoholes Regular y Premium (antes 84, 90, 95 y 97 octanos).
 - Solventes N°1 y N°3.
 - Diesel B5 y B5 S50.
 - Gases incondensables (se eliminan a la atmosfera).
 - Crudo reducido (producto de fondo).

El crudo reducido (producto que queda en el fondo de la torre de la Unidad de Destilación Primaria), debido a que no puede seguir tratándose en las condiciones con las cuales trabaja dicha torre, pasa a la Unidad de Destilación al Vacío.

b) **Unidad de Destilación al Vacío (UDV):** tiene una capacidad de procesamiento de 10 MBD. En esta unidad se obtiene:

- Gasóleo liviano.
- Gasóleo pesado.
- Naftas.
- Asfaltos líquidos y sólidos.
- Petróleo industrial.
- Combustibles marinos.
- Ácido nafténicos.
- Fondo de vacío.

Cada etapa o circuito está conformada por un horno que calienta el crudo que ingresa a su respectiva torre de fraccionamiento (además de tener otros componentes como desalinizadores, bombas, tuberías, etc.), posteriormente se recolectan los productos en unos tanques metálicos.

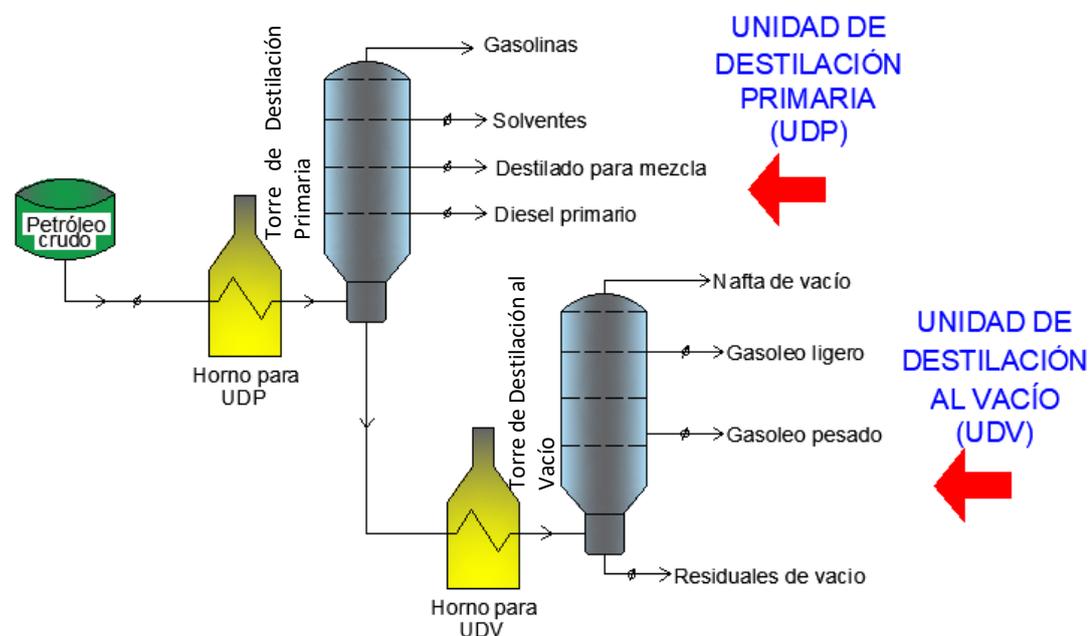


Figura 12. Esquema de las unidades para refinación de crudo.

Fuente: Adaptado de Petroperú, 2018.



Figura 13. Vista panorámica de las unidades en la refinería.

Fuente: Adaptado de Google, 2023.

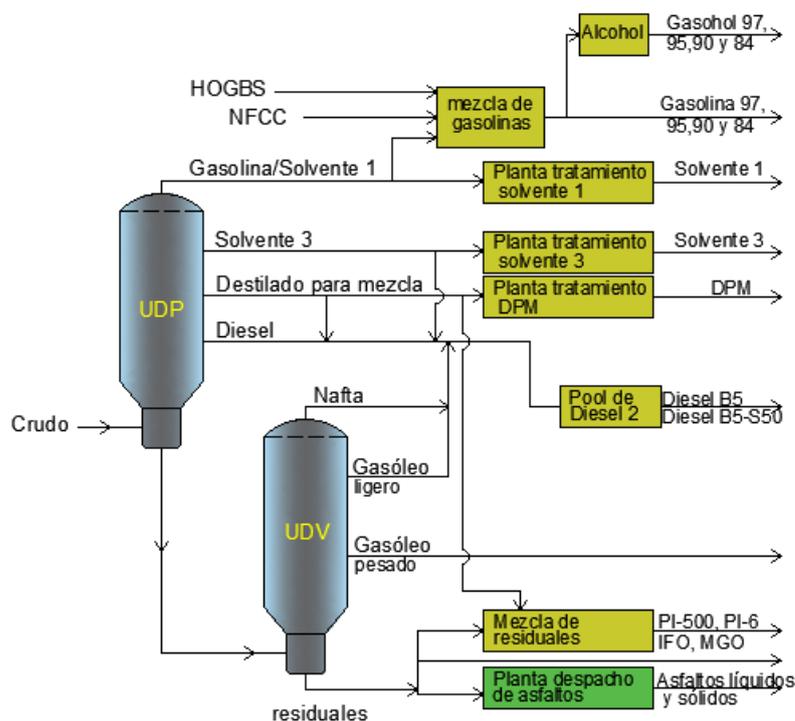


Figura 14. Diagrama de procesos de refinación del crudo.

Nota: HOGBS: mezcla de gasolinas de alto octanaje, NFCC: gasolina craqueada, DPM: destilado para mezcla, IFO e MGO: combustibles marinos.

Fuente: Petroperú, 2018.

3.3. Productos obtenidos

Son aquellos se obtienen luego del procesamiento del petróleo crudo en las unidades respectivas (UDP y UDV).

Producto	Descripción	Usos
Gasolinas	Combustible con adición de aditivos para mejorar su rendimiento. Se producen las gasolinas Premium, regular y de 84 octanos. Por regulaciones ambientales, no contienen plomo.	Automotriz
Gasoholes	Combustible líquido elaborado por la mezcla de gasolina y alcohol carburante (biocombustible), también se le añade aditivos. Se producen los gasoholes premium, regular y de 84 octanos. Se comercializan como alternativas a las gasolinas.	Automotriz
Diesel B5 y B5-S50	Combustible que resulta de la mezcla de Biodiesel y Diesel N°2. Su uso mayoritariamente como combustible de los motores Diesel cuando se requiere mayor torque o fuerza.	Automotriz pasada, plantas eléctricas.
Petróleos industriales N°6 Y N°500	También llamados Fuel Oil, son combustibles residuales para uso industrial debido a su gran poder calorífico (fuente de producción de otras energías).	Generación eléctrica, calderos, calentadores y secadores.
Combustibles Marino	Se producen el Marine Gas Oil (MGO) usado en embarcaciones pequeñas y el Marine Fuels (IFO) usado en calderas de buques.	Embarcaciones marinas
Solventes N°1 Y N°3	Es un disolvente usado en la industria del caucho, también como aglomerante en la industria de zapatos, textil y de la madera. Se como insumo para producir thinner y pinturas	Limpieza de maquinarias, dilución de pinturas.
Cementos asfálticos y Asfaltos líquidos de pavimentación.	Los cementos asfálticos (llamados también solidos) se usan con mezclas calientes en la construcción de pavimentos asfálticos. Los asfaltos líquidos se producen diluyendo el cemento asfáltico con otros solventes derivados del petróleo o con agua.	Pavimentación y resanes de carreteras
Ácido Nafténico 250	Por ser muy reactivo, tiene múltiples usos como insumo para preparar sales metálicas usados en la industria de las pinturas, resinas, detergentes, fungicidas, etc.	Secantes y preservantes de madera, inhibidores de corrosión, etc.
Productos intermedios	Aquellos que no se producen para comercializar, sino que se usan como insumos de productos finales. Algunos son: naftas, mezclas residuales (slop), residuales marinos, mezclas de gasolinas de alto octanaje, etc.	Insumos

Tabla 4. Derivados obtenidos del petróleo y su uso.

Fuente: Petroperú, 2023.

3.4. Estructuras involucradas

Con referencia en la guía *Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas* (Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities 2011 [GSEDPF, 2011]), desarrollado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers [ASCE]), los componentes de una planta industrial (como la refinería) se pueden clasificar como:

- a) Estructuras edificios: Diseñadas como edificaciones típicas, del sistema estructural pórticos, albañilería o mixtos, suelen tener máximo 3 niveles. Corresponden a todas las estructuras administrativas, estructuras de control, laboratorios, almacenes, estaciones de bombeo, cuartos de poder y similares. Para su diseño se dispone de normas técnicas locales y algunas requieren verificaciones específicas como el diseño para resistir cargas explosivas.



Figura 15. Estructuras edificios en la refinería.

Fuente: Petroperú, 2022.

- b) Estructuras no edificios: Aquellas que no entran en la clasificación anterior, pero sus sistemas estructurales pueden parecerse al de los edificios, por ejemplo, tener pórticos resistentes a momentos. A su vez se pueden clasificar como:
 - Estructuras no edificios similares a edificaciones: Estructuras diseñadas y construidas de manera similar a edificios y responderán de la misma forma que un edificio al movimiento del suelo. Ejemplos son marcos de soporte de bombas, pórticos soporte de tuberías, pórticos soportes de tanques horizontales, cajas con soporte de marcos arriostrados, hornos rectangulares, estaciones de despacho de combustibles, etc.



Figura 16. Estructuras que se comportan como edificios.

Fuente: Phoenix EPC, 2019.

- Estructuras no edificios no similares a edificaciones: aquellas que no tienen sistemas resistentes a fuerzas sísmicas laterales o verticales como en edificios. Esta clasificación incluye a la mayoría de los equipos existentes en una instalación petroquímica tales como tanques horizontales, torres de destilación, intercambiadores de calor, tanques metálicos, tanques esféricos, etc.



Figura 17. Estructuras no edificios no similar a edificaciones.

Fuente: Petroperú, 2022.

- c) Componentes y sistemas no estructurales: el peso de estas estructuras representa una porción pequeña del peso total del sistema que los sostiene (usualmente menos del 25%). Algunas de los más usuales son tanques delgados horizontales, equipamiento mecánico y eléctrico, cables, soporte de ductos, generadores eléctricos, compresoras, accesorios para la iluminación, entre otros.



Figura 18. Componentes no estructurales: equipos eléctricos.

Fuente: Phoenix EPC, 2019.

Como se vio, la mayor parte de los elementos en una refinería son del tipo Estructuras no edificios no similares a edificaciones, en esta tesis se estudian principalmente estos elementos, que se desarrolla en los subcapítulos siguiente. En el Anexo 1, en planos se puede apreciar la distribución espacial de los equipos que componen la refinería.

3.4.1. Columnas de fraccionamiento

3.4.1.1. Columna de Destilación Primaria

Es una estructura cilíndrica de acero en posición vertical, en cuyo interior se encuentran unas bandejas metálicas (conocidos como platos) de espesor máximo de 2 cm distribuidos uniformemente en toda la altura de la columna. El petróleo crudo, que previamente se calienta en los hornos, ingresa por la parte a la torre y los vapores que genera son recogidos por los platos y transportados por conductos (cortes laterales) hacia su almacenamiento y otros procesos.

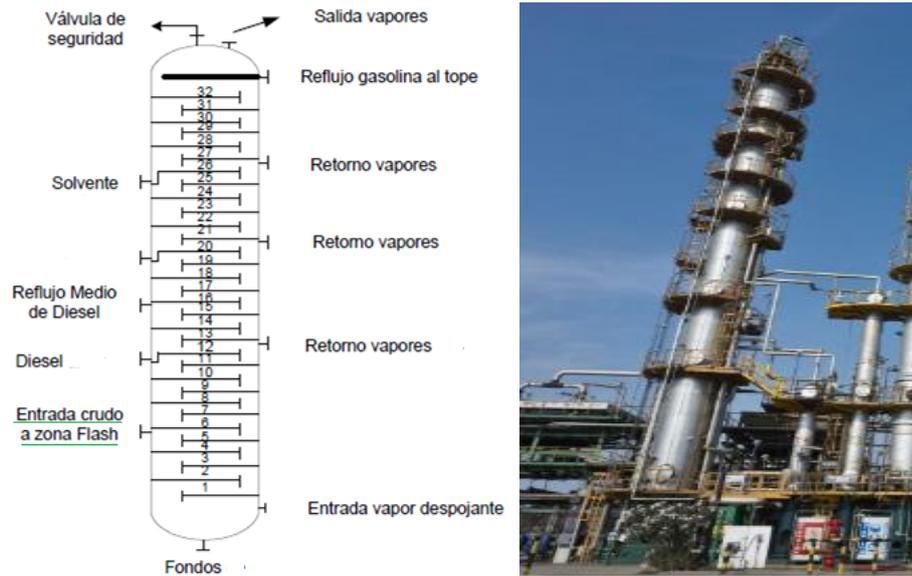


Figura 19. Columna de Destilación Primaria.

Fuente: Petroperú, 2008 y Petroperú, 2022.

Altura Total	23.5 m
Diámetro interno	7.5 m
Espesor nominal	7.9 mm
Numero de platos	27 en zona rectificación 5 en zona de fondo
Presión de diseño	345 MPa
Temperatura de diseño	329 °C
Numero de copas	86 en zona rectificación 12 en zona de fondo
Tipos de copas	Copas de burbujeo de 101.6 mm de diámetro externo

Tabla 5. Características principales de la Columna de Destilación Primaria.

Fuente: Petroperú, 2008.

3.4.1.2. Columna de Destilación al Vacío

Esta columna trabaja a presiones menores a la atmosférica y temperaturas medias de 430°C y recibe los productos de fondo que no pueden ser destilado en la columna de destilación atmosférica.

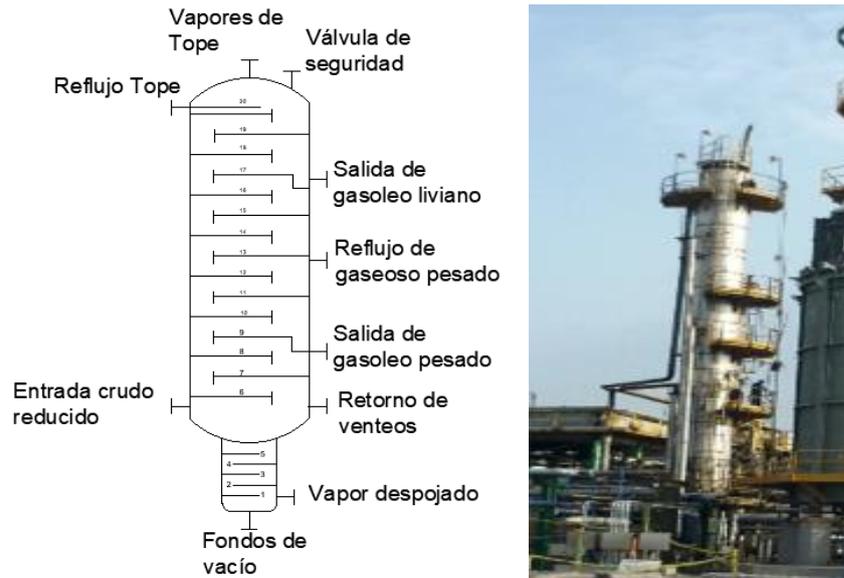


Figura 20. Columna de Destilación al Vacío.

Fuente: Petroperú, 2008 y Petroperú, 2022.

Altura total	18.9 m recipiente, 21.6 m hasta el piso
Diámetro interno	1.52 m
Espesor nominal	15.8 mm
Número de platos	15 en zona rectificación 5 en zona de fondo
Presión de diseño	414 MPa
Temperatura de diseño	412.8 °C
Material de construcción	Acero ASTM A-285C
Capacidad del recipiente	32.85 m ³
Número de copas	86 en zona rectificación 17 en zona de fondo
Tipos de copas	Copas de burbujeo de 101.6 mm de diámetro externo

Tabla 6. Características de la Columna de Destilación al Vacío.

Fuente: Petroperú, 2008.

3.4.2. Hornos

3.4.2.1. Horno de la Unidad de Destilación Primaria

Es una estructura metálica con zonas convectivas que se usan para calentar los productos que ingresan a las torres de destilación primaria. Se alimentan con los propios residuales que se obtienen de las torres. Interiormente tiene paredes refractarias y

aislantes por la que atraviesa el petróleo por ductos en forma de serpentín hasta alcanzar las condiciones de operación.

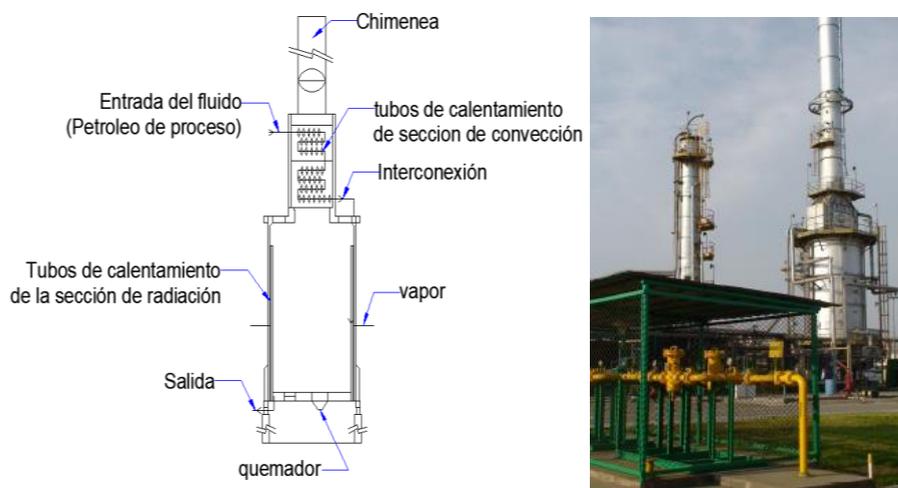


Figura 21. Horno de la Unidad de Destilación Primaria.

Fuente: Petroperú, 2008 y Petroperú, 2023.

Tipo	Horno cilíndrico vertical convectivo
Velocidad másica	4.84 kg/s/m ²
Numero de tubos	40
Diámetro y longitud de tubos	0.11 m de diámetro externo y 7.31 m de largo
Máximo calor	3.10 MW
Accesorios en horno	2 termocuplas para piel de tubos del horno y un serpentín sobrecalentado de vapor de 2 etapas
Agente agonizante	Vapor saturado de 0.69 MPa
Material refractario	Refractario castable, 0.13 m espesor
Soplado de hollín	Un tubo soplador de hollín para limpieza de tubos.
Temperatura de entrada zona convectiva	237 – 254 °C
Temperatura salida zona convectiva	273 – 287 °C
Temperatura de salida de zona radiante	321 – 343 °C
Temperatura de piel de tubos zona radiante	677 °C
Temperatura de salida de gases de chimenea	510 °C
Presión de entrada crudo	1.23 MPa
Presión de salida crudo a circuito	0.48 MPa

Tabla 7. Característica de horno de Unidad de Destilación Primaria.

Fuente: Petroperú, 2008.

3.4.2.2. Horno de la Unidad de Destilación al Vacío

Este horno recibe los productos de fondo de la Unidad de Destilación Primaria, con el objetivo de incrementar la temperatura de estos desde 270°C hasta 371°C y enviarlo a la torre de fraccionamiento al vacío. Se alimenta con los residuales de la primera destilación.



Figura 22. Horno de Unidad de Destilación Primaria.

Fuente: Petroperú, 2023.

Tipo	Horno cilíndrico vertical
Velocidad másica	4.84 kg/s/m ²
Numero de tubos	40
Diámetro y longitud de tubos	0.12 m diámetro externo y 7.31 m de largo
Máximo calor	3.10 MW
Accesorios en horno	2 termocuplas para piel de tubos del horno, dos serpentines sobrecalentadores de vapor al eyector y despojante.
Agente agonizante	Vapor saturado de 0.68 MPa
Material refractario	Refractario castable, 0.127 m de espesor
Temperatura de entrada	265 – 285 °C
Temperatura de salida	348 – 382°C
Temperatura de piel de tubos	677 °C
Presión de entrada	0.31 MPa
Presión de salida	0.11 MPa

Tabla 8. Característica del horno de la Unidad de Destilación al Vacío.

Fuente: Petroperú, 2008.

3.4.3. Tanques

Los tanques son estructuras de acero que almacenan el petróleo y también los productos ya refinados. La refinería cuenta con 74 tanques, con una capacidad de almacenamiento de 39 747 m³ de crudo y más de 125 441 m³ de productos refinados. También cuenta con un área para el almacenamiento de productos químicos.



Figura 23. Tanque de almacenamiento.

Fuente: Petroperú, 2014.

En la refinería en estudio, los tanques existentes son:

Tanque	Producto	Capacidad (m ³)	Tipo de techo	Dimensiones (m)	
				Diámetro	Altura
1	Petróleos industriales	4800	Cónico	22.33	12.20
2	Crudo	4800	Cónico	22.33	12.20
3	Asfalto	1808	Cónico	13.60	12.90
4	Slop	480	Techo flotante	7.63	10.78
5	Petróleos industriales	9600	Cónico	30.42	13.34
6	Crudo	8000	Cónico y techo flotante	30.46	11.55
7	Crudo	4800	Cónico	22.25	12.22
8	Crudo	4800	Cónico	22.34	12.16
9	Asfalto	1200	Cónico	11.15	12.12
10	Agua industrial	480	Cónico	6.69	10.92
11	Solvente 3	800	Cónico	9.13	12.32
12	Gasolina Premium	800	Cónico	9.14	12.15
13	Asfalto	1600	Cónico	13.47	12.17
14	Petróleos industriales	1600	Cónico	12.94	12.11
15	Diesel 2	1200	Cónico	11.67	12.20
16	Diesel	1200	Cónico y sabana flotante	11.57	12.19

Tanque	Producto	Capacidad (m ³)	Tipo de techo	Dimensiones (m)	
				Diámetro	Altura
17	Gasolina Premium	1200	Cónico y sabana flotante	11.04	12.19
18	Gasolina primaria	1600	Cónico y sabana flotante	12.95	12.01
19	Solventes	1600	Cónico	12.95	12.20
20	Gasolina 97	3200	Techo flotante	16.78	14.61
21	Crudo	9600	Cónico	28.96	14.45
22	Petróleos industriales	3200	Cónico	16.82	14.48
23	Gasolina Premium	8000	Techo flotante	26.52	14.53
24	Gasolina Premium	800	Cónico y sabana flotante	8.42	14.55
25	Gasolina Premium	800	Cónico y sabana flotante	8.42	14.58
26	Gasolina Regular	800	Cónico y sabana flotante	8.36	14.20
27	Diesel 2	800	Cónico	8.38	14.50
28	Diesel 2	800	Cónico	8.38	14.64
29	Kerosene	800	Cónico	8.37	14.15
30	Nafta Crackeada	3200	Cónico	16.77	14.58
31	Gasolina Premium	3200	Cónico y techo flotante	16.76	15.02
32	Gasolina Regular	3200	Cónico y sabana flotante	16.75	14.68
33	Asfalto	800	Cónico	8.39	14.61
34	Turbo A1 (desuso)	1920	Cónico	40.86	15.54
35	Solvente 1	160	Cónico	4.75	8.97
36	Productos especiales	192	Cónico	6.69	5.44
37	Productos especiales	320	Techo flotante	9.40	4.75
38	Agua de separador API	800	Horizontal	6.71	4.57
39	Petróleos industriales	112	Cónico	4.98	4.87
40	Crudo	8000	Cónico y techo flotante	28.46	12.47
41	Gasolina 95	480	Cónico	8.07	9.17
42	Solvente 1	80	Horizontal	2.73	8.49
43	Solvente 3	80	Horizontal	2.73	8.49
44	Soda caustica	32	Cónico	3.69	2.44
45	Soda caustica	16	Cónico	2.31	5.49
46	Solvente hc	800	Cónico	9.14	12.06
47	Asfalto	1280	Cónico	12.61	10.42
48	Agua industrial	3200	Sin techo	21.03	10.67

Tanque	Producto	Capacidad (m ³)	Tipo de techo	Dimensiones (m)	
				Diámetro	Altura
49	Petróleos industriales	4736	Cónico	21.63	12.72
50	Diesel 2	14 720	Techo flotante	36.57	14.99
51	Crudo	17 600	Techo flotante	40.10	15.20
52	Crudo	17 600	Techo flotante	40.10	15.20
53	Turbo A1 (desuso)	1440	Cónico	16.34	8.93
54	Gop (5)	14 400	Cónico	35.00	15.00
55	Nafta craqueada	16 000	Techo flotante	40.00	14.40
56	Bio Diesel B100	3200	Cónico	19.49	10.54
57	Diesel 2	14 720	Techo flotante	36.62	15.00
58	Petróleos industriales	480	Cónico	8.29	8.60
59	Combustibles marinos	2080	Cónico	15.36	11.69
60	Turbo A1	2080	Cónico	17.18	8.64
61	Soda caustica	32	Horizontal	1.83	6.40
62	Agua cruda desaladora (desuso)	160	Cónico	0.00	0.00
63	Agua condensada - desaladora (desuso)	160	Cónico	0.00	0.00
64	Agua	3200	Sin techo	20.00	10.20
65	Diesel 7	8000	Cónico	31.60	12.00
66	Diesel 7	8000	Cónico	31.60	12.00
67	IFO 180	8000	Cónico	31.60	12.00
68	Gasolina Regular	25 600	Techo flotante	46.94	14.63
69	Gasolina Premium	25 600	Techo flotante	46.94	14.63
70	Turbo A1	16 000	Cónico	40.70	14.70
71	Diesel	4800	Sin techo	24.10	12.20
72	Productos especiales	320	Cónico	9.40	4.75
73	Productos especiales	320	Cónico	9.40	4.75
74	Destilados medios	16 000	Cónico	9.40	4.75

Tabla 9. Inventario de tanques de almacenamiento en refinería.

Fuente: Adaptado de Petroperú, 2008 y LITOCLEAN, 2020.

3.4.4. Otras estructuras

Debido a su menor tamaño, se tienen los siguientes equipos adicionales.

- a) Acumuladores de tope: Son recipientes metálicos cilíndricos dispuestos en forma horizontal que permiten obtener condensado y vapores no condensados. Cada columna de fraccionamiento tiene un acumulador, que evita que el agua refluya hacia su interior.

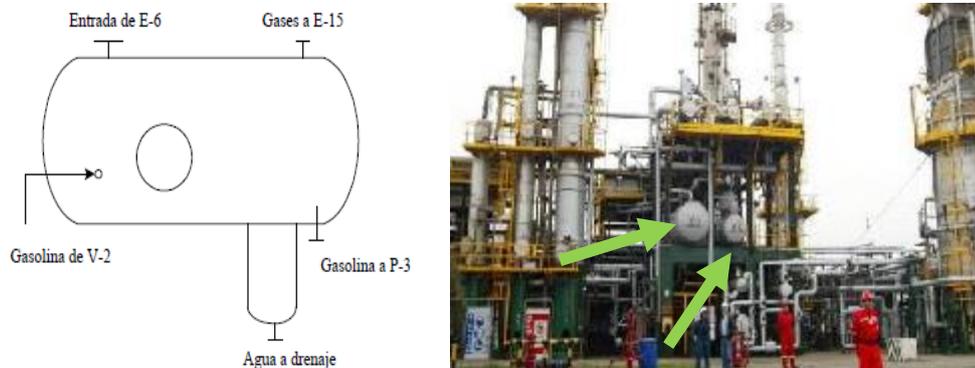


Figura 24. Acumuladores de tope.

Fuente: Petroperú, 2008 y Petroperú, 2023.

- b) Filtros de deshidratación: Son recipientes metálicos verticales que contienen sales de diferente diámetro en su interior, separan el agua de los productos como gasolinas.



Figura 25. Filtros de deshidratación.

Fuente: Petroperú, 2008 y Petroperú, 2023.

- c) Bombas: Se usan bombas centrífugas para transportar los fluidos entre las diferentes líneas de procesamiento (tanques, torres de refinación, hornos, etc.).

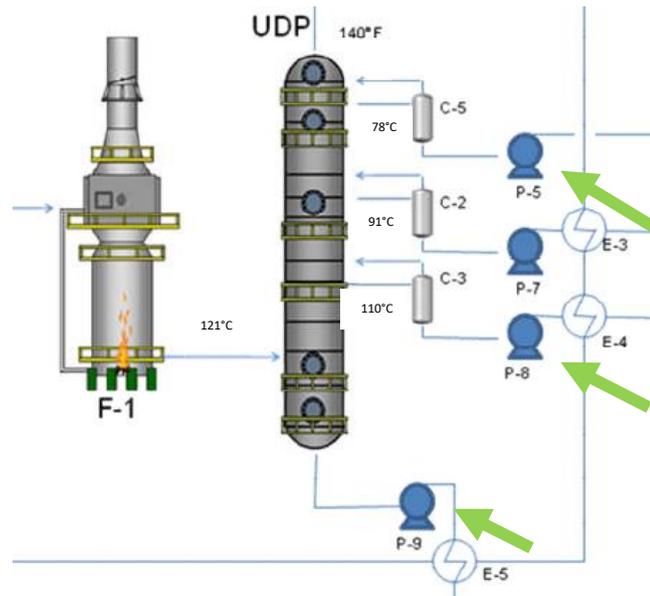


Figura 26. Bombas en el proceso de refinación.

Fuente: Petroperú, 2008.

d) Líneas de conducción y válvulas: El flujo del crudo y derivados dentro del circuito de transformación debe hacerse por tuberías metálicas, cuya propiedad fundamental es mantener las presiones de operación.



Figura 27. Líneas de conducción de crudo y derivados.

Fuente: Petroperú, 2022.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL PELIGRO SÍSMICO

El riesgo sísmico se define como una función del peligro sísmico (inherente a la naturaleza, que se puede cuantificar mas no eliminar) y a la vulnerabilidad (que depende del tipo de estructuras, estado actual), a continuación, se analizan ambos factores.

4.1. Análisis del Peligro Sísmico

El peligro sísmico depende de la ubicación geográfica de la refinería, que es el distrito de Lurín, límite con Villa El Salvador. Analizar el peligro sísmico permitirá identificar y determinar el potencial, características origen y del movimiento sísmico esperado en el lugar.

4.1.1. Caracterización del distrito de Lurín

4.1.1.1. Ubicación

El distrito de Lurín se ubica en la provincia de Lima, departamento de Lima, limita con los siguientes distritos:

- Por el Norte con los distritos de Pachacamac, Villa María del Triunfo y Villa El Salvador.
- Por el Sur con el distrito de Punta Hermosa.
- Por el Este con el distrito de Pachacamac.
- Por el Oeste con el Océano Pacífico.

Se ubica entre las coordenadas UTM 297 174 m Este, 8 642 641 m Sur y Zona 18L. Cuenta con una superficie total de 221 Km² y una altitud entre los 0 y 380 msnm.



Figura 28. Ubicación del distrito de Lurín.

Fuente: IGP, 2023.

4.1.1.2. Topografía

El Instituto Nacional de Cultura (2005) (disuelto en el año 2010) en su Reconocimiento y Registro del Entorno Territorial del Qhapaq Ñam, clasifica al distrito de Lurín con 3 perfiles de suelos:

- Valles y Quebradas: comprendida entre los valles de los ríos Rímac, Lurín, Chillón y Chancay. De escasa precipitación que no favorece la erosión de suelos.
- Planicies Costeras y conos de deyección: comprende el área desde el borde marino y las estribaciones de la Cordillera Occidental que forman una llanura aluvional que sigue hasta el sur por San Bartolo, Punta hermosa y Chilca.
- Lomas y Colinas: Corresponde a las áreas con colinas y cerros de poca elevación, con taludes menores de 30°, están cubiertas de capas de arenas eólicas y que actualmente tiene asentamientos humanos. En este tipo de suelo se ubica la refinería de estudio.



*Figura 29. Vista de la topografía de la refinería.
Fuente: Google, 2023.*

4.1.1.3. Población

Según el Instituto Nacional de Estadística de Informática INEI (2017) la población del distrito de Lurín es de 85 132 habitantes. La densidad poblacional es de 542.2 hab/km². Se compone de un 97.4% de población urbana y un 2.6% de población rural.

4.1.1.4. Información climatológica

Haciendo referencia a información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2023), el distrito de Lurín se encuentra en una región con clima Semi - Cálido (Desértico árido - subtropical). Presenta una temperatura media anual entre 18°C y 20°C que decrece en los niveles más elevados de la región, presenta también cielo nublado y escasa precipitación lo que la hace una zona árida. A pesar de existir escasa

precipitación, en los años en los que se ha presentado el Fenómeno del Niño, se observan fuertes precipitaciones con corrientes de lodo.

En el distrito de Lurín, la precipitación máxima mensual observada es menor de 2mm en los meses de verano. Se tiene una humedad relativa máxima de 95% en la temporada de invierno y la mínima de 71.5% que ocurre en los meses de verano. Los vientos son constantes en todo el año, con una velocidad promedio de 1.5 m/s, la dirección que predomina es suroeste alrededor de las 13 horas y sureste alrededor de las 18 horas. En cuanto a las horas de sol, se alcanza un valor máximo de 8 horas al día durante el mes de abril y un mínimo de 2 horas en el mes de Julio.

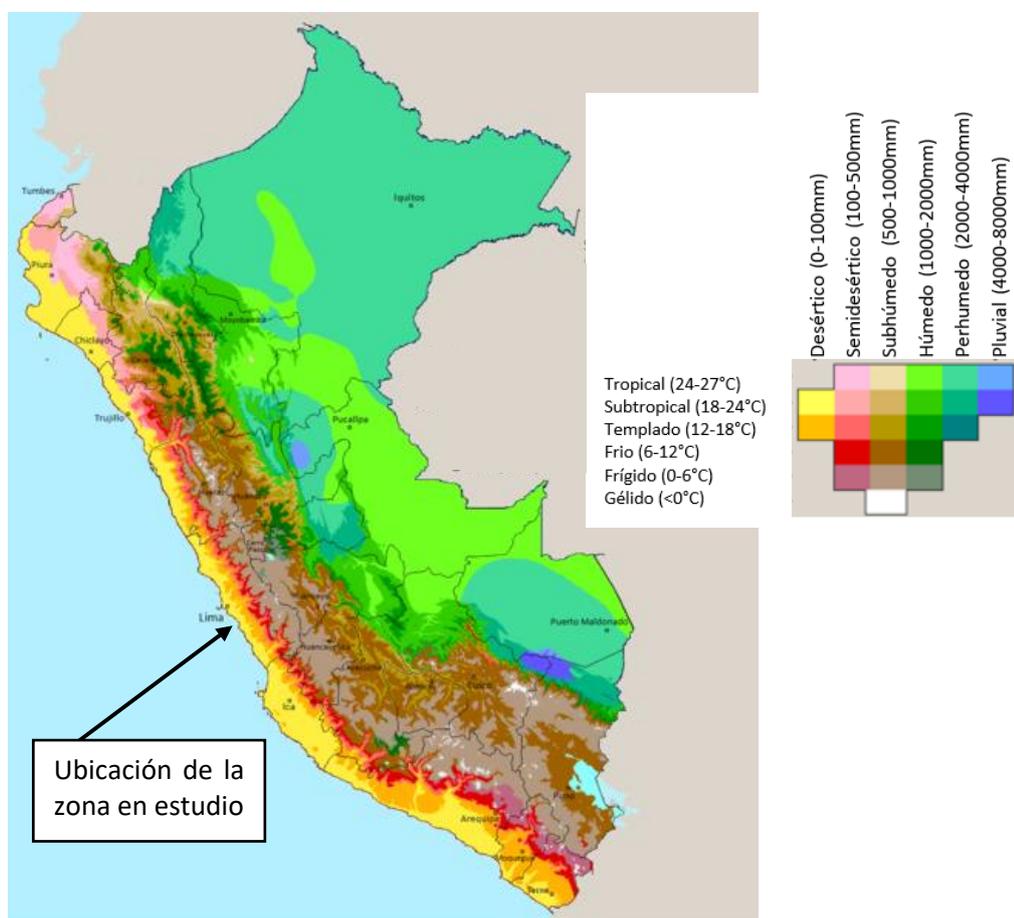


Figura 30. Mapa climático del Perú.

Fuente: SENAMHI, 2023.

4.1.2. Microzonificación de Lurín

Tomando como referencia el informe de Microzonificación Sísmica del Distrito de Lurín elaborado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID, 2013) se tiene:

4.1.2.1. Geología

- Geología Local: La zona se ubica en un área considerable de arenas móviles sobre rocas in situ. Se observa que las arenas del litoral son acarreadas por acción del viento en dirección de Norte a Sur y de Suroeste a Noreste.
- Zonificación Geológica: Según el estudio, ésta la caracteriza como una zona comprometida por depósitos marinos y aluviales reciente, que constituyen una zona con peligro geológico potencial muy alto.

4.1.2.2. Características geotécnicas del suelo

- Evaluación geotécnica: El tipo de suelo presente en el área de estudio corresponde a arena pobremente gradada (SP), arcillas de baja plasticidad (CL) de consistencia media y arena con limos (SP-SM y SM). Por debajo, a más profundidad (5m) se puede encontrar arenas mal gradadas (SP), arenas limosas (SM, SW-SM), arenas arcillosas (SC) y limos (ML).
- Microzonificación geotécnica: Según el estudio, corresponde a zona IV-A, que está formado por depósitos marinos y depósitos de arenas potencialmente licuables conformados por arenas sueltas, tal clasificación se muestra en Figura 31.

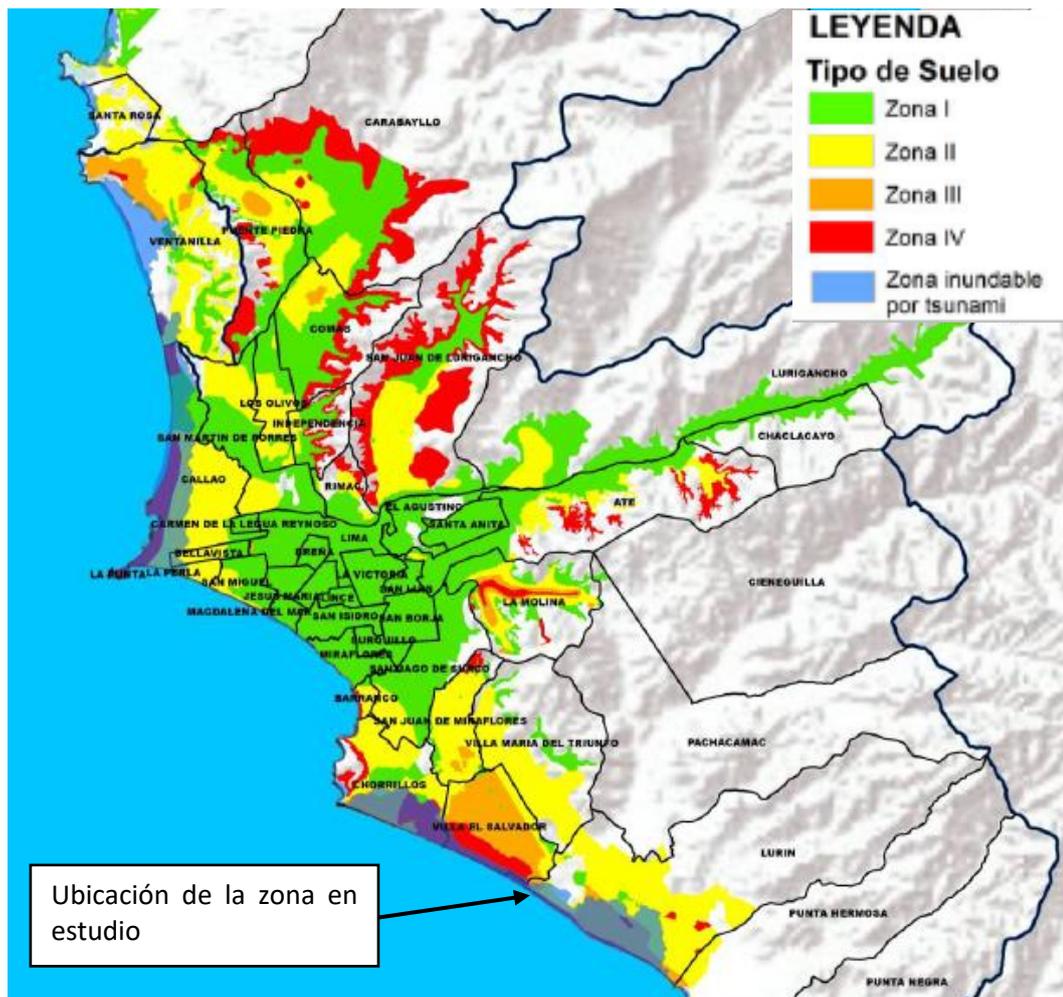


Figura 31. Mapa de microzonificación sísmica-geotécnica para Lima y Callao.

Fuente: CISMID, 2013.

4.1.2.3. Características dinámicas

La investigación de referencia recopiló información de microtemores y perfiles sísmicos realizados en diferentes partes del distrito. En específico, para la zona donde se ubica la refinería se tiene valores de periodos de vibración que indican la existencia de suelos flexibles. Además, mediante ensayos geofísicos se obtuvieron perfiles de velocidad de ondas de corte. Teniéndose en la zona de estudio, valores que corresponden a material granular suelto hasta los 4.7 m de profundidad, continuado por material granular medianamente denso hasta los 20 m de profundidad, alcanzando una velocidad promedio de ondas de corte de 340 m/s.

Para la zona donde se ubica la refinería, se tiene arenas de compacidad suelta a media, arcillas de consistencia blanda y limos. Los periodos de vibración son de al menos 0.5 s, lo que la hace un suelo flexible.

4.1.2.4. Microzonificación sísmica

4.1.2.4.1. Tipo de zona

Reuniendo la información previamente desarrollada en la caracterización por Microzonificación Geotécnica y de los periodos, para Lurín se tiene las siguientes zonas:

- Zona I: Periodos menores a 0.3 s, corresponde a zonas de afloramiento de roca con diferente nivel de fracturación y depósitos de grava media.
- Zona II: Periodos entre 0.3 y 0.5 s, corresponde a depósitos de arenas de compacidad media a densa.
- Zona III: periodos mayores a 0.5 s, correspondiente a depósitos de arenas de compacidad suelta a media, depósitos de arcillas y limos de consistencia blanda a media.
- Zona IV: (a) Depósitos marinos y zonas licuables de espesor 0.5 m, propensos a inundación por maremotos. (b) Corresponde a canteras.
- Zona V: Zonas con depósitos de rellenos antrópicos, deben ser eliminados para la construcción de viviendas.
- Zona de inundación por maremotos.

Según la Figura 32 la refinería en estudio se ubica en Zona III de dicha clasificación.

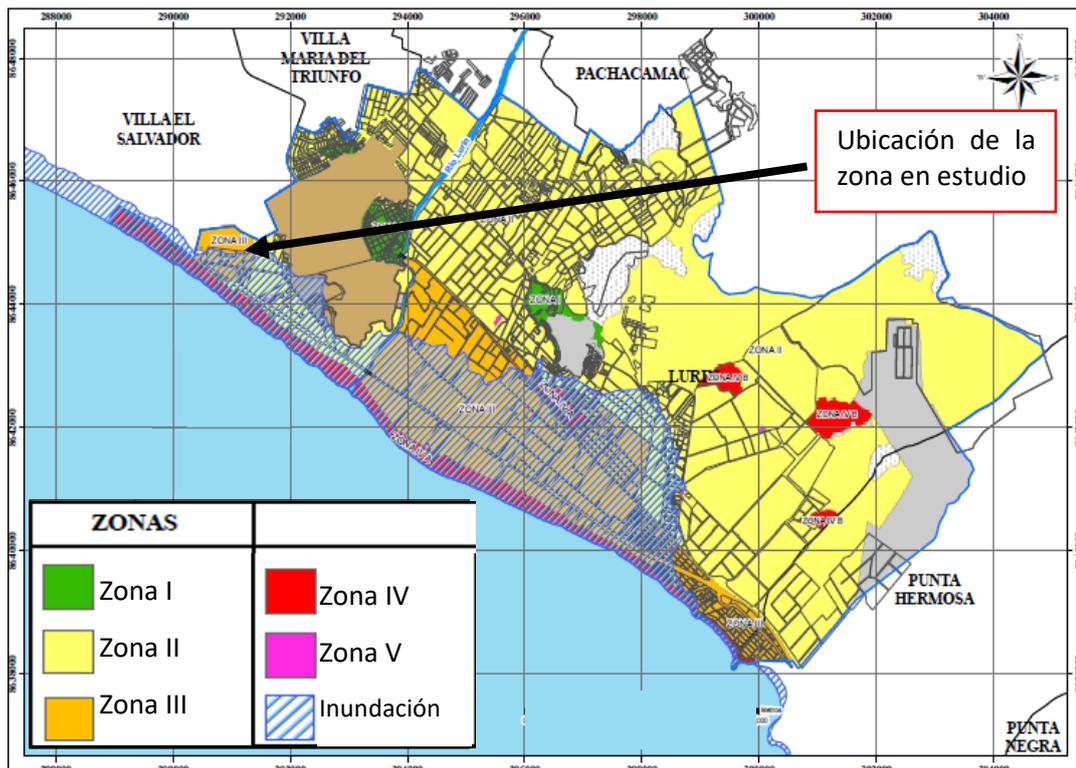


Figura 32. Microzonificación sísmica de Lurín.

Fuente: CISMID, 2013.

4.1.2.4.2. Aceleración máxima de terreno

A decir del mismo estudio realizado por CISMID (2013), el valor estimado de la aceleración máxima fue de 566 cm/s^2 ($0.58g$). Según la clasificación que realizaron, la refinería en estudio se encontraría una Zona III, tal como se puede ver en la Figura 33.

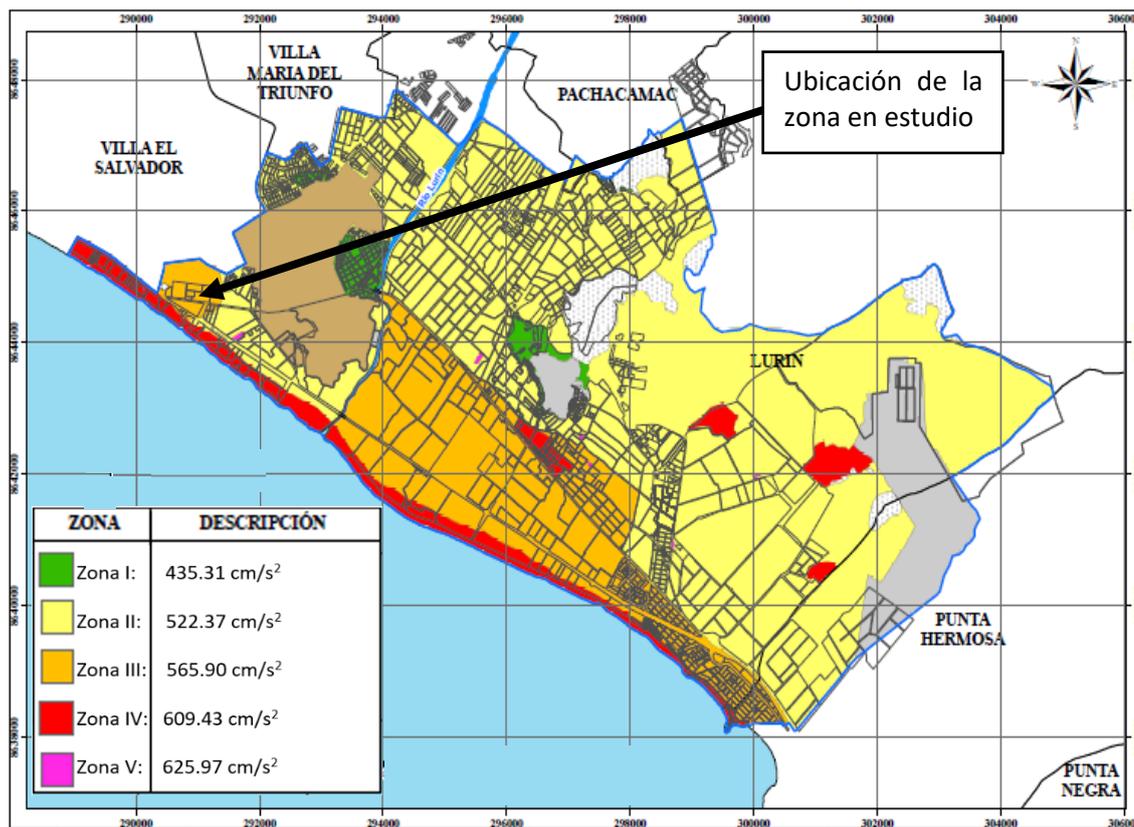


Figura 33. Máximas aceleraciones esperadas en Lurín.

Fuente: CISMID, 2013.

4.1.2.4.3. Velocidad de ondas de corte

Otra característica dinámica que se midió del suelo de Lurín fue la velocidad de la onda de corte. En CISMID (2013) se menciona que se realizaron 8 ensayos de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), que ubicaron una serie de geófonos sobre determinados puntos elegidos del distrito. El método MASW analiza la dispersión de las ondas sísmicas superficiales para estimar un modelo de velocidad de Onda S del subsuelo. Para la zona donde se ubica la refinería en estudio corresponde una velocidad de ondas de corte correspondiente a material granular suelto hasta los 4.7 m de profundidad, continuado por material del tipo granular medianamente denso hasta los 20 m con velocidad de ondas de corte máxima de 340 m/s.

4.1.3. Sismicidad del área de estudio

4.1.3.1. Antecedentes

Para tener idea de la sismicidad de la zona en estudio, se ubica respecto a la sismicidad nacional, para ello el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha elaborado el Mapa

Sísmico del Perú (Figura 34). Dicho mapa muestra la distribución espacial de los eventos sísmicos sucedidos entre los años 1960 y 2022 con magnitud mayores o iguales a 4.0 Mw, la clasificación se realizó en función de la profundidad de los focos.

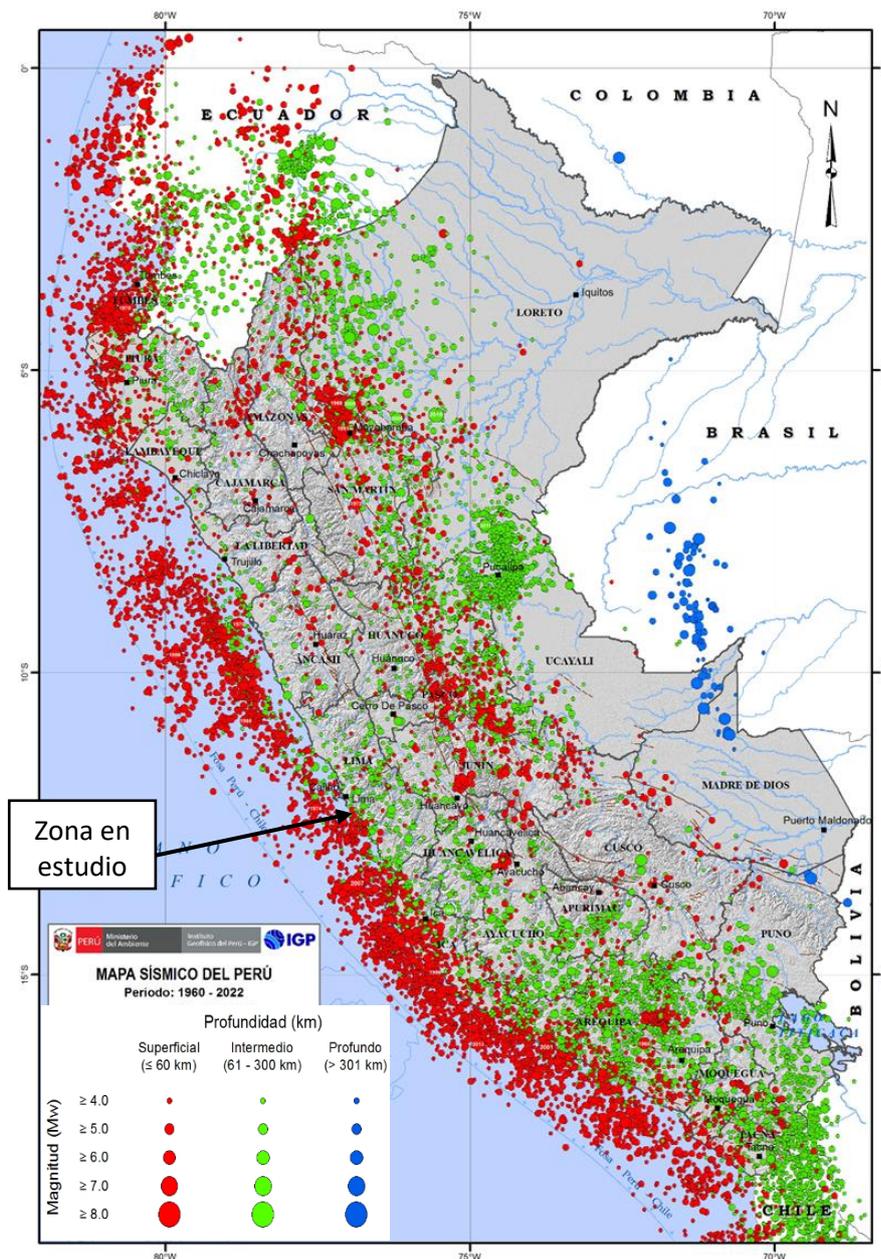


Figura 34. Mapa sísmico del Perú.

Fuente: IGP, 2022.

A decir de Silgado (1978), quien recopiló información de los principales sismos ocurridos en el país desde 1513, se tiene que los mayores terremotos ocurrieron en la costa (1586, 1687 y 1746). Menciona también que durante el intervalo de años de 1513 a

1959, Lima fue golpeada por al menos 15 terremotos, siendo algunos de los más importante los siguientes:

- 20 de octubre de 1687, en Lima ocurrió un terremoto de 8 Mw que afectó también al Callao. Tuvo una duración de 15 minutos, dejando 200 muertos y más de 300 heridos.
- 24 de mayo de 1940, en la provincia del Callao se sintió un terremoto de 8.2 Mw, se sintió hasta el Ecuador. Este evento dejó más de 1000 fallecidos.
- 31 de mayo de 1970, en Ancash ocurrió un terremoto de 8.1 Mw, produjo un aluvión en la ciudad de Yungay dejando como saldo 100 000 muertos.
- 3 de octubre de 1974, en Lima, se sintió un terremoto de 8.1 Mw a las 9:21h que dejó 252 fallecidos y más de 4000 heridos. Se produjo un Tsunami que destruyó el puerto del Callao.

4.1.3.2. Evaluación del peligro sísmico

La ley N°29664 (INDECI, 2021) define peligro como la probabilidad de que un fenómeno físico, con potencial dañino de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definida. Tomando como base el estudio realizado por el Instituto Nacional de Defensa Civil (2017), que a su vez se basa en estudio científicos de Tavera (2014), Villegas (2016) y CISMID (2005) para establecer una intensidad estimada para un sismo probable cerca de la zona de estudio, se tienen algunas conclusiones importantes.

A decir de Tavera (2014), quien analizó áreas de rupturas de sismos acontecido en el pasado y sus respectivas lagunas sísmicas (zonas que estuvieron expuestas al movimiento sísmico y que se comportarán de la misma manera ante un nuevo movimiento), menciona que una de esas lagunas sísmicas se ubica frente a la costa central del Perú. Dicha laguna sísmica estuvo expuesta al terremoto del año 1746 (magnitud 8.0 Mw), por lo que está acumulando energía para liberarla en un nuevo movimiento sísmico de igual intensidad.

En palabras de Condori y Tavera (2011), quienes se basaron en catálogos sísmicos desde los años 60 para identificar 5 áreas ásperas en la costa occidental del Perú, un área de ruptura está ubicada frente a Lima (Figura 35), que estaría asociada al terremoto del año 1746 y podría generar un sismo de 8.8 Mw, con probabilidad de ocurrencia superior al 70% en los próximos 75 años.

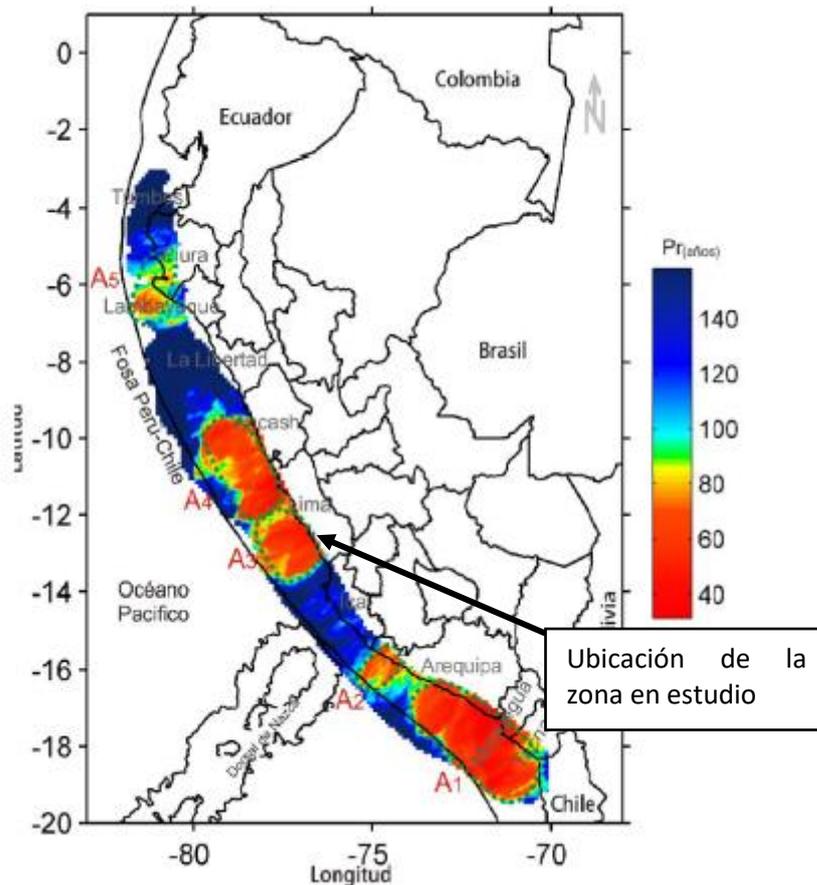


Figura 35. Mapa de periodos de retorno para las asperezas identificadas frente a la costa peruana.

Fuente: Condori y Tavera, 2011.

Según Villegas et al (2016), quienes realizaron observaciones geodésicas entre los años 2008 y 2014 en el territorio nacional con el objetivo de caracterizar las deformaciones de la corteza terrestre relacionadas a la acumulación de energía en las zonas interacción de placas tectónicas, se logró reconocer zonas de mayor acoplamiento sísmico (llamados también asperezas). La zona de mayor extensión se localiza frente a la costa central del país (Figura 36), con aproximadamente 470 km y estiman que liberaría energía para producir sismos de magnitud entre 8.6 y 8.8 Mw.

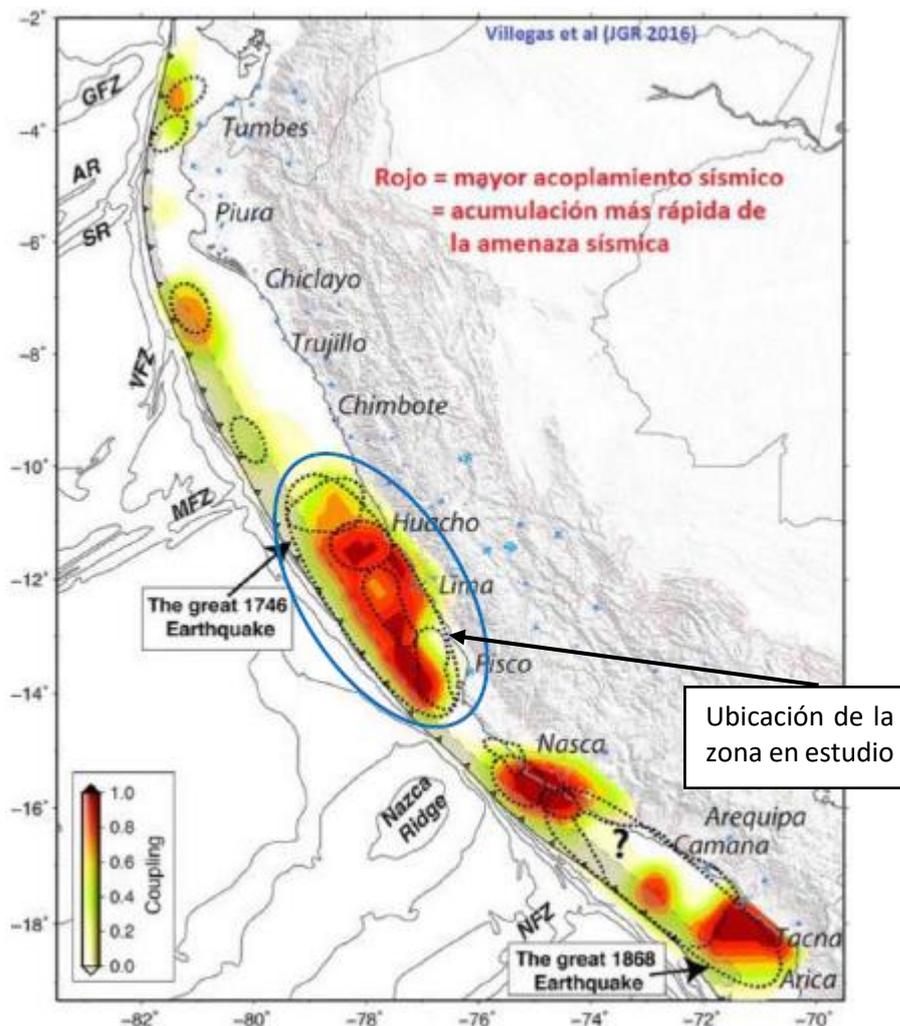


Figura 36. Mapa de acoplamiento sísmico para la zona de subducción del Perú.

Fuente: Villegas et al, 2016.

De los observado en las fuentes mencionadas, existe una zona de acumulación de energía frente a la costa central del Perú, que generaría un sismo de grado superior a los 8 Mw, con característica similares al terremoto de 1746. Tendría además aceleraciones entre 500 y 900 cm/s^2 (Pulido et al, 2015).

Por lo tanto, los escenarios de peligros en la refinería de estudio, mencionados en los capítulos siguientes están basados en la ocurrencia de un movimiento sísmico de magnitud 8.5 Mw, profundidad 35 Km e intensidad superior a VIII (MM). Considerando, por ello al movimiento como severo.

4.2. Análisis de vulnerabilidad sísmica de la refinería

El análisis de vulnerabilidad es el estudio de la capacidad de un sistema para absorber o resistir los efectos del impacto de una amenaza (Paolacci et al, 2012). Para el caso de las plantas industriales como las refinerías, estos son sistemas complejos debido a que tienen elementos con numerosas conexiones, equipos y componentes; sumado a la peligrosidad de sus operaciones, los hace vulnerables a los terremotos.

En una planta industrial, un terremoto puede causar muchas pérdidas como consecuencia del colapso de sus componentes (tanques, hornos, torres de destilación, entre otros), de manera similar a lo que sucede con los edificios; pero que, a diferencia de la evaluación de la vulnerabilidad estructural de edificaciones, la evaluación de vulnerabilidad de las plantas industriales se realiza para analizar de manera individual a los elementos estructurales que componen dichas plantas (Task Committee on Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities [TCSEDPF], 2011).

Las metodologías de evaluación de vulnerabilidades sísmicas se formaron desde las experiencias y observaciones de daños causados en plantas industriales de similar sistema de funcionamiento, lo cual permitió identificar qué elementos de las refinerías son los más expuestos al peligro sísmico, que tipos de fallos presentaron y las consecuencias de estos.

A continuación, se enumeran algunos terremotos que debido a su ubicación afectaron algunas plantas industriales.

Terremoto	Fecha	Magnitud (Mw)	Planta industrial
Kern Kounty (California, EE.UU.)	21/07/1952	7.5	Centro producción Wheeler Ridge
Anchorage (Alaska, EE. UU.)	27/03/1964	9.2	Patio de tanques Union
Nigata (Japón)	16/06/1964	7.6	Refinería Showa
Valparaíso (Chile)	03/03/1985	7.8	Refinería de cobre Codeldo
San Fernando (California, EE. UU.)	09/02/1971	6.6	Presas y reservorio Van Norman.
Loma Prieta (California, EE. UU.)	17/10/1989	6.9	Plantas de tratamiento y estaciones de bombeo de agua
Puerto de Limón (Costa Rica)	22/04/1991	7.6	Moin Petroleum Company, RECOPE
Kocaeli (Izmit, Turquía)	17/08/1999	7.6	Refinería de petróleo Tupras

Terremoto	Fecha	Magnitud (Mw)	Planta industrial
Bhuj (Gujarat, India)	26/01/2001	7.7	Rotura de tanques subterráneos en puerto Kandla
Tokachi-Oki (Japón)	16/09/2003	8.3	Refinería de petróleo Hokkaido
Maule (Chile)	27/02/2010	8.8	Planta Siderúrgica y Central Termoeléctrica Huachipato
Honshu (Japón)	11/03/2011	9.0	Refinería de petróleo Ichihara y central nuclear Fukushima Daiichi
Acapulco (México)	23/06/2021	7.1	Refinería Pemex, Salinas Cruz

Tabla 10. Terremotos que afectaron plantas industriales.

Por ejemplo, en el terremoto de Izmit en Turquía (magnitud 7.4 Mw), que afectó a la refinería Tupras en 1999, se originó el colapso estructural de la base de una chimenea debido al fallo de la cimentación de concreto armado (Figura 37), lo que provocó gran liberación de sustancias tóxicas peligrosas al ambiente circundante, afectando su operatividad y el de tanques circundantes. El sistema contraincendios falló ya que el terremoto dañó también el tanque de agua contraincendios (El País, 1999). Es así que desde allí se establecieron distancias mínimas de separación entre tanque de almacenamiento para que el fallo de uno no cause un efecto en cadena.



Figura 37. Daños en Refinería Tupras (Turquía).

Fuente: Sezen & Whittaker, 2004.

El objetivo del estudio de vulnerabilidad de la refinería es identificar los fallos más comunes que pueden sufrir sus componentes, comparándolos con situaciones de plantas similares y determinar algunos indicadores de capacidad, es decir, estudiar la

vulnerabilidad sísmica de una refinería implica la evaluación de las instalaciones existentes, para obtener:

- Fuerzas cortantes en la base de las estructuras a los que pueden estar sometidos, esto depende de las características dinámicas de la zona.
- Algunas características propias de los elementos como periodo de movimiento.
- Indicadores de estabilidad mediante el análisis de momentos de vuelco y resistentes.
- Cuantificación de cargas que los elementos estructurales soportan y pueden haber cambiado con el tiempo.
- Determinar cualquier cambio en la condición de operación inicial (peso, cantidad de transporte de fluidos, etc.).
- Propiedades de los materiales de los equipos y corroborar alteración o deformaciones.

4.2.1. Metodología para determinar vulnerabilidades

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las instalaciones petroquímicas a nivel mundial, existen varias metodologías, siendo la más usada el desarrollado por el *Comité de Trabajo sobre Evaluación Sísmica y Diseño de Instalaciones Petroquímicas* (Task Committee on Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities [TCSEDPF]) desarrollado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers [ASCE]) en año 2011. Esta metodología se basa en las recomendaciones del ASCE-7 y del Instituto Americano de Petróleo (American Petroleum Institute [API]). Este comité desarrolló el manual *Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas* (Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities [GSEDPF]), donde básicamente se desarrollan 2 métodos: el Procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente y Análisis Dinámico, que corresponden a análisis estáticos y dinámicos respectivamente para evaluar y/o diseñar estructuras dentro de plantas petroquímicas.

Este manual recomienda en qué estructuras se puede usar el Procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente o Análisis Dinámico, de acuerdo con el tipo de funcionamiento y condiciones de trabajo. También desarrolla una tipología estructural, que está relacionada al tipo de daño más frecuente observado a nivel histórico, según la siguiente tabla.

Tipología Estructural	Equipos críticos	Daños típicos principales observados	Otros posibles daños
Recipientes delgados	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Columnas de destilación ☐ Hornos ☐ Chimeneas ☐ Reactores 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Fuga de líquido en juntas embridadas ☐ Fallas en barras de anclaje 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Vuelco
Estructuras apoyadas en superficie	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Tanques fijos ☐ Tanques con techo flotante 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Fallo de superficie lateral en soldaduras ☐ Fallas tipo pata de elefante ☐ Pandeo laminar de paredes de tanque ☐ Asentamiento de superficie de apoyo ☐ Impacto de Fluido en movimiento con techo o pared lateral 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Elevación de base ☐ Rebose ☐ Incendio por rebose
Estructuras apoyadas en columnas	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Tanques esféricos ☐ Hornos ☐ Tanques criogénicos 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Colapso de la estructura debido a falla por cortante en las columnas ☐ Colapso de chimeneas ☐ Desprendimiento de tuberías internas ☐ Desprendimiento de material refractario interno 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Fuga de material por tuberías ☐ Incremento de temperatura de la pared del horno
Sistema de tuberías y estructuras de apoyo	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Pórtico de concreto armado o acero 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Colapso por esfuerzos excesivos 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Daño en equipos soportados (tanques, tuberías, etc.)

Tabla 11. Clasificación de estructuras en plantas petroquímicas.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

Según el manual GSEDPF, el Procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente es apropiado en la mayoría de los casos, ya que determina las fuerzas cortantes en las bases de la estructura, que dependen de la ubicación (características de la zona), importancia y geometría del equipo. También este procedimiento permite estimar algunas propiedades de las estructuras como los periodos de vibración, fuerzas equivalente laterales en la estructura, resistencia al vuelco, asentamiento, etc. Sin embargo, el Análisis Dinámico permite obtener resultados más refinados, aunque con más tiempo de procesamiento de información.

También se indica que en el procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente y Análisis Dinámico se hacen algunas asunciones como la uniformidad en la distribución de

masas, igualdad en los centros de masas y rigideces de cada nivel de las estructuras. Siendo estas condiciones ideales, sin embargo, muy cercanas a la realidad.

4.2.2. Vulnerabilidad sísmica de la refinería en estudio

La vulnerabilidad sísmica de la refinería implica conocer las características del sitio donde ésta se ubica, para conocer la demanda sísmica los que está sometida sus componentes estructurales.

La demanda sísmica se representa mediante un espectro de respuesta (en este caso aceleración espectral). La guía usada de referencia (*Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas*) usa el espectro definido por el ASCE-7, que corresponde a la región de los Estados Unidos de América; siendo ésta diferente a las condiciones del Perú, que ya define su propio espectro de respuesta en la norma E.030: Diseño Sismorresistente (SENCICO, 2018).

Comparando ambas normativas, usando la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte (V_s), que según se indica en subcapítulo 4.1.2 Microzonificación de Lurín (CISMID, 2013) es de 340 m/s, se clasifica acorde se indica en las Tabla 12 y Tabla 13.

Clase de Sitio	V_s (m/s)
A. Roca muy dura	> 1524
B. Roca	762 a 1524
C. Suelo muy denso y roca blanda	366 a 762
D. Suelo firme	183 a 366
E. Suelo arcilloso blando	< 183

Tabla 12. Clasificación de sitio.

Fuente: ASCE 7-16, 2016.

Clasificación de perfil de suelo	V_s (m/s)
So. Roca dura	> 1500
S1. Roca o suelos muy Rígidos	500 a 1500
S2. Suelos intermedios	180 a 500
S3. Suelos blandos	< 180
S4. Condiciones excepcionales	--

Tabla 13. Clasificación del perfil de suelo.

Fuente: E.030, 2018.

Con cada clasificación obtenida, se generan los espectros de aceleración para cada norma con el fin de compararlas (Figura 38 y Figura 39). Se puede observar una diferencia significativa en los valores máximos, para el ASCE 7-16 se tiene $S_{DS} = 1.02$ y para la norma E.030, un valor máximo de $S_{DS} = 1.19$. De aquí se puede notar que la norma peruana es más crítica en cuanto a valores de aceleraciones esperadas.

Dado lo detallado anteriormente, en esta tesis se usará el espectro de la norma E.030 adaptándola al procedimiento de uso del manual *Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas* (Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities, [TCSEDPF,2011]).

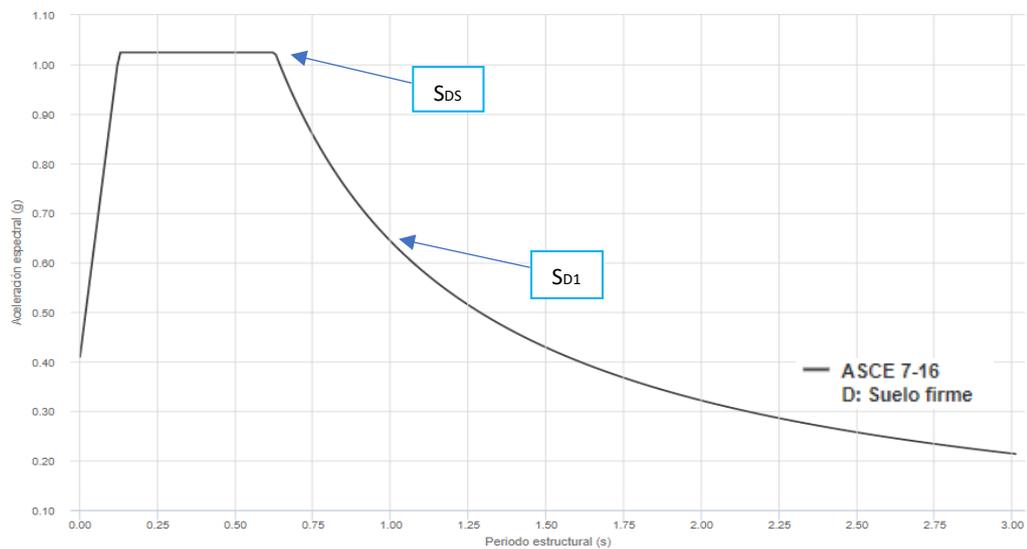


Figura 38. Espectro de respuesta ASCE 7-16 para el lugar de estudio.

Fuente: ASCE 7-16, 2016.

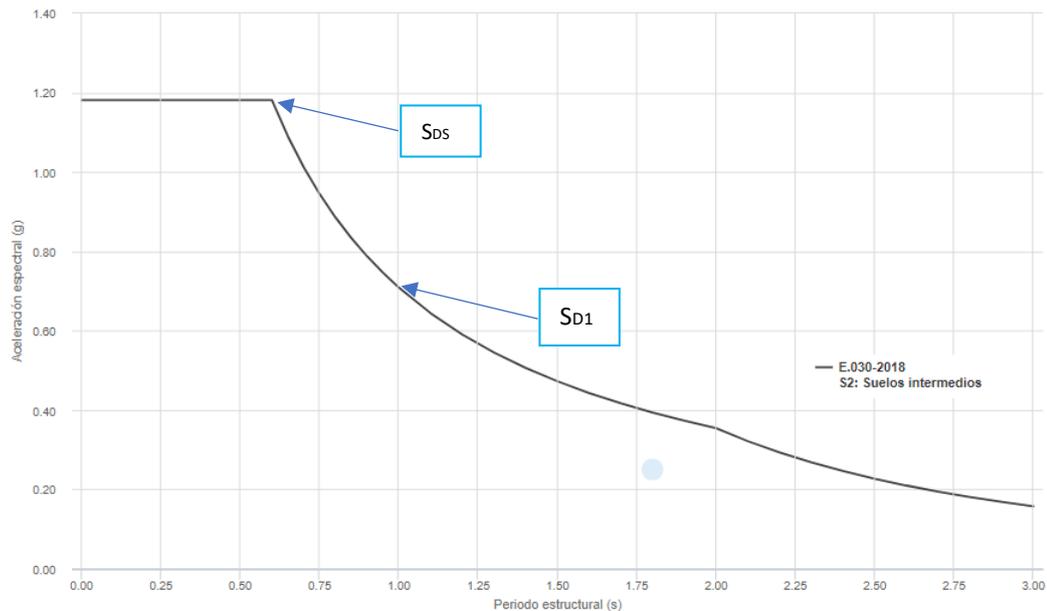


Figura 39. Espectro de respuesta E.030 para el lugar en estudio.

Fuente: SENCICO, 2018.

Existe, sin embargo, un aspecto que diferencia a ambas normativas. En el manual usado se presentan valores específicos de Factor de Reducción de Respuesta (R) para el estudio de muchas estructuras (ejemplo Tabla 14), mientras que la normativa peruana se limita a designar valores de R solo para determinados sistemas estructurales (edificaciones). Esto representa una restricción en la normativa peruana para cuando se desee analizar estructuras industriales como tanques metálicos, tanques de concreto armado o incluso cualquier estructura de una planta industrial.

La elección de un valor de R , por definición no cambiará la aceleración del suelo, sino que influirá en el nivel de diseño o revisión de la estructura, por lo que diferentes normativas podrían presentar valores diferentes de R para una misma estructura estudiada.

Por ejemplo, normativas de diferentes países de Sudamérica tienen valores de R propios para estructuras que no son edificaciones, como por ejemplo las normativas de Colombia (Tabla 15) y Chile (Tabla 16).

En estos casos, es correcto usar la demanda que especifica la norma E.030, y al no tener valores de R para este caso de estudio, conviene referenciar valores de otras normativas (Korafí E, 2023). En ese sentido, tal como realizan muchos profesionales del país, en esta tesis se usarán los valores proporcionados por el *Lineamientos para la*

Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas (TCSEDPF, 2011) y el API 650 (API, 2007), según sea la estructura que se quiera estudiar.

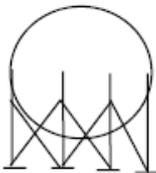
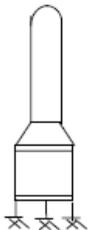
Tipo de estructura/equipo	Componentes	R
Recipiente sobre patas arriostradas/sin arriostres		
Esféricos (sin viga superior ni anillo de refuerzo) 	Esfera con marco arriostrado	3.0
Hornos cilíndricos, recipientes verticales o tolvas en volados o patas arriostradas (sin viga superior ni anillo de refuerzo) 	Patas reforzadas de acero Patas voladizas de acero Voladizo de hormigón	3.0 2.0 2.0

Tabla 14. Ejemplos de valores de R para estructuras específicas.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

Tipo de estructura	Valor de R_0
Tanques, contenedores de líquidos y gases a presión, apoyados sobre columnas arriostradas, con diagonales o no.	2.0
Silos y chimeneas de concreto reforzado vaciado en sitio, cuyas paredes son continuas hasta la fundación.	3.5
Estructuras en forma de torre cuya masa está distribuida en la altura, tales como chimeneas, silos y tanques, cuyos apoyos consisten en faldones.	3.0
Torres en celosía, autoportantes o con templetes, chimeneas y torres con templetes.	3.0
Estructuras de tipo péndulo invertido.	2.0
Tolvas sobre columnas, con o sin contravientos.	3.0
Torres de enfriamiento.	3.5

Tipo de estructura	Valor de R_o
Torres o anaqueles de enfriamiento.	3.0
Avisos y vallas publicitarias.	3.5
Monumentos y estructuras de parques de diversión.	2.0
Otras estructuras autoportantes, no incluidas anteriormente	3.0

Tabla 15. Coeficiente de capacidad de disipación de energía R_o para estructuras especiales en normativa NSR-10

Fuente: MAVD, 2010.

Sistema resistente	Valor de R
Chimeneas, silos y tolvas con mantos continuos hasta el suelo.	3.0
Silos, Tolvas, estanques apoyados sobre columnas, con o sin arriostamiento entre columnas.	4.0
Estanques de acero de eje vertical con manto continuo hasta el suelo.	4.0
Estanques de hormigón armado de eje vertical con manto continuo hasta el suelo.	3.0
Estanques y ductos de materiales sintéticos compuestos (FRP, GFRP, HDPE y similares).	3.0
Recipientes horizontales apoyados sobre cunas con anclajes dúctiles.	4.0

Tabla 16. Valores máximos del factor de modificación de respuesta R en normativa NCH236-03.

Fuente: Minvu, 2003.

Se estudiarán los equipos principales de la refinería, y de acuerdo con la metodología elegida, conviene hacer el análisis individual de las siguientes estructuras: tanques, torres de destilación, hornos, zonas estancas y líneas de conducción. Esto debido a que son elementos importantes en el proceso de refinación e involucran gran cantidad de hidrocarburos en procesamiento.

4.2.2.1. Vulnerabilidad de tanques

Los tanques de almacenamiento apoyados sobre el suelo son muy usados en plantas petroquímicas. La experiencia nacional e internacional demuestra que estos tanques son muy vulnerables a fuertes movimientos del suelo, lo cual genera fallos en su estructura pudiendo causar volcamientos y/o derrames del material que almacenan.



Figura 40. Tanque apoyado sobre el suelo en refinería.

Fuente: CIME Ingenieros, 2022.

El Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute [API], 2007) define colapso estructural como la disminución de la resistencia de la estructura ocasionado por factores internos o externos, lo que conlleva a pérdida de funciones, incapacidad de operación y/o destrucción.

De por sí, el colapso estructural puede tener varios orígenes, como los mostrados en la Tabla 17, la causa principal de estudio de esta tesis es por riesgo natural.

Causa de colapso	Origen
Errores de cálculos	<input type="checkbox"/> Mal dimensionamiento <input type="checkbox"/> Sobrecargas mal estimadas, etc.
Defectos de construcción	<input type="checkbox"/> Calidad mala del material <input type="checkbox"/> Ejecución defectuosa, etc.
Falta de mantenimiento	<input type="checkbox"/> Filtraciones de fluidos no reparadas <input type="checkbox"/> Corrosión
Cambios de uso	<input type="checkbox"/> Incremento de cargas <input type="checkbox"/> Cambios en los tipos de fluidos de trabajo, etc.
Riesgos naturales	<input type="checkbox"/> Terremotos <input type="checkbox"/> Deslizamientos <input type="checkbox"/> Socavación de terrenos, etc.
Riesgos antrópicos	<input type="checkbox"/> Obras que afectan la funcionalidad, impactos <input type="checkbox"/> Explosiones, etc.

Tabla 17. Causas de colapsos por origen.

Fuente: API, 2007.

La reducción de la capacidad de los tanques durante un movimiento sísmico se da por la aparición de esfuerzos en las paredes laterales, bases y techos. Además, se generan momentos de volteo que deben ser resistidos por los esfuerzos de compresión y tensión en las paredes metálicas. Los terremotos también pueden generar altos esfuerzos en los anclajes de la base de los tanques y esto puede generar deslizamientos o levantamientos que pueden romper las tuberías de transporte del combustible.

Por otro lado, el combustible almacenado en el tanque tiende a chapotear durante el movimiento sísmico, lo que puede causar daños sobre el techo y la cubierta superior (Tang y Veletsos, 1990).

Históricamente, los fallos más comunes observados en tanques metálicos después de un terremoto son los siguientes:

a) Pandeo elasto-plástico de las paredes laterales.

Se pueden dar de 2 tipos: (i) Pandeo tipo diamante. Esta falla se presenta por la formación de presiones internas que logran producir tensiones circunferenciales en zonas puntuales. Se presenta por deficiencia en la construcción del tanque, cuando se forman imperfecciones asimétricas no visibles o también cuando el tanque ha sido sometido a acciones puntuales como vientos, golpes, picaduras de corrosión; y (ii) pandeo tipo patas de elefante. Es otro pandeo común que se desarrolla por sometimiento de acción sísmica ya que se generan grandes esfuerzos internos en la pared del tanque. Se genera con esfuerzos circunferenciales cercanos al esfuerzo de fluencia del acero combinados con esfuerzos de compresión axiales bajos. Tiene gran influencia en esta falla la componente vertical de la aceleración del suelo que afecta también a la base del tanque, ya que genera momentos por las presiones hidrodinámicas sobre las paredes.

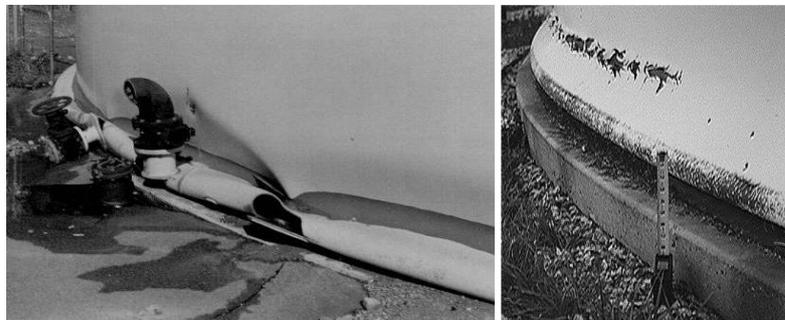


Figura 41: Tipos de pandeo elasto plásticos.

Nota: Pandeo tipo diamante (izquierda) y tipo pata de elefante (derecha).

Fuente: Praveen et al, 2000.

b) Fallo de los techos de los tanques y sus uniones.

Este tipo de fallos se producen por el movimiento convectivo del fluido (hidrocarburos o derivados) que almacenan los tanques. Durante los sismos, se generan olas y pueden golpear el techo del tanque, este movimiento sucesivo puede romper la unión del techo con las paredes laterales del tanque. En el diseño del tanque, se debe considerar una altura libre para el movimiento libre del fluido (Porush et al, 2005).



Figura 42. Colapso de techo flotante en tanques en terremoto Tokachi Oki (2003).

Fuente: Paolacci et al, 2012.

c) Deslizamiento por falla en soldaduras de placas de la base.

El fondo de los tanques consiste en una serie de planchas metálicas soldadas apoyadas sobre una cimentación y sobre el suelo. El movimiento sísmico en su vaivén puede generar esfuerzos en estas placas y afectar la soldadura produciendo agujeros por los que puede filtrar el combustible. En estas zonas se producen goteos que afectan la cimentación haciendo que el tanque se asiente y/o deslice por el efecto del peso del fluido.



Figura 43. Deslizamiento de tanques por fuerza sísmica.

Fuente: Pascal & Varma, 2015.

d) Asentamientos y fractura local en la base.

Los tanques metálicos, por sus dimensiones, son estructuras casi flexibles y pueden soportar asentamiento, mayores que otras estructuras civiles. Según el API, estos asentamientos deben ser controlados desde su diseño. Durante un movimiento sísmico, el suelo puede experimentar asentamientos irregulares, lo que puede generar: (i) asentamientos absolutos del tanque, (ii) asentamientos diferenciales, que provocan tensiones sobre los ductos de conexión con el tanque, (iii) asentamiento diferencial que provoca tensiones sobre las paredes laterales, etc.



Figura 44. Fallas de tanques por asentamiento, terremoto Kobe 1995.

Fuente: Compagnoni et al, 2012.

e) Volcamientos.

Se origina por la aparición de un momento de vuelco (sobre la parte superior, producto del movimiento unisonó del fluido que se almacena y el suelo acelerado) que es mayor del momento resistente. La resistencia al momento del vuelco la proporciona el peso de las paredes del tanque, techo, base y una parte del fluido (porción de masa impulsiva). Este tipo de fallo es el más peligroso, ya que implica la pérdida total del contenido, pudiendo afectar a los equipos cercanos; además de poder provocar incendios y liberación de vapores al ambiente.



Figura 45. Volcamiento de tanque en refinería RECOPE, Costa Rica, 1991.

Fuente: Praveen et al, 2000.

Para analizar la incidencia de cada fallo mostrado anteriormente, se puede hacer referencia a un estudio realizado por Hosseinzadeh (2008), quien hizo un inventario y analizó la vulnerabilidad sísmica de 180 tanques afectados por terremotos en refinerías de los Estados Unidos de América, el porcentaje de cada fallo se muestra en Tabla 18. El autor recomienda aplicar estas estadísticas en países de similar actividad sísmica. Se observó que varios modos de fallo se pueden presentar simultáneamente en un tanque.

No.	Modo de falla	Porcentaje de vulnerabilidad
1	Levantamiento de la base	4%
2	Deslizamiento	6%
3	Asentamiento diferencial	8%
4	Daño en techo	36%
5	Volcamiento	20%
6	Pandeo elasto plástico	52%

Tabla 18. Resumen del análisis de vulnerabilidad de tanques estudiados.

Fuente: Hosseinzadeh, 2008.

En la refinería que es caso de estudio en esta tesis, ya se tiene evidencia de fallas en tanques de almacenamiento. En palabras de Morán et al (1975) se menciona que, durante el terremoto del año 1974 en Lima, se registró el desprendimiento del fondo de un tanque al levantarse la estructura lateral por el movimiento sísmico. A decir de Delgado (1977), se registraron fallas en 2 tanques de almacenamiento, uno falló en la parte inferior y otro derramó combustible al fallar su techo por el brusco movimiento del terreno.

En el subcapítulo 3.4.3 se hizo una revisión de los tanques con los que cuenta la refinería en estudio y se observa que el tanque más crítico (el que más combustible almacena) es el N°69 de 160 000 barriles (25 600 m³) del tipo metálico y apoyado sobre el suelo.



Figura 46. Tanques de mayor capacidad en refinería.

Fuente: Google, 2023.

De lo visto en la Tabla 18, se estudiará la vulnerabilidad por las fallas más comunes, que son el volcamiento y pandeo lateral elasto plástico (pata de elefante). El manual *Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas*, para estudiar tanques, recomienda usar el Procedimiento de Fuerzas Equivalentes, que se basa en expresiones del API 650. Esto debido a que la masa de los tanques y la del fluido que almacenan permanecen casi constantes con el tiempo.

a) Verificación de estabilidad por volteo

En este caso se deben estudiar el comportamiento del tanque mediante el cálculo de sus periodos impulsivo y convectivo. Se define el periodo impulsivo como el tiempo de movimiento del volumen del fluido que se mueve rígidamente con el mismo tanque, y el periodo convectivo como el periodo del movimiento de la parte del volumen que realizan chapoteos u olas al comportarse como fluidos libres en un movimiento sísmico.

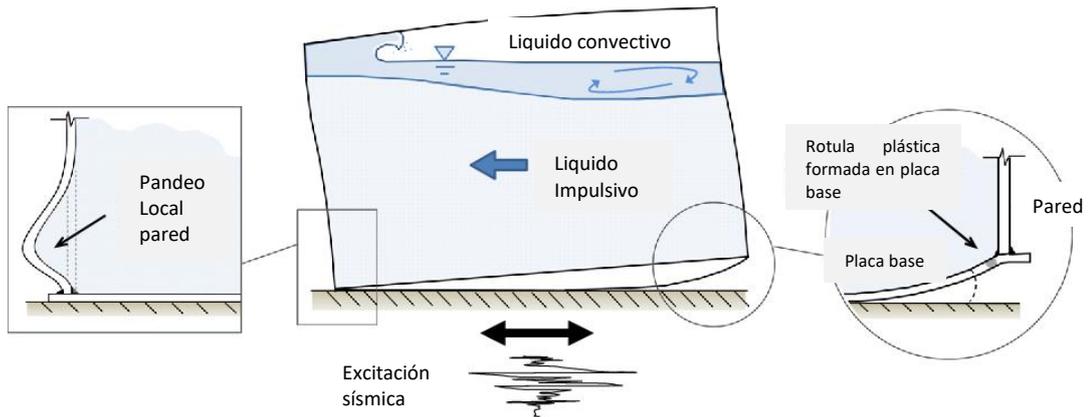


Figura 47. Componentes convectivo e impulsivo en movimiento de tanques.

Fuente: Peek & Jennings, 1988.

Siguiendo la metodología del manual *Lineamientos para la Evaluación Sísmica y el Diseño de Instalaciones Petroquímicas* y del API 650, el periodo impulsivo T_i se puede estimar como:

$$T_i = \frac{C_i * H}{\sqrt{2000} * \sqrt{\frac{t_u}{D}}} * \left(\frac{\sqrt{\gamma}}{\sqrt{E}} \right) \quad (1)$$

Y el periodo convectivo T_c , como:

$$T_c = 1.0404 * \sqrt{\frac{D}{\tanh\left(\frac{3.68 * H}{D}\right)}} \quad (2)$$

Donde:

C_i : Coeficiente para los casos de periodos impulsivos (Figura 48).

H : Nivel máximo del producto almacenado (m).

D : Diámetro externo del tanque (m).

γ : Densidad del fluido almacenado (kg/m^3).

E : Módulo de elasticidad del material de la pared del tanque (MPa).

t_u : Espesor de la pared del tanque (mm).

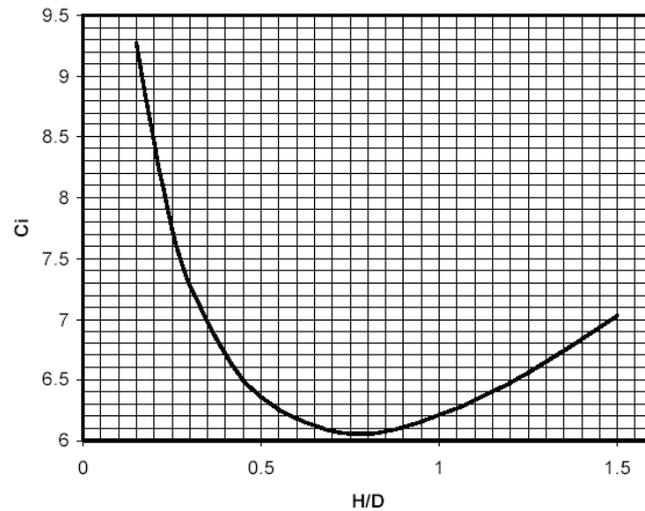


Figura 48. Coeficiente C_i .

Fuente: API 650, 2007.

Aplicando estas expresiones para el caso del tanque N°69, con los valores de geometría y propiedades del fluido siguientes:

$$H = 16.5 \text{ m}$$

$$D = 46.5 \text{ m}$$

$$t_u = 13 \text{ mm}$$

$$E = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 800 \text{ Kg/m}^3, \text{ densidad de gasolina}$$

$H/D = 16.6\text{m}/46.5\text{m} = 0.36$, que según la Figura 48 se tiene $C_i = 7$. Reemplazando en las expresiones (1) y (2) se tiene:

Periodo impulsivo:

$$T_i = \frac{7 * 16.5}{\sqrt{2000} * \sqrt{\frac{13}{46.5}}} * \left(\frac{\sqrt{800}}{\sqrt{200000}} \right) = 0.31 \text{ s}$$

Periodo convectivo:

$$T_c = 1.0404 * \sqrt{\frac{46.5}{\tanh\left(\frac{3.68 * 16.5}{46.5}\right)}} = 7.63 \text{ s}$$

Estos valores indican que el tanque se moverá junto con la masa impulsiva con un periodo de 0.31 s y la masa convectiva se moverá libremente con un periodo de 7.63 s realizando chapoteos.

Se puede estimar la fuerza cortante en la base (V) como:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (3)$$

Donde la componente impulsiva (V_i) de la cortante es determinada como:

$$V_i = A_i(W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (4)$$

Y la componente convectiva (V_c):

$$V_c = A_c W_c \quad (5)$$

Siendo:

$$A_i = S_{DS} \frac{I}{R_{wi}} \quad (6)$$

Y

$$A_c = K \cdot S_{D1} \frac{I}{T_c \cdot R_{wc}} \quad (7)$$

Además:

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{H}\right)}{0.866 \frac{D}{H}} W_p \quad (8)$$

Y

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3.67H}{D}\right) W_p \quad (9)$$

Los términos son:

S_{DS} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral máximo (E0.30).

S_{D1} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral para un segundo (E.030).

T_c : Periodo natural del modo convectivo del comportamiento del fluido (s).

A_i : Coeficiente de aceleración espectral impulsiva (%g).

A_c : Coeficiente de aceleración espectral convectiva (%g).

I : Factor de importancia (Tabla 19).

R_{wi} : Factor de modificación de fuerza impulsiva (Tabla 20).

R_{wc} : Factor de modificación de fuerza convectiva (Tabla 20).

K : Factor para ajustar la aceleración espectral del 5% al 0.5% de amortiguamiento (1.5)

W_s : Peso total de la estructura lateral del tanque y accesorios (kN)

W_r : Peso total del techo del tanque (kN).

W_f : Peso total del fondo del tanque (kN).

W_p : Peso del producto almacenado (gasolina) (kN).

W_i : Porción impulsiva efectiva del peso del fluido (kN).

W_c : Porción convectiva efectiva (chapoteo) del peso del fluido (kN).

Uso		Factor de importancia sísmica para la estructura	Factor de importancia sísmica para componentes
General	Normal	1.0	1.0
	Especial	1.0	1.0
Almacenamiento de materiales peligrosos		1.25	1.5
Esenciales o que contienen una cantidad de materiales peligrosos que exceden un rango indicado		1.5	1.5

Tabla 19. Factor de Importancia (I) para diferentes usos.

Fuente: API 650, 2007.

Sistema de anclaje	Factor de reducción impulsiva (R_{wi})	Factor de reducción convectiva (R_{wc})
Auto anclados	3.5	2.0
Anclados mecánicamente	4.0	2.0

Tabla 20. Factor de modificación de respuesta (R).

Fuente: API 650, 2007.

Del espectro obtenido con la norma E.030 (Figura 39), el valor máximo se representa como $S_{DS}=1.19$ y $S_{D1}=0.7$.

Reemplazando valores para el tanque N°69 (Volumen 25 600 m³) y características de sitio, se tiene:

$$H = 16.5 \text{ m}$$

$$D = 46.5 \text{ m}$$

$$S_{DS} = 1.19 \text{ (obtenido de Figura 39)}$$

$$S_{D1} = 0.7 \text{ (obtenido de Figura 39)}$$

$$T_c = 7.63 \text{ s}$$

$$I = 1.25 \text{ (uso normal, Tabla 19)}$$

$$R_{wi} = 3.5 \text{ (tanque auto anclado, Tabla 20)}$$

$$R_{wc} = 2.0 \text{ (tanque auto anclado, Tabla 20)}$$

$$K = 1.5$$

$$W_s = 1\,235.3 \text{ kN (Aranda, 2011)}$$

$$W_r = 590.4 \text{ kN}$$

$$W_f = 467.8 \text{ kN}$$

$$W_p = \gamma \cdot \text{Vol. g} = (800 \text{ Kg/m}^3)(25\,600 \text{ m}^3 \cdot 80\%)(9.81 \text{ m/s}^2) = 160\,727 \text{ kN.}$$

Reemplazando en ecuaciones (6) y (7) se tiene:

$$A_i = 0.425 \text{ y } A_c = 0.146$$

Usando las ecuaciones (8) y (9) se obtiene:

$$W_i = 64\,865 \text{ kN y } W_c = 89\,835 \text{ kN}$$

Con estos valores se pueden usar las ecuaciones (4) y (5) para determinar:

$$V_i = 28\,543 \text{ kN y } V_c = 13\,116 \text{ kN}$$

Finalmente usando la ecuación (3) se calcula la fuerza cortante en la base (V), que indica la fuerza lateral total como consecuencia de las fuerzas de inercia que se generan en el tanque:

$$V = 31\,412 \text{ kN.}$$

También se puede verificar la estabilidad mediante el análisis del volcamiento durante un movimiento sísmico con las expresiones de George Manos (1993), recomendadas por el manual de referencia.

Las expresiones para el momento de volteo en unidades inglesas son:

$$M_{OT} = 1.29 \rho_w G H^2 R^2 A_i \frac{W_i}{W_p} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.15} \quad (10)$$

Y para el momento resistente:

$$M_{RES} = 1.25 \pi R^3 H g \rho_w G \left(\frac{H}{R}\right)^{0.15} \quad (11)$$

Donde:

H : Altura del fluido en el tanque (ft).

R : Radio del tanque (ft)

ρ_w : Densidad del agua (62.4 lb/ft³).

G : Gravedad específica del fluido almacenado.

A_i : Aceleración impulsiva (en unidades de g).

W_p : Peso del producto almacenado (gasolina).

W_i : Porción impulsiva efectiva del peso del fluido.

g : Aceleración de la gravedad (32.17 ft/s²)

Reemplazando para estos valores de dimensiones, pesos y características del fluido almacenado:

$H = 16.5$ m (54.13 ft).

$R = 46.5/2 = 23.25$ m (76.28 ft).

$\rho_w = 1000$ kg/m³ (62.4 lb/ft³).

$G = 0.8$ (gasolina).

$A_i = 0.425$

$W_p = 160\,727$ kN

$W_i = 64\,865$ kN --> $W_i/W_p = 0.4035$

$g = 9.81$ m/s² (32.17 ft/s²).

En las ecuaciones (10) y (11) los cálculos arrojan:

$$M_{OT} = 178\,833\,255 \text{ lbf.ft (242 MN.m)}$$

$$M_{RES} = 538\,916\,207 \text{ lbf.ft (729 MN.m)}$$

Teniendo $\frac{M_{RES}}{M_{OT}} = 3.01 > 2$, lo que indica que el tanque es estable en estas condiciones de estudio.

b) Verificación de pandeo elasto plástico en las paredes.

Para verificar esta condición se usará un modelo de elementos finitos en el software SAP2000®. Se dimensionan las geometrías, cargas sísmicas y el espectro de respuesta (Figura 39).

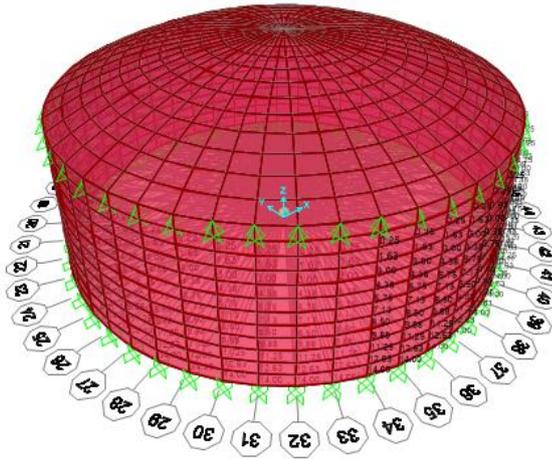


Figura 49. Modelo numérico del tanque en estudio.

Obtenido con SAP2000®.

El valor máximo del esfuerzo a compresión en la pared lateral del tanque (componente S22) se debe comparar con el esfuerzo máximo crítico (F_c) recomendado por el API 650 (API, 2007) en el apéndice E.5.2, según las siguientes ecuaciones:

$$\text{si } \frac{GHD^2}{t_u^2} \geq 44 ; F_c = \frac{83t_u}{D} \quad (12)$$

$$\text{si } \frac{GHD^2}{t_u^2} < 44 ; F_c = \frac{83t_u}{2.5D} + 7.5\sqrt{GH} < 0.5F_y \quad (13)$$

Donde:

F_c : Esfuerzo crítico de pandeo (MPa).

t_u : Espesor del recipiente (mm).

D : Diámetro del recipiente (m).

G : Gravedad específica del fluido almacenado.

H : Altura efectiva del fluido en el recipiente (m).

F_y : Límite elástico del material del recipiente (MPa).

Verificando $\frac{GHD^2}{t_u^2} = \frac{0.8(16.5)(46.5^2)}{130^2} = 1.7 < 44$, por lo que se usará la ecuación

(13) con los valores:

$H = 16.5$ m

$D = 46.5$ m

$t_u = 130$ mm

$G = 0.8$

$$F_y = 250 \text{ MPa}$$

$$\text{Se tiene } F_c = \frac{83 \cdot 130}{2.5 \cdot 46.5} + 7.5 \cdot \sqrt{0.8 \cdot 16.5} = 120 \text{ MPa} < 0.5 \cdot 250 \text{ MPa}$$

Este valor de F_c se debe comparar con el obtenido en el modelo realizado (Figura 50), el cual muestra un valor máximo de $44 \text{ MPa} < F_c$ en la pared inferior. Se observa entonces que, para esta condición de trabajo, el tanque N°69 no presentaría pandeo elasto plástico.

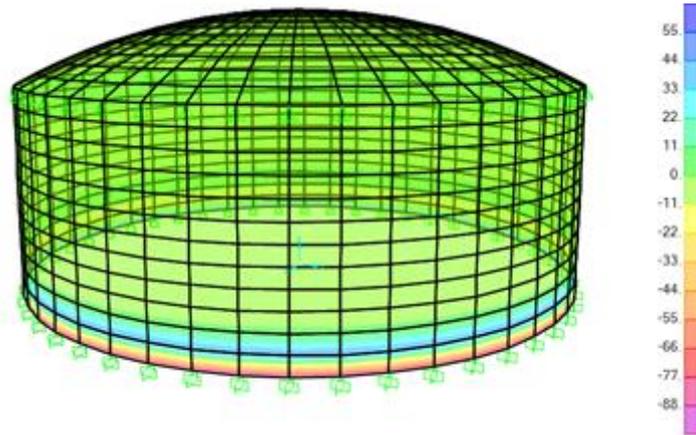


Figura 50. Esfuerzos de compresión en pared lateral de tanque N°69.

Obtenido con SAP2000®.

4.2.2.2. Vulnerabilidad de torres de destilación

Las torres de destilación son recipientes metálicos verticales que trabajan a presión, son apoyados (empernados) sobre una plataforma de cimentación de concreto armado. Su diseño y fabricación esta estandarizada por Sociedad Americana de Ingenieros Mecanicos- Comité de Calderas y Recipientes a Presión (American Society of Mechanical Engineers - Boiler and Pressure Vessel Comitee [ASME-BPVC]) a nivel mundial y su implementación en el Perú por el D.S. N° 051-93-EM del Ministerio de Energía y Minas.

En recipientes delgados como las torres de destilación, históricamente se ha visto que el daño más frecuente que han provocado los terremotos han sido el volcamiento, la falla de los pernos de anclaje en los cimientos y la fuga del fluido por la ruptura de las juntas bridadas en su estructura como los mostrados en las Figura 51 y Figura 52.

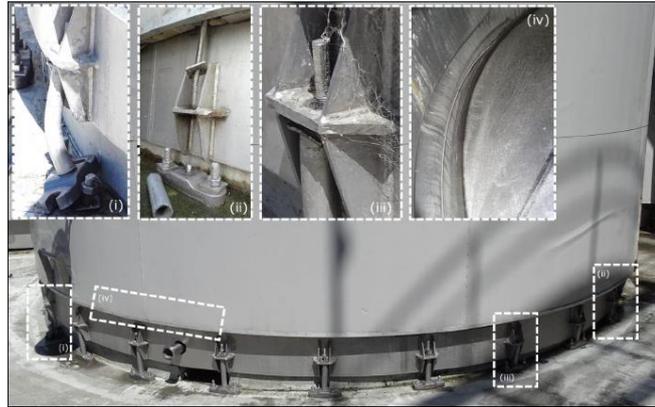


Figura 51. Falla en pernos de anclaje.

Fuente: Dizhur, 2013.

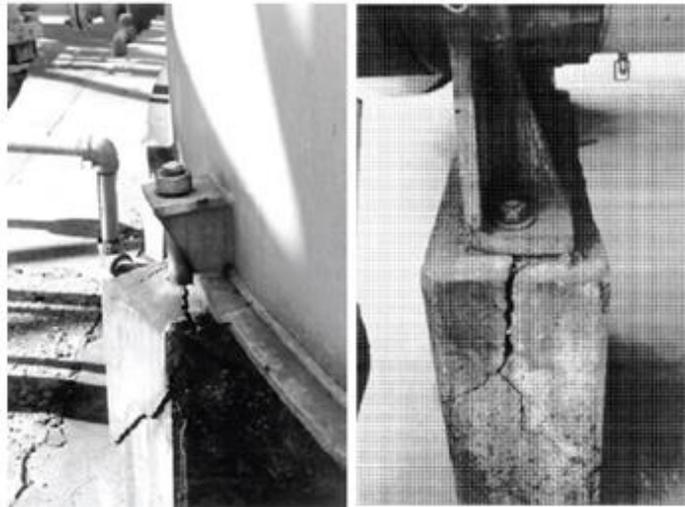


Figura 52. Falla de torres en terremoto de Tupras.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

En la refinería en estudio existen 2 torres de destilación: Torres de Destilación Primaria (TDP) y Torre de Destilación al Vacío (TDV). Se realizará el análisis de vulnerabilidad de la primera ya que es la más grande y que más volumen de fluidos procesa.

Según Goyburo (2012), quien estudio el diseño mecánico y modeló la Torre de Destilación Primaria de esta refinería (Figura 53 y Figura 54), las dimensiones que tiene son:

- Longitud total de estructura = 116 ft (35.4 m).
- Diámetro exterior = 6.56 ft (2 m).
- Espesor de la pared = 0.375 in (100 mm).

□ Peso total de estructura operando = 117 968 lbf (524.7 kN).

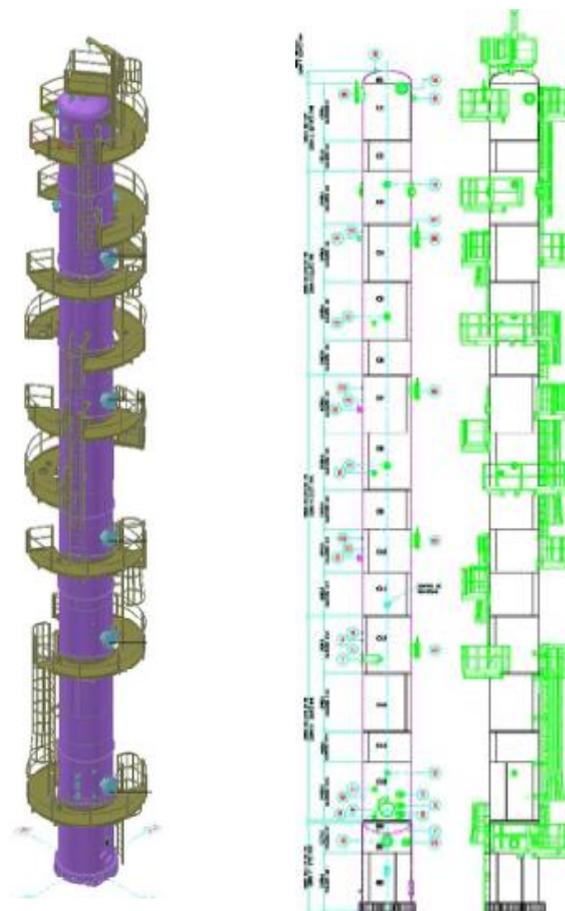


Figura 53. Configuración estructural de la Torre de Destilación Primaria

Fuente: Goyburo, 2012.

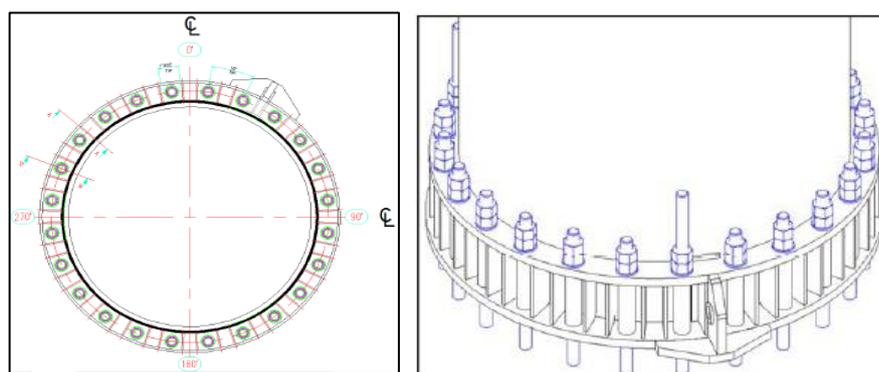


Figura 54. Detalles base de Columna de Destilación Primaria

Fuente: Goyburo, 2012.

El manual GSEDPF 2011 recomienda que, para analizar recipientes delgados como estas torres, se puede realizar el Procedimiento de Fuerzas Equivalentes y el Análisis dinámico como a continuación se detalla.

a) Verificación de estabilidad por volteo

Se pueden calcular algunas características recomendadas por el manual, tal como el periodo del movimiento. Para ello el manual reduce la estructura a condiciones específicas de geometría (Figura 55).

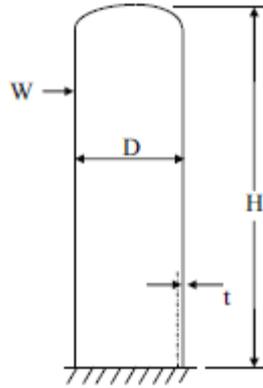


Figura 55. Simbolización simplificada de la torre de destilación.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

El período de la estructura se puede calcular en unidades inglesas, como:

$$T = \frac{7.78}{10^6} * \left(\frac{H}{D}\right)^2 * \sqrt{\frac{12 * Wl * D}{t_u}} \quad (14)$$

Donde:

T : Periodo de vibración (s).

H : Altura de la estructura (ft).

Wl : Peso distribuido de la estructura (lbf/ft).

D : Diámetro (ft).

t_u : Espesor de la pared (in).

Reemplazando los siguientes valores en la ecuación (14).

$H = 116$ ft (35.35 m).

$Wl = 117968$ lbf/116 ft = 1017 lbf/ft (14.60 N/m).

$D = 6.56$ ft (2 m).

$t_u = 3/8$ in (9.525 mm).

Se tiene como periodo fundamental de movimiento

$$T = \frac{7.78}{10^6} * \left(\frac{116}{6.56}\right)^2 * \sqrt{\frac{12 * 1017 * 6.56}{0.375}} = 1.2 \text{ s}$$

También, la fuerza cortante en la base V (en unidades inglesas lbf), se puede estimar como:

$$V = 0.33 * S_{DS} * I * W \quad (15)$$

Donde:

S_{DS} : Parámetro de aceleración espectral en el rango de periodo corto (Figura 39).

I : Factor de importancia (Tabla 20).

W : Peso sísmico total de la estructura.

Siendo los datos:

$$S_{DS} = 1.19$$

$$I = 1.25$$

$$W = 117\,968 \text{ lbf} * 1.25 = 147\,460 \text{ lbf} \text{ (655.9 kN)}$$

Reemplazando en la ecuación (15) se tiene el valor de la fuerza cortante V , que indica la resistencia interna de la torre de destilación a una fuerza sísmica de la zona.

$$V = 0.33 * 1.19 * 1.25 * 147\,460 = 72\,384.4 \text{ lbf} = 72.4 \text{ Kip} = 322 \text{ kN}$$

Ahora se modelará la estructura usando software SAP2000® para calcular el momento de vuelco en la torre de destilación. Se puede modelar como un recipiente delgado, unido por pernos en su base. Tomando como base el estudio realizado por Linares y Pantoja (2016) conviene modelar a la estructura en 4 partes: fundación, pernos, base y cuerpo.

Se usará el espectro de respuesta elástico obtenido anteriormente (Figura 39) y las combinaciones de carga recomendadas por el API 650-2007 correspondiente de $CM+CV+0.7S$, donde CM =peso de la estructura, CV =cargas vivas (25% máximo del peso de la estructura) y S =efecto de la carga sísmica.

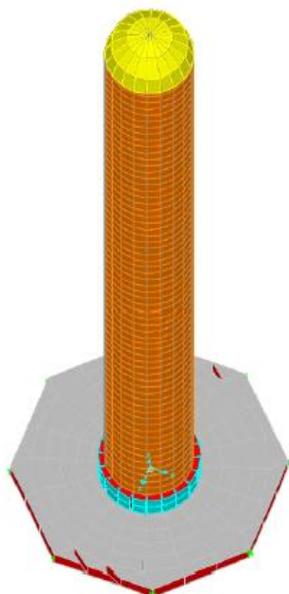


Figura 56. Modelo en elementos finitos de la Torre de Destilación.
Obtenido con SAP2000®.

Del modelo realizado se tienen los siguientes resultados:

TABLA: Reacción en la base								
OutputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
SX	LinRespSpec	Max	2740.2	0.0081	6.287E-05	0.0023	12633.3	0.006
COMB1	Combination	Max	3163.6	0.0035	3.270E+03	0.0006	32962.2	0.008
COMB1	Combination	Min	-3163.6	-0.0064	3.270E+03	-0.0006	-32962.2	-0.008

Tabla 21. Reacción en la base.
Obtenido con SAP2000®.

El momento actuante es:

$$Mz = Fz * y \quad (16)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 21 en la Ecuación (16) :

$$Mz = 3.27 * 10^3 * \frac{2}{3} * 35.35 = 77\ 063\ kN.m$$

El factor de seguridad es:

$$FS = \frac{Mz}{My} \quad (17)$$

Reemplazando se tiene $FS = \frac{77063}{12633} = 6.1 > 2$; por lo que, para estas condiciones

de aceleración no se presentaría vuelco.

b) Análisis de rotura de pernos por tracción

Hallamos la fuerza cortante en la base, conviene usar el método de Fuerzas Equivalentes (estático) ya que, en un análisis Dinámico, los pernos trabajarán en tracción y compresión, lo cual no es cierto del todo (Linares y Pantoja, 2016). Los pernos se modelan como unos resortes, mediante la asignación de la función spring se logra este efecto en el software SAP2000®. La constante de estos resortes (para pernos de 3 pulgadas de diámetro) será:

$$Kp = \frac{Ap * Ep}{Lb} \quad (18)$$

Donde:

Ap = Sección transversal de cada perno (m^2).

Ep = Modulo elasticidad del material del perno (kN/m^2).

Lb = Longitud pernos anclados (m).

Reemplazando en la ecuación (18) los siguientes valores:

$$Ap = 0.00456 m^2$$

$$Ep = 210\,000\,000 kN/m^2$$

$$Lb = 0.25 m$$

Se tiene $Kp = 3\,830\,400 kN/m$, lo cual se introduce al modelo realizado tal como lo mostrado en la Figura 57.

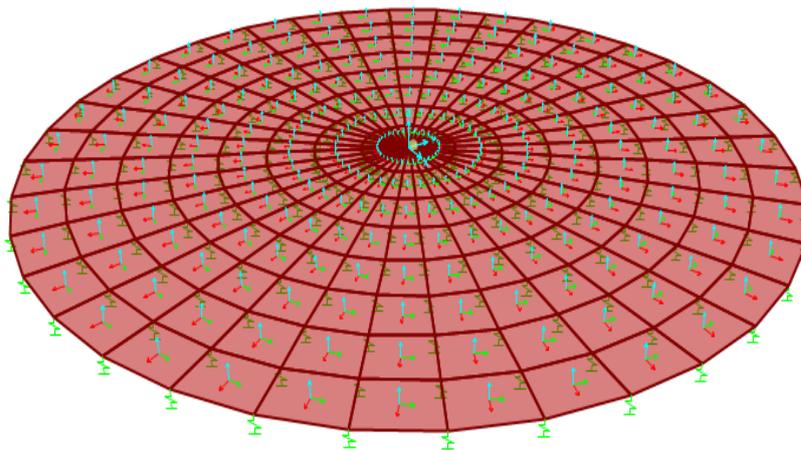


Figura 57. Modelación de pernos como elementos resortes.

Obtenido con SAP2000®.

Los valores de reacción obtenidos son:

Punto	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	Text	kN	kN	kN
227	pernos	NonStatic	Max	0.0	395.18	-2260.7
227	pernos	NonStatic	Min	0.0	395.18	-2260.7
227	COMB2	Combination		0.0	3.85	13.3
228	pernos	NonStatic	Max	0.0	-40.63	-599.2
228	pernos	NonStatic	Min	0.0	-40.63	-599.2
228	COMB2	Combination		0.0	4.46	11.1
229	pernos	NonStatic	Max	0.0	16.35	-1912.2
229	pernos	NonStatic	Min	0.0	16.35	-1912.2
229	COMB2	Combination		0.0	3.62	6.2
230	pernos	NonStatic	Max	0.0	10.78	79.2
230	pernos	NonStatic	Min	0.0	10.78	79.2
230	COMB2	Combination		0.0	3.34	9.7
231	pernos	NonStatic	Max	-828.8	672.30	-2842.0
231	pernos	NonStatic	Min	-828.8	672.30	-2842.0
231	COMB2	Combination		13.9	3.61	13.6
232	pernos	NonStatic	Max	0.0	21.12	1550.2
232	pernos	NonStatic	Min	0.0	21.12	1550.2
232	COMB2	Combination		0.0	9.76	11.7
233	pernos	NonStatic	Max	0.0	38.51	-599.0
233	pernos	NonStatic	Min	0.0	38.51	-599.0
233	COMB2	Combination		0.0	2.61	10.1
234	pernos	NonStatic	Max	0.0	97.53	2299.0
234	pernos	NonStatic	Min	0.0	97.53	2299.0

Tabla 22. Valores de reacción para pernos.

Obtenido con SAP2000®.

Se observa que la máxima fuerza en los pernos es $F_p = 672.3$ kN.

También se puede calcular la fuerza de rotura de los pernos (F_r) como:

$$F_r = A * F_u \quad (19)$$

Donde:

A : Área transversal del perno (m^2).

F_u : Esfuerzo de rotura (MPa).

Para los datos:

$$A = 0.00456 \text{ m}^2$$

$F_u = 440 \text{ MPa}$

Reemplazando en la ecuación (19) se tiene $Fr = 2006.4 \text{ kN}$.

Se concluye que, para estas condiciones dinámicas de trabajo, la fuerza máxima en los pernos es de $F_p = 672.3 \text{ kN} < Fr = 2006.4 \text{ kN}$, por lo cual no fallarían.

c) Verificación de pandeo en las paredes

Al igual que en tanques, se debe verificar los esfuerzos máximos de compresión longitudinal recomendados por el API 650, según las ecuaciones (12) o (13). Previamente se verifica que $\frac{GHD^2}{t_u^2} = \frac{0.8(35.4)(2^2)}{100^2} = 0.011 < 44$, por lo que corresponde la ecuación (13).

Reemplazando para los siguientes valores:

$t_u = 100 \text{ mm}$

$D = 2 \text{ m}$

$H = 35.4 \text{ m}$

$G = 0.8$

Usando la ecuación (13) se tendrá el esfuerzo crítico de pandeo (F_c):

$$F_c = \frac{83 * 100}{2.5 * 2} + 7.5\sqrt{0.8 * 35.4} = 1700 \text{ MPa}$$

Mientras que el obtenido en el modelo (Figura 58) corresponde un esfuerzo máximo de 1775.28 MPa. Por lo que, bajo estas condiciones de análisis, la torre de destilación presentará fallas de pandeo por compresión en las paredes

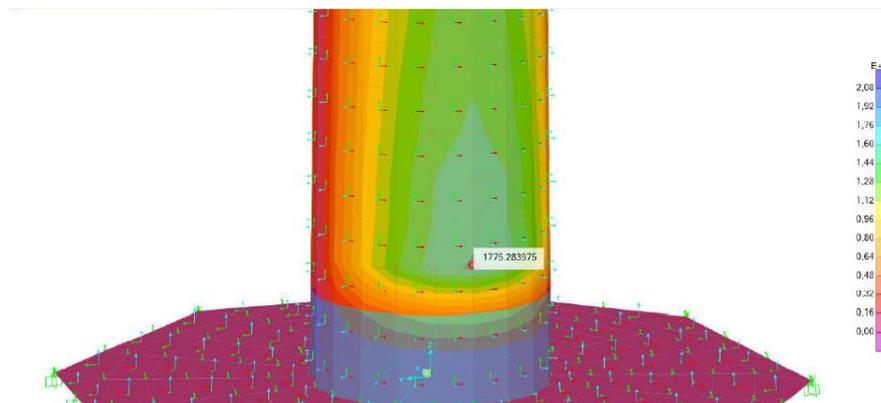


Figura 58. Esfuerzo de compresión en base.

Obtenido con SAP2000®.

4.2.2.3. Vulnerabilidad de hornos

Los hornos son recipientes estructurales metálicos que cuentan con columnas de concreto armado en su base. Históricamente su principal razón de falla ha sido, por ende, el daño en las columnas que las sostienen, tal como se muestran en las imágenes siguientes.



Figura 59. Fallas en bases de hornos, refinería ENAP Chile, terremoto de 2010.

Fuente: ENAP Chile, 2015.



Figura 60. Falla de horno en refinería Tupras.

Fuente: Sezen & Whittaker, 2004.



Figura 61. Detalle de refuerzo en columna base de horno.

Fuente: Sezen & Whittaker, 2004.

En la refinería en estudio se tiene evidencia de fallos en las bases de estas estructuras, a decir de Delgado J. (1977), durante el terremoto de Lima en el año de 1974, se detectaron daños en las columnas y vigas de las bases de los hornos.

Según el manual usado, con el método de Fuerzas Equivalente se tienen algunas expresiones para calcular el periodo de la estructura y fuerza cortante en su base.

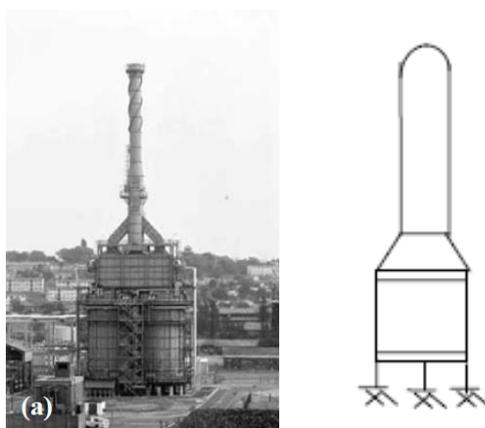


Figura 62. Simplificación de estructura

Fuente: TCSEDPF, 2011.

Periodo de la estructura se puede calcular como:

$$T = 2\pi * \sqrt{\frac{M}{\sum K}} \quad (20)$$

Siendo la rigidez de la base:

$$K = \frac{12EI_e}{H^3} \quad (21)$$

Donde:

T : Periodo de la estructura (s).

M : Masa total de la estructura (kg).

$\sum K$: Sumatorias de las rigideces de los componentes (MN/m).

E : Módulo de elasticidad del material de las bases (MPa).

H : Altura total de la estructura (m).

I_e : inercia efectiva de los pilares, 50% de la inercia bruta (m⁴).

Las características del horno más grande con que cuenta la refinería (de la Unidad de Destilación Primaria), a decir de Canta G. (2011) quien redactó el proceso de montaje de los hornos en la refinería, son: base compuesta por 6 columnas de sección cuadrada de 1.2 m de lado y altura 8m. El diámetro de la estructura metálica del horno es de 7 m (Figura 63).



Figura 63. Vista de estructura de hornos de refinería en estudio.

Fuente: Petroperú, 2023.

Entonces se tiene una inercia efectiva $I_e = \frac{1.2 \cdot 1.2^3}{12} * 50\% * 6 = 0.51 \text{ m}^4$, el módulo de elasticidad para un concreto de 350 kgf/cm^2 (35 MPa) es $E = 15100 * \sqrt{350} = 282\,495 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 27\,713 \text{ MPa}$.

Reemplazando en la ecuación (21) se tiene:

$$\Sigma K = \frac{12 * 27713 * 0.51}{8^3} = 331 \text{ MN/m}$$

Las cargas actuantes se pueden estimar haciendo el metrado respectivo:

Metrado de cargas	
Peso estructura horno	1040.03 kN
Peso base columnas (6 + losa de apoyo)	305.03 kN
Peso accesorio (escaleras, bandejas, tuberías)	230.50 kN
Total (M):	1575.56 kN

Tabla 23. Cargas actuantes en estructura horno.

Usando los siguientes datos:

$$M = 1575.56 \text{ kN} / 9.81 \text{ m/s}^2 = 160\,607.54 \text{ kg}$$

$$\Sigma K = 331 * 10^6 \text{ N/m}$$

$$E = 27\,713 \text{ MPa}$$

$$H = 8 \text{ m}$$

$$I_e = 0.51 \text{ m}^4$$

En la ecuación (20) se tiene $T = 2\pi * \sqrt{\frac{160607.5}{331000000}} = 0.13 \text{ s}$.

También se puede estimar la fuerza cortante en la base de la estructura, para el caso de apoyos con columnas de concreto:

$$V = 0.5 * S_{DS} * I * W \tag{22}$$

Donde:

S_{DS} : Parámetro de aceleración espectral en el rango de periodo corto (Figura 39).

I : Factor de importancia (Tabla 20).

W : Peso sísmico total de la estructura.

Para los valores de:

$$S_{DS} = 1.19$$

$$I = 1.25$$

$$W = (1575.56 \text{ kN}) + (2.45 \text{ kN/m}^2 * (\pi * 7^2 / 4 \text{ m}^2)) = 1670 \text{ kN}$$

Reemplazando en la ecuación (22) se tiene $V = 1242.1 \text{ kN}$.

a) Verificación de capacidad de columnas

Se puede analizar la capacidad de las columnas mediante el diseño del diagrama de interacción, para ello se tendrá un modelo de la sección cuadrada de 1200 mm, con acero de diámetro 38.1 mm en las esquinas y de 30.48 mm en las caras laterales, con 10 barras intermedias por cara, tal como se muestra en la figura siguiente.

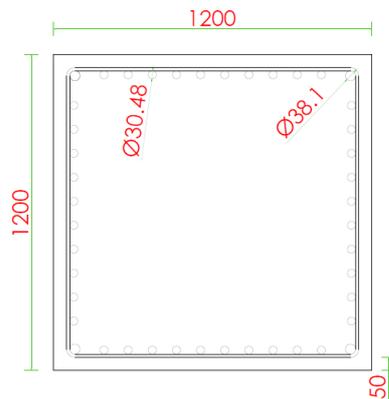


Figura 64. Sección columna base de hornos.

Nota: unidades en mm.

El diagrama de interacción correspondiente a esta sección se muestra en la Figura 66, se aprecia que la columna soporta una resistencia de carga axial en compresión como máximo de 1663 kN y 1239 kN en tracción, además el momento máximo que soporta es de 410 kN-m.

La fuerza de compresión que toma cada una de las 6 columnas (Figura 65) es $1670 \text{ kN} / 6 = 263 \text{ kN}$. El momento actuante de cada columna (M_{ot}) se puede estimar siguiendo la ecuación del manual, como sigue:

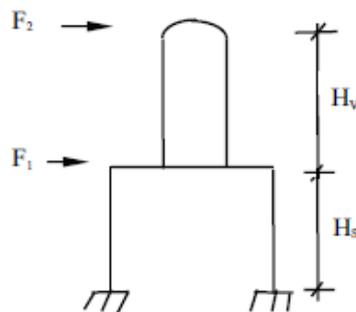


Figura 65. Simplificación de respuestas en el horno.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

$$M_{ot} = F_1 * H_s = \frac{1.2 * S_{DS} * W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} * H_s \quad (23)$$

Con los valores:

$S_{DS} = 1.19$ (Figura 39)

$W_p = 263$ kN

$R_p = 2$ (Tabla 20)

$I_p = 1.5$ (Tabla 19)

$H_s = 8$ m

Reemplazando valores en la ecuación (23) se tiene:

$$M_{ot} = \frac{1.2 * 1.19 * 263}{\left(\frac{2}{1.5}\right)} * 8 = 281.7 \text{ kN.m}$$

Se tiene entonces la coordenada (263 kN ; 281.7 kN.m), que según se aprecia en la Figura 66, con las consideraciones asumidas, las cargas actuantes sobre la estructura pueden ser resistidas por la columna y su refuerzo.

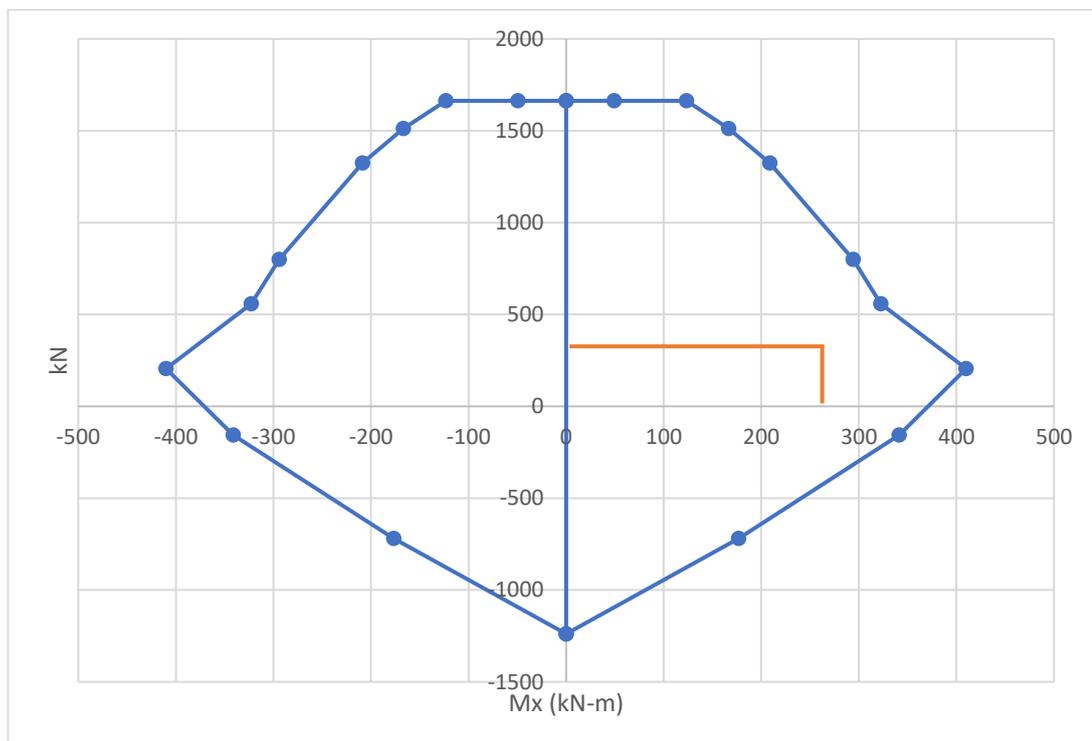


Figura 66. Diagrama de interacción de columna base de horno.

4.2.2.4. Vulnerabilidad de zonas estancas

Las zonas estancas están conformadas por muros de determinada altura y losas impermeables (Figura 67), que tienen por objetivo contener el fluido derramado de los tanques, en caso de colapso de estos. Son de concreto armado, tierra o cualquier material que ayude a soportar las fuerzas hidrostáticas del fluido almacenado. Se diseñan para contener un 110% del volumen almacenado y también para soportar fuerzas sísmicas.

Históricamente no se tiene reportes de fallos por colapso por las fuerzas hidrostáticas o sísmicas, sino por impacto por el volcamiento del recipiente que contienen, es decir, al ser estas en su mayoría de concreto armado son vulnerables a acciones externas y presentan fallas frágiles (Figura 68). Es de allí que actualmente los muros se colocan a una cierta distancia mínima para no ser impactadas por el tanque y una distancia máxima para no generar olas ni chapoteos del combustible vertido (API 650).



Figura 67. Zonas estancas típicas.
Fuente: TCSEDPF, 2011.



Figura 68. Detalle de fallo de muro estanco de un tanque.
Fuente: Geary y Hobbs, 2013.

En la refinería en estudio, todos los tanques tienen zonas estancas (Ver Anexo 1), a continuación, se muestran detalles de construcción de estas zonas estancas.

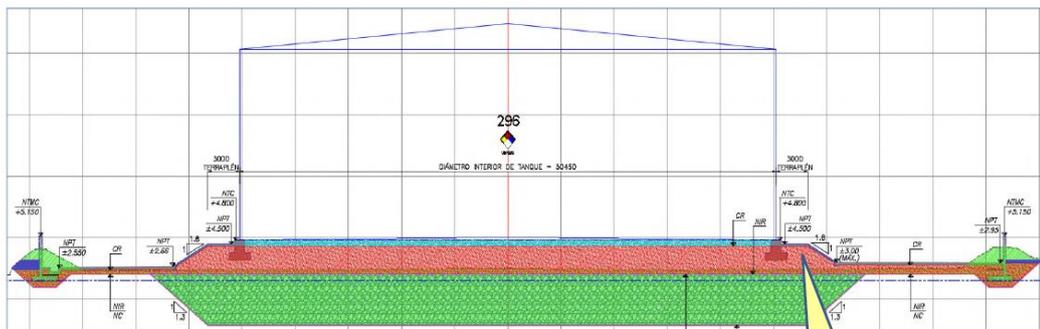


Figura 69. Esquema en elevación de zona estanca.
Fuente: Petroperú e Hispánica de Calderería, 2017.

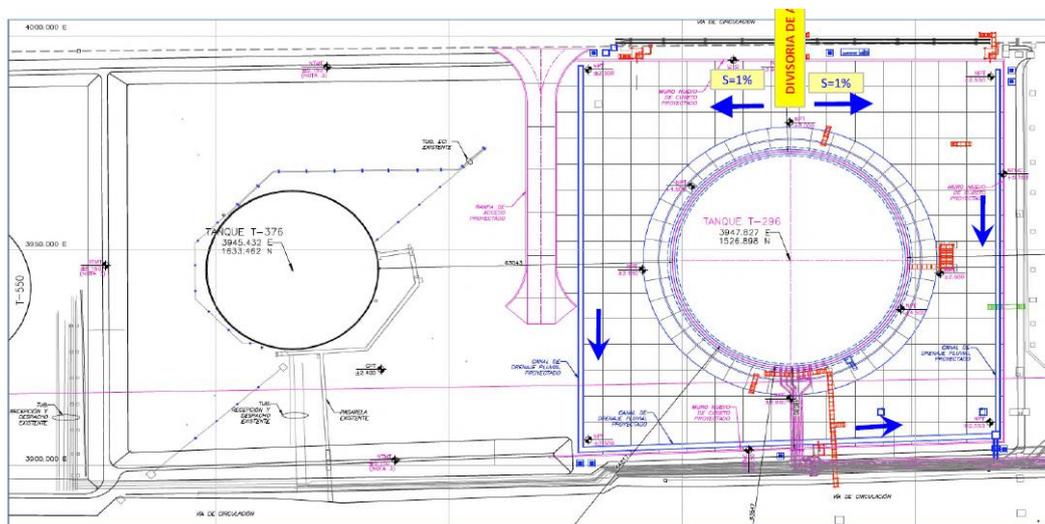


Figura 70. Detalle en planta de zona estanca en refinería.
Fuente: Petroperú e Hispánica de Calderería, 2017.



Figura 71. Detalles de zonas estancas en tanques de refinería.
Fuente: LITOCLEAN, 2020.

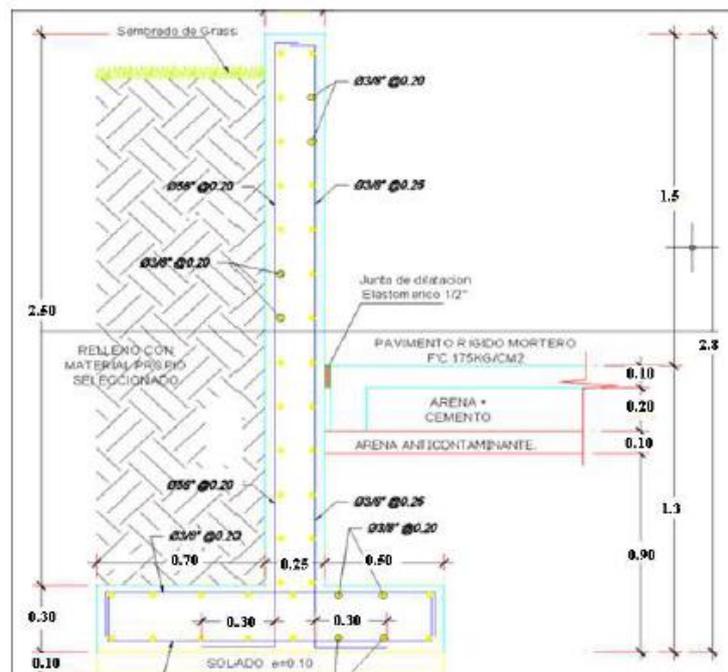


Figura 72. Sección típica dique zona estanca.

Fuente: Carrasco, 2019.

Según la Resolución Directoral N° 0160-2018-OEFA/DFAI emitida por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2018), la refinería en estudio no contaba con diques de contención ni áreas estancas impermeabilizadas en los tanques de almacenamiento N° 1, 2, 3A, 4, 5, 8, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 42, 43, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 70, 72 y 74. En caso de ocurrir un fallo en los tanques por un movimiento sísmico, el fluido vertido no hubiera sido contenido adecuadamente, provocando la expansión del derrame cuesta abajo a las zonas industriales de la refinería. Posteriormente, luego de 210 días, Petroperú cumplió con adjuntar los informes de impermeabilización y contrato de reparación de diques de en total 17 áreas estancas que contienen todos los tanques mencionados.

Haciendo uso del Decreto Supremo N° 052-93-EM, del Ministerio de Energía y Minas (2015), se pueden verificar algunos requerimientos de capacidad de zonas estancas y distancias de seguridad.



Figura 73. Zona estanca de tanques.

Fuente: Google, 2023.

Volumen mayor de tanque = 160 000 barriles = 25 600 m³

Capacidad requerida de zona estancas (V_r) = 110%(25 600 m³) = 28 160 m³

Superficie zona estanca = 17 700 m²

Altura muros = 1.5 m

Capacidad útil de zona estanca (V_u) = 17 700x1.5 = 26 550 m³

Se tiene que $V_u < V_r$, entonces si existe problema en la capacidad de las zonas estancas, es decir ante la falla de un tanque, no podrá contener el volumen derramado.

También, usando el mismo Decreto Supremo N° 052-93-EM (MINEM, 1993), se puede revisar la distancia más cercana de tanques a muros de contención, para evitar que estos sean afectados por el impacto del colapso de tanques. Para ello se tiene el cuadro de distancias mínimas de seguridad (Tabla 24) normado por el Ministerio de Energía y Minas.

Tipo de tanque	Protección	Distancia mínima a linderos de propiedad de terceros donde existan o puedan existir edificaciones (no será menor de 1.5 m)	Distancia mínima al lado más próximo de una vía pública o al edificio importante más cercano de la misma propiedad (no menor de 1.5 m)
Techo flotante	Área protegida	1/2 del diámetro	1/6 del diámetro
	Sin protección	1 diámetro, pero no más de 55m	1/6 de diámetro
Techo fijo con unión debilitadas de techo a pared	Sistema de espuma o de gas inerte en tanque con diámetro menor de 45 m	1/2 del diámetro del tanque	1/6 del diámetro
	Área protegida	diámetro del tanque	1/3 del diámetro
	Sin protección	2 diámetros, pero no más de 110m	1/3 del diámetro
Vertical u horizontal con válvula de alivio a 0.175 kg/cm	Sistema de gases inerte o de espuma en tanques verticales	1/2 veces Tabla (6)	Especificaciones especiales
	Área protegida	Especificaciones especiales	Especificaciones especiales
	Sin protección	Especificaciones especiales	Especificaciones especiales

Tabla 24. Distancias mínimas para tanques.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 1993.

Este caso es para tanques de techo flotante y con área protegida, donde según la Tabla 24, debe ser 1/6 del diámetro, que es igual a $1/6 * (46.5 \text{ m}) = 7.75 \text{ m}$ y debe ser mayor que 1.5 m. En la Figura 74 se tiene que la distancia real (8.0 m) supera por poco la mínima obligatoria.



Figura 74. Distancia mínima entre tanque y muro de contención de zona estanca.

Fuente: Google, 2023.

4.2.2.5. Vulnerabilidad de las líneas de conducción

Las líneas de conducción, usualmente tuberías enterradas, son muy vulnerables a las fallas del suelo generadas durante el movimiento sísmico. La ocurrencia de fallas en el suelo somete a las tuberías a deformaciones que afectan su integridad tanto en su longitud como en sus uniones. En la vulnerabilidad de las tuberías influyen factores como el tipo de material de la tubería, comportamiento o respuesta de las tuberías, magnitud del movimiento sísmico, condiciones geológicas del terreno, proceso constructivo, antigüedad, ubicación respecto a la zona de falla del suelo, etc.

Desde la perspectiva de la vulnerabilidad sísmica, las tuberías se pueden clasificar como: (i) Continuas, las cuales absorben grandes deformaciones previas a fallar, pudiendo ser de acero dúctil o de polietileno de alta densidad (HDPE). Se les ubica para que trabajen en tracción ya que tienen buena deformación inelástica moviéndose a la par del suelo; por el contrario, el exceso de compresión las hace fallar por aplastamiento local en sus paredes. Y (ii) Segmentadas, son aquellas que se componen de varios segmentos de tuberías unidos entre sí, siendo sus juntas las partes más débiles ante el movimiento del suelo. Las deformaciones y las fuerzas de reacción sísmica son absorbidas por las uniones por lo que a estas zonas se diseñan para ser flexibles y dúctiles.

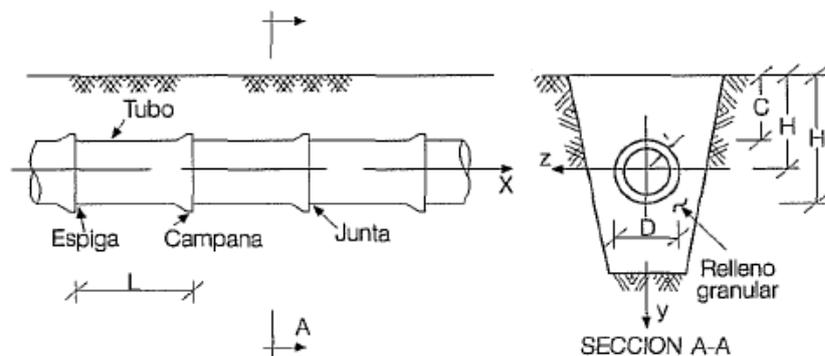


Figura 75. Tubería segmentada.

Fuente: Flores y Vassilev, 1999.



Figura 76. Fallas de líneas de conducción continuas en refinería Izmit.
Nota: Falla por arrugamiento (izquierda) y por pandeo de tubería (derecha).
Fuente: Takada et al, 2001.



Figura 77. Falla de tubería continua, refinería Tupras.
Fuente: European Commission, 2014.



Figura 78. Fuga de combustible por falla, refinería en Estados Unidos.
Fuente: ClockSpring NRI, 2022.

Las principales afectaciones durante un sismo en las tuberías han sido: sobre esfuerzos en las paredes laterales, pandeos, fugas en las juntas y rigidez excesivos. Esto es causado por la interacción con el suelo, que a decir de Galindo (2009) se presentan a manera de:

- a) Flotabilidad: Esto ocurre en los suelos conformados por arenas, generando fuerzas de impulsión verticales contrarias a la gravedad que empujan a las tuberías. El cambio de alineamiento en tuberías causa debilitamiento de paredes, grietas y roturas.

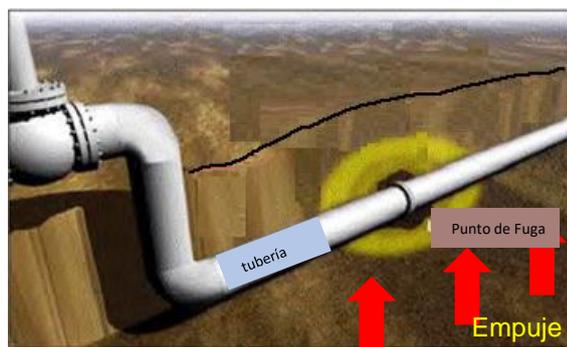


Figura 79. Fallo por flotabilidad en tuberías.
Fuente: Galindo, 2009.

- b) Fallas normales e inversas: Cuando se generan desniveles en el suelo y uno de los lados incrementa o reduce su elevación, provocando flexión y tracción en las tuberías.

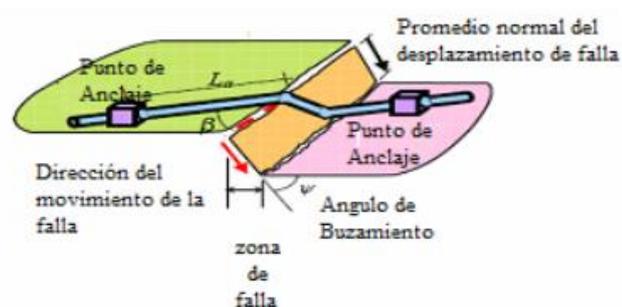


Figura 80. Caso de falla normal.
Fuente: Galindo, 2009.

- c) Fallas laterales: cuando el suelo experimenta desplazamientos horizontales opuestos.

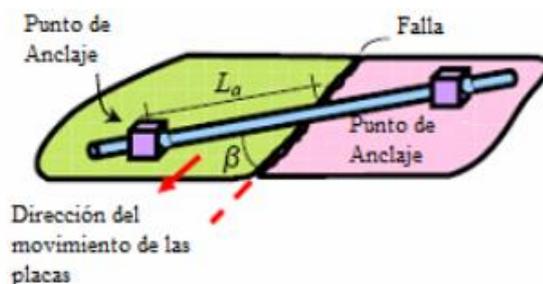


Figura 81. Caso de falla lateral.

Fuente: Galindo, 2009.

d) Deslizamientos: ocurre cuando una porción de suelo en pendiente pierde adherencia y por su propio peso se desliza. Puede tenerse 2 casos:

- Tuberías en la misma dirección del desplazamiento: Se generan esfuerzos axiales de tracción en la tubería en la parte superior (generando rompimiento) y de compresión en la parte inferior.

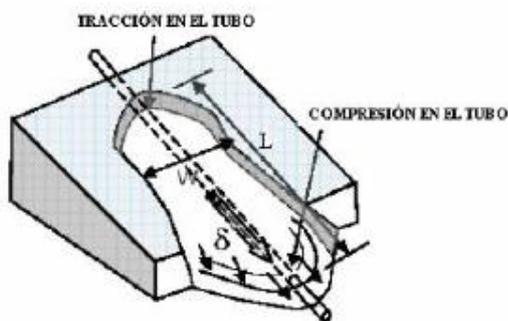


Figura 82. Deslizamientos paralelos de tuberías.

Fuente: Galindo, 2009.

- Tuberías perpendiculares al desplazamiento: Se generan esfuerzos transversales y de flexión en la tubería.

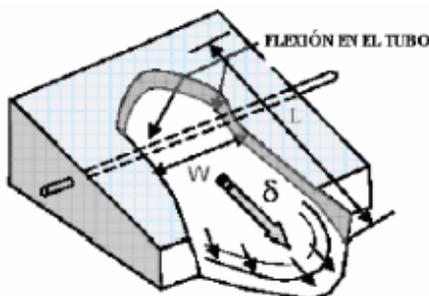


Figura 83. Deslizamiento perpendicular de tuberías.

Fuente: Galindo, 2009.

- Tuberías en diferente posición al desplazamiento: Cuando las tuberías no son perpendiculares ni paralelas al movimiento del suelo se generan combinaciones de esfuerzos axiales, transversales, flexión, entre otros.

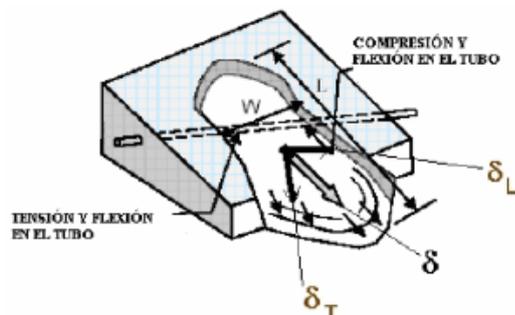


Figura 84. Deslizamiento oblicuo de tuberías.

Fuente: Galindo, 2009.

Para el caso de los ductos no enterrados, que tienen soportes, se les considera con restricción de movimiento o anclados al suelo y se diseñan cuando por razones de limitaciones de espacio o disponibilidad de estructural no se puede enterrar. Estos soportes pueden ser de concreto armado o elementos metálicos con base fija.

La separación de estos apoyos depende de la deflexión máxima permisible de la tubería, además, el tipo de apoyo depende de la restricción al movimiento que se quiere dar a la tubería, por ejemplo, en algunos casos la tubería debe moverse perpendicularmente a su eje longitudinal, otras veces se debe permitir un ligero movimiento vertical, y en algunos casos se requiere fijación por completo.

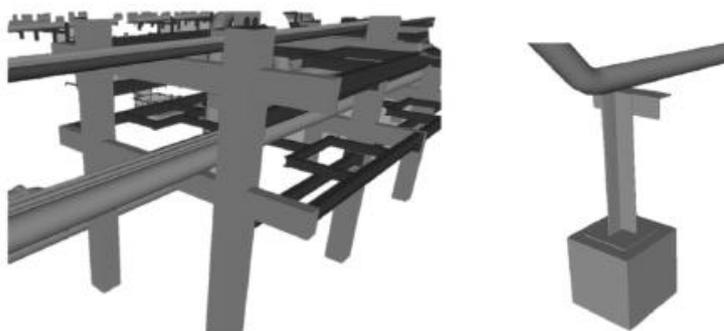


Figura 85. Soporte estructural para tuberías.

Fuente: Montaña, 2016.

Algunas evidencias en el Perú son como las ocurridas tras el sismo de magnitud 8 Mw del año 2019, con epicentro en la localidad de Lagunas, en Loreto. “En la refinería

Talara se reportó una fuga en la tubería del muelle, controlada posteriormente con el apoyo de Capitanía de Puerto y organismo supervisores” (El Gas Noticias, 2019).

En la refinería en estudio, las líneas de conducción son del tipo enterradas y expuestas. Según un informe de levantamiento de tuberías en la refinería en estudio, realizado por Petroperú y TEMA LITOCLEAN (2020), muchas uniones de tuberías y válvulas presentan goteos y fugas que causan pérdida de material en zonas localizadas. Estas fugas pueden representar focos de posibles incendios (Figura 87 a Figura 91). Un movimiento sísmico puede empeorar este estado de pérdida de material. En el Anexo 1 se muestran con más detalles el sistema de tuberías de la refinería en estudio.

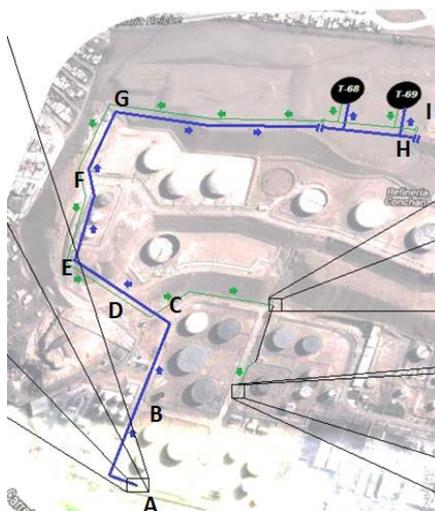


Figura 86. Parte de red de tuberías en la conexión bombas y tanques.

Fuente: Petroperú, 2014.



Figura 87. Manchas de hidrocarburos en unión de tuberías con tanques.

Fuente: LITOCLEAN SAC, 2020.



Figura 88. Fugas por fallo en base de tuberías.

Fuente: LITOCLEAN SAC, 2020.



Figura 89. Goteo de hidrocarburos en unión de válvulas y tuberías.

Fuente: LITOCLEAN SAC, 2020.



Figura 90. Fuga de hidrocarburos en válvula de tanque 74.

Fuente: LITOCLEAN SAC, 2020.



Figura 91. Manchas de hidrocarburos en zona de rack de tuberías.

Fuente: LITOCLEAN SAC, 2020.

4.2.2.6. Vulnerabilidad de otros elementos

Los terremotos pueden afectar el funcionamiento normal de otros elementos, que no son estructurales, pero pueden influir en el funcionamiento de la refinería, algunos de ellos son:

- Componentes eléctricos: Se usan para abastecer de energía eléctrica a la refinería, se incluyen postes, gabinetes de transformadores, subestaciones eléctricas y los equipamientos adyacentes. Las fallas más comunes han sido la interrupción de suministro eléctrico y daño a la subestación eléctrica.



Figura 92. Colapso de redes eléctricas tras el terremoto, refinería Tupras.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

- Bombas: Se usan para impulsar los fluidos por las líneas de conducción, se ubican sobre casetas de protección, la falla más común se ha dado en sus sellos mecánicos de las conexiones y rotura de la cubiertas y bases de las bombas. El mal funcionamiento de las bombas puede afectar también en el fallo del sistema de agua contra incendios, lo que evitaría controlar incendios.



Figura 93. Daño en casetas de bombeos en terremotos de Turquía, 1999.

Fuente: TCSEDPF, 2011.

- Estaciones de venta de combustibles: Estos elementos se diseñan para ser estructuras de despacho de combustibles y otros derivados. EL colapso de estos sistemas puede causar efectos en cadena, ya que hay camiones en tránsito constante.



Figura 94. Estaciones de venta de combustibles.

Fuente: Petroperú, 2023.

4.2.3. Consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos de la refinería

Se puede hacer un Análisis de Fallos por Objetivos (Goal Failure Analysis [GOFA]) para evaluar la importancia de las consecuencias de la vulnerabilidad, ya que el peligro principal de por sí es el sismo, pero no se evalúa directamente, sino que se hace énfasis en la descripción de los efectos indirectos tras su ocurrencia, tales como: colapsos, derrames, fugas, emisiones, explosiones, etc. Este análisis GOFA permitirá analizar solo los fallos que históricamente se presentaron en refinerías, evitando de esta manera

analizar sucesos que no son de relevante importancia. La metodología GOFA, presenta 4 niveles:

- Nivel 0: Es el nivel donde se identifica y describe la causa primaria del estudio de los objetivos, es decir, el hecho que causa los accidentes. Pueden ser de origen antrópicos, naturales, mecánicos, etc.
- Nivel 1: Identificar los tipos de eventos peligrosos que se aplican a la planta industrial o proceso en estudio, por ejemplo, incendio, explosión, liberación radiactiva, fugas, colapsos, etc. En general, se hace un listado de todos los eventos posibles que pueden darse en la planta industrial, se puede recurrir a hechos históricos o analogías con plantas similares. Se deben identificar posteriormente, hace un filtro con las más relevantes, evitando así la pérdida de tiempo gastado en identificar modos de falla obvios.
- Nivel 2: Este es un nivel del GOFA que se utiliza para identificar el rango de metas requeridas para el estudio completo. Los objetivos que se identifican representan eventos peligrosos que caen dentro de categorías de consecuencias específicas, es decir, catastróficas, graves y/o marginales. De aquí se eligen que eventos se deben estudiar, es decir, si se incluyen o no los marginales o de poca importancia
- Nivel 3: Se estudian los accidentes a detalle, es decir, el análisis se basa en una descripción formal del sistema (o parte) de la planta o proceso en estudio y el efecto del fallo sobre este. El objetivo de este análisis es estudiar en profundidad el fallo para analizar la causa potencial y, al mismo tiempo, determinar los efectos de la ocurrencia.

Para este caso, el proceso productivo es la refinación del petróleo. En el Capítulo 3 se estudia todo el proceso y diagrama de transformación del petróleo en los derivados, se muestran todas las estructuras involucradas en dicho proceso y se enumeran los elementos obtenidos en cada etapa. Aplicando la metodología GOFA se tiene la siguiente matriz:

nivel 0	Causa primaria	Sismo severo					
nivel 1	Accidentes	Fugas	Emisiones gaseosas	Colapsos	Derrames	Incendios	Explosiones
nivel 2	Consecuencia	Marginal	Marginal	Grave	Grave	Catastróficos	Catastróficos
nivel 3	Descripción	En tuberías y redes de impulsión	En hornos	En tanques, torres de destilación y hornos	En tanques	En tanques, hornos, torres de destilación	En tanques

Tabla 25. Matriz GOFA de refinería.

En los siguientes subcapítulos apartados se estudian los peligros de nivel 2 de categorías graves y catastróficos a más detalle.

4.2.3.1. Derrames

La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association [NFPA 704, 2008]) define derrames como el escape de cualquier líquido o sólidos particulado del recipiente que los contiene.



Figura 95. Derrame de crudo debido a tsunami en tanque dañado, refinería Sendai.

Fuente: Google, 2023.

Según la cantidad y forma de control, los derrames se clasifican en instantáneo (cuando el recipiente colapsa por un vertido muy rápido del fluido) y continuo (cuando

existen pérdidas del fluido en volumen y duración ilimitadas y difíciles de controlar). Para este caso de estudio, es más probable la ocurrencia de un derrame tipo continuo debido a una falla estructural de los tanques por terremotos.

En la refinería de estudio, los tanques más grandes son los N°68 y N°69 de 25 600 m³ (160 000 barriles) de volumen cada uno. Cada tanque de la refinería tiene una zona estanca (área rectangular con muro de determinada altura que contiene el fluido derramado en un volumen de 110%) y unas cunetas (canalizan el fluido vertido hacia una zona con arena que facilita su control). Este accidente ocurrirá en su mayoría como consecuencia de la Vulnerabilidad de tanques (4.2.2.1) y Vulnerabilidad de zonas estancas (4.2.2.4).

Un detalle para tener en cuenta es que dichos tanques de mayor almacenamiento se ubican en las curvas de nivel superior (80 msnm).

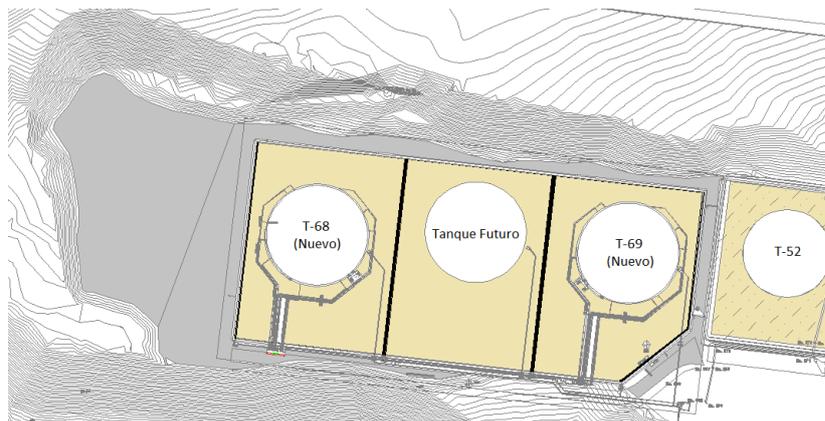


Figura 96. Distribución de los tanques N°68 y N°69.
Fuente: Petroperú, 2014.

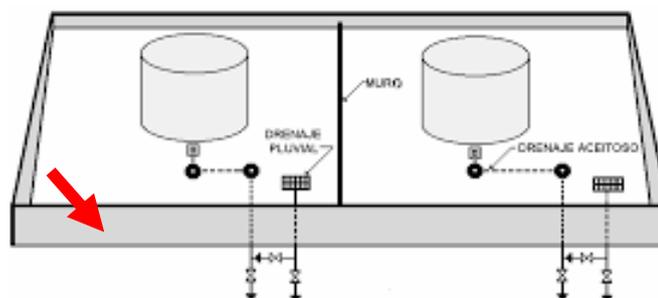


Figura 97. Zonas estancas de tanques.
Fuente: Osinergmin, 2019.

Los derrames no solo pueden darse por el colapso de los tanques, sino también por el rebose, es decir, cuando no se controla el ingreso del fluido y se supera la capacidad

de almacenamiento (Figura 98 y Figura 99). Se han reportado casos de rebose por fallas en el sistema eléctrico de control. Durante un terremoto, el sistema eléctrico tiende a fallar.



Figura 98. Caso de derrame por rebose.
Fuente: Efecto Cocuyo, 2020.



Figura 99. Derrame por rebose por chapoteo de fluido.
Fuente: European Commission, 2014.

Un detalle a tener en cuenta es la separación de los tanques para evitar el efecto cadena con la falla de alguno. Según el D.S. 052-93-EM (MINEM, 1993), en el artículo 26, se tiene la Tabla 26, donde se recomiendan mínimas distancias de separación entre ellas.

Diámetro de tanque		Tanques con techo flotante	Tanques horizontales o de techo fijo	
			Líquidos Clase I o II	Líquidos Clase IIIA
Tanques menores a 45 m de diámetro		1/6 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes, pero nunca inferiores a 1.5 m	1/6 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes, pero nunca inferiores a 1.5 m	1/6 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes, pero nunca inferiores a 1.5 m
Tanques con diámetros superiores a 45 m	Tanques en los cuales los posibles derrames se conducen a otra zona	1/6 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes	1/4 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes	1/6 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes
	Tanques ubicados en zonas estancas	1/4 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes	1/3 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes	1/4 de la suma de los diámetros de los tanques adyacentes

Tabla 26. *Mínimo espaciamiento entre tanques.*

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2016.

Se controla si se verifica dicha distancia entre los tanques de la refinería, para ellos se observan los tanques más cercanos, que son los N°70, N°73 y N°74. En la Figura 100, se muestran las distancias y radios; de Tabla 26 se observa que corresponde al caso de tanques con radios menores de 45 m, por lo que se usara 1/6 de la suma de diámetros adyacentes.

Para los tanques N°70 y N°73 se tiene que la distancia mínima de separación debe ser $D_{min} = \frac{40.4+41.5}{6} = 13.7 \text{ m}$ y según el reconocimiento visual es 16 m, lo cual si cumple la normativa. De manera similar para los tanques N°73 y N°74 se tiene $D_{min} = \frac{41.5+41.5}{6} = 12.8 \text{ m}$, pero en el reconocimiento visual se tiene 13 m. cumpliéndose de manera ajustada el requerimiento de separación.

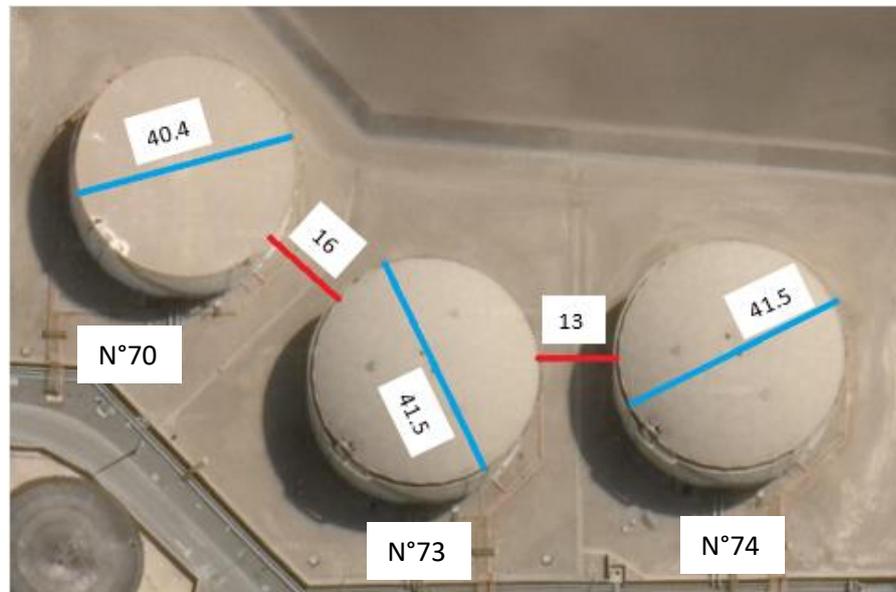


Figura 100. Distancias de separación en tanques más cercanos en refinería.

Fuente: Adaptado de Google, 2023. Nota: Dimensiones en metros.

Otra causa muy frecuente de los derrames es la pérdida de la capacidad de la estructura por causa de corrosión en sus bases. La corrosión se mide por la velocidad de reducción del espesor de las paredes en determinado intervalo de tiempo (milésimas de pulgada por año, MPY en inglés).

A decir de Chileno y Ramírez (2005), quienes investigaron el problema de la corrosión en las estructuras de la refinería en estudio, los más expuestos a este problema son los hornos. En el horno de la Unidad de Destilación Primaria se controló la corrosión y se obtuvo un valor de 40 MPY (considerado elevado) en la parte inferior a la altura del piso. En el honor de la Unidad de Destilación al Vacío se encontraron valores del orden de 31 MPY. En la Figura 101, se puede apreciar un tubo de la zona escudo afectados por la acción de las cenizas fundidas en las zonas convectivas de los hornos.



Figura 101. Corrosión en hornos.
Fuente: Chileno y Ramírez, 2015.

4.2.3.2. Incendios

La NFPA 30-2008 define incendios como la combustión de material (inflamable o combustible) ocasionado por una fuente de calor.



Figura 102. Incendio de tanques dañados por terremoto, refinería Izmit (1999).
Fuente: Sezen & Whittaker, 2004.

Un aspecto importante es diferenciar el Punto de Inflamación y el punto de ebullición. El primero se define como el conjunto de condiciones (presión, temperatura, etc.) en que una sustancia produce el vapor suficiente que al mezclarse con el aire se inflama por acción de una fuente de ignición. El segundo se define como la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión que rodea al líquido y se transforma en vapor. De esto, se pueden separar los materiales inflamables y combustibles.

- a) Material inflamable (Tipo I): Es cualquier material que posee punto de inflamación menor a 38°C (100°F), esta subdividido en:

- Clase IA: Aquellos fluidos con puntos de inflamación por debajo de 23°C y puntos de ebullición por debajo de 38°C.
 - Clase IB: Aquellos fluidos con puntos de inflamación por debajo de 23°C y puntos de ebullición iguales o mayores a 38°C.
 - Clase IC: Aquellos fluidos con puntos de inflamación iguales o mayores de 23°C e inferiores a 38°C.
- b) Material combustible: Cualquier fluido con punto de inflamación superior a 38°C (100°F), se clasifican en:
- Clase II: Cualquier fluido con punto de inflamación igual o mayor a 38°C e inferior a 60°C.
 - Clase IIIA: Cualquier fluido con punto de inflamación igual o mayor de 60°C e inferior a 93°C.
 - Clase IIIB: Cualquier fluido con punto de inflamación igual o mayor a 93°C.

En la refinería en estudio se tienen los siguientes materiales con su clasificación mostradas a continuación.

Producto	Punto Inflamación (°C)	Punto Ebullición (°C)	Tipo
Gasolina Premium	<-40	30	Material inflamable, IA
Gasolina Regular	<-40	30	Material inflamable, IA
Diesel B5	>52	160	Material combustible, IIIA
Diesel B5-S50	>60	357	Material combustible, IIIA
Gasohol Premium	<-40	30	Material inflamable, IA
Gasohol Regular	<-40	30	Material inflamable, IA
Petróleo industrial N°6	>60	-	Material combustible
Petróleo industrial N°500	>65	-	Material combustible
Asfalto liquido de pavimentación	>27	371	Material combustible, IIIB
Cemento asfáltico - solido de pavimentación	>232	371	Material combustible, IIIB
Solvente N°1	<0	30	Material inflamable, IA
Solvente N°3	<0	30	Material inflamable, IA
Ácidos nafténicos 250	>100	140-370	Material combustible, IIIB
Gasóleo marino (MGO)	>60	180	Material combustible, IIIA
Combustible marino (IFO 180)	>60	-	Material combustible, IIIA

Tabla 27. Clasificación de los productos almacenados en la refinería.

Fuente: Petroperú, lista de productos, 2023.

En la refinería, dada la condición de almacenamiento de productos inflamables y combustibles, los incendios pueden tener múltiples orígenes, desde la ignición de fugas pequeñas hasta por derrames de grandes volúmenes.

Los incendios en hornos se pueden originar debido las sustancias volátiles que se produce por el combustible utilizado ya que las temperaturas de trabajo oscilan entre los 500°C y 1000°C, pero su impacto será muy bajo en comparación al peligro de incendio por colapso de tanques, ya que allí se almacenan más volúmenes de productos con menor punto de inflamación (más facilidad de combustionar).

Un aspecto muy importante de los incendios es la radiación que producen ya que pueden afectar al personal, equipos y materiales dentro de la refinería. Para estudiar el impacto de la radiación nos basamos en la metodología desarrollada por el Instituto Nacional de Seguridad e higiene en el Trabajo de España (INSHTE, 2016) quien desarrollo la Nota Técnica de Prevención 326 (NTP 326).

La intensidad de la radiación térmica se define como la transmisión de calor en forma de ondas electromagnéticas que no requiere de un medio para su propagación, se expresa en energía de intensidad por unidad de superficie. Depende principalmente de 3 factores: condiciones atmosféricas (humedad, presión de vapor de la zona, etc.), geometría del incendio (altura de llamas, diámetro de la base y distancia donde se quiere medir la radiación) y de las características fisicoquímicas del material (gasolinas, petróleo crudo, etc.).

Radiación (kW/m ²)	Efectos de la radiación calórica incidente	
	Daño a equipos/materiales	Daño a personas
1		Radiación solar
1.5		Máxima radiación soportada por las personas con ropa normal
4		Causa dolor si la exposición es mayor de 20 s. Quemaduras de 1er grado.
8		Umbral de letalidad por incendio para 1 minuto de exposición
11.7	Daño en madera	
12.5	Cables eléctricos, equipos de instrumentación	Máxima radiación soportada con trajes especiales (bomberos)
25	Madera se enciende con solo exposición, sin llama	Baja probabilidad de mortalidad en menos de 1 minutos, pero lesiones significativas en 10 s.
37.5	Colapso de estructuras industriales	Mortalidad total en 1 minuto

Radiación (kW/m ²)	Efectos de la radiación calórica incidente	
	Daño a equipos/materiales	Daño a personas
40	Máxima radiación que soporta el acero estructural, los tanques de almacenamiento se destruyen	
60	Máxima radiación soportada por el cemento	
200	El concreto armado se debilita	
400	Máxima radiación tolerable por muros de ladrillo	

Tabla 28. Nivel de radiación y sus consecuencias.

Fuente: INSHTE, 2016

De acuerdo con el alcance del incendio, correspondiente a la radiación que emite, se presentan 3 zonas clasificadas que requieren diferente respuesta.

- * Zona de alerta: Límite máximo donde las personas se pueden acercar sin contar con equipo de protección especial, la radiación máxima admisible es de 4 kW/m².
- * Zona de Intervención: Solo pueden intervenir personal con equipos adecuados, como los bomberos. La máxima radiación permisible es de 12 Kw/m².
- * Zona de riesgo máximo: Es en donde se origina el incendio, generalmente donde ocurre el derrame o donde se ubica el vapor que se incendia. La destrucción es total.

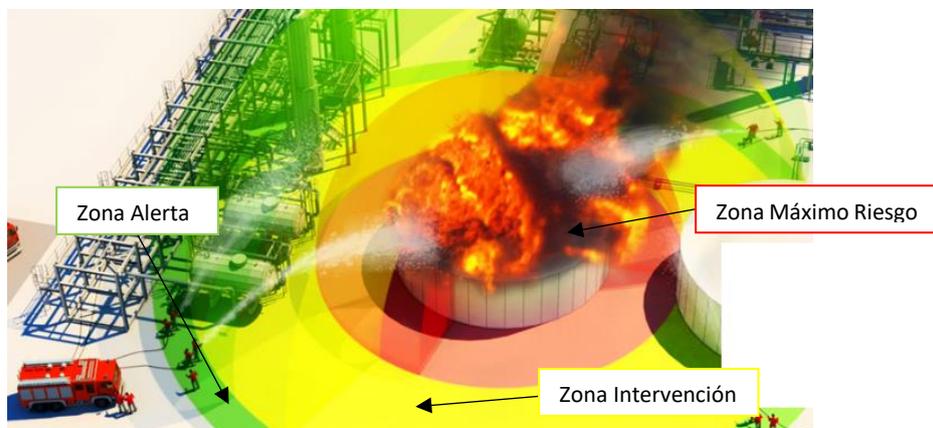


Figura 103. Zonas clasificadas en un incendio.

Fuente: LEA Consultores, 2022.

La intensidad de irradiación por unidad de superficie (I_r) que se percibe en el punto P a una distancia C, se define como:

$$I_r = d * F * E \tag{24}$$

Donde:

I_r : Intensidad de irradiación a una distancia c (kW/m²).

d : Coeficiente de transmisión atmosférica (adimensional).

F : Factor geométrico de visión o forma (adimensional).

E : Intensidad media de radiación de la llama (kW/m²).

A continuación, se desarrollan todos los términos:

- Coeficiente de transmisión atmosférica (d): Durante un incendio, parte del calor que se emite es absorbido por el aire del entorno; esta reducción entre la radiación emitida y la percibida se expresa con el coeficiente “ d ”. Según la misma norma NTP 326, la relación para hallar el valor de “ d ” está dado por:

$$d = 2.02(P_v * c)^{-0.09} \tag{25}$$

Donde:

P_v : Presión parcial del vapor de agua a la temperatura determinada (Pa).

c : Distancia desde la llama externa al punto analizado (m).

La presión parcial (P_v) del vapor de agua, se calcula a partir de la temperatura del ambiente como se muestra a continuación.

Temperatura (°C)	Presión de vapor (Pa)	Temperatura (°C)	Presión de vapor (Pa)
0	600	19	2170
2	700	20	2310
4	800	21	2450
6	920	22	2610
8	1060	23	2770
10	1210	24	2940
11	1300	25	3130
12	1380	26	3320
14	1580	27	3520
15	1690	28	3730
16	1790	29	3950
17	1920	30	4190
18	2040		

Tabla 29. Presión de vapor saturado del agua en función de la temperatura.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016.

- Factor geométrico de forma (F): Este factor depende de la forma geométrica de las llamas (altura y dimensión de la superficie del líquido que se incendia), de la distancia al punto de análisis P o superficie irradiada y de la orientación (vertical, horizontal o inclinada) de dicha superficie. Dependiendo de la forma, puede añadirse un subíndice,

quedando: F_v = para superficies verticales, F_h = para horizontales y F = para superficie inclinada de irradiación máxima ($F = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}$).

El factor F se obtiene de tablas dependiendo de la forma, teniendo 2 casos:

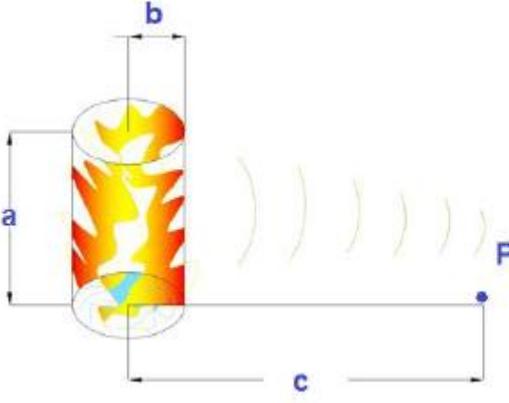
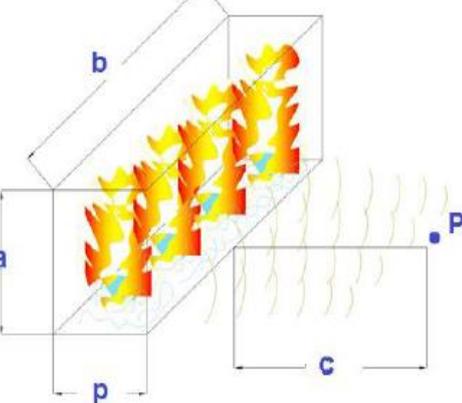
Incendio de forma cilíndrica	Incendio de forma rectangular
	
<p>a = Altura de la llama. b = Radio del recipiente o derrame. P= Punto donde desea calcularse la radiación. c = Distancia entre P y el centro de la base de las llamas</p>	<p>a = Altura de la llama. b = Ancho de la llama. p = Largo de llama. P= Punto donde desea calcularse la radiación. c = Distancia entre P y la parte frontal de las llamas.</p>
<p>Altura de la llama: $a = 29 * b^{0.7} * m^{0.6}$</p>	<p>Altura de la llama: $a = 29 * beq^{0.7} * m^{0.6}$ donde $beq = (b * p/\pi)^{0.5}$</p>
<p>La tasa de combustión "m" (kg/m²s) es:</p> $m = \left(\frac{h_c}{C_p * (t_f - t_i) + h_v} \right) * 10^{-3}$ <p>Donde: h_c : Calor de combustión del producto evaporado (J/kg). h_v : Calor latente de vaporización (J/kg) t_f : Temperatura de ebullición del combustible a analizar (K). t_i : Temperatura del medio en el que se encuentra el combustible (K). C_p : Calor específico a presión constante (J/kg. K).</p>	
<p>Para los valores de F_h y F_v usar los cocientes a/b y c/b en las Tabla 31 y Tabla 32.</p>	<p>Para los valores de F_h y F_v usar los cocientes a/b, c/b, b/c y a/c en la Tabla 33 y Tabla 34.</p>

Tabla 30. Cálculo del factor F.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016

		Factor de visión horizontal (Fh)									
		a/b									
c/b	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	
1.10	0.132	0.242	2.000	0.354	0.360	0.362	0.362	0.362	0.363	0.363	
1.20	0.044	0.120	0.200	0.291	0.307	0.310	0.312	0.312	0.313	0.313	
1.30	0.020	0.065	0.178	0.242	0.268	0.274	0.277	0.270	0.278	0.279	
1.40	0.011	0.038	0.130	0.203	0.238	0.241	0.250	0.251	0.252	0.263	
1.50	0.005	0.024	0.097	0.170	0.212	0.222	0.228	0.229	0.231	0.222	
2.00	0.001	0.005	0.027	0.073	0.126	0.145	0.158	0.160	0.164	0.166	
3.00	0.000	0.000	0.006	0.019	0.050	0.071	0.091	0.095	0.103	0.106	
4.00	0.000	0.000	0.001	0.007	0.022	0.038	0.057	0.062	0.073	0.078	
5.00	0.000	0.000	0.000	0.003	0.011	0.021	0.037	0.043	0.054	0.061	
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.007	0.009	0.017	0.026	
20.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.103	0.003	
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabla 31. Valores de Fh para incendio cilíndrico.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016.

		Factor de visión vertical (Fv)									
		a/b									
c/b	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	
1.10	0.330	0.415	0.449	0.453	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	
1.20	0.196	0.308	0.397	0.413	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	
1.30	0.130	0.227	0.344	0.376	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	
1.40	0.096	0.173	0.296	0.342	0.354	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357	
1.50	0.071	0.135	0.253	0.312	0.229	0.312	0.333	0.333	0.333	0.333	
2.00	0.028	0.056	0.126	0.194	0.236	0.245	0.248	0.249	0.249	0.249	
3.00	0.009	0.019	0.047	0.086	0.132	0.150	0.181	0.163	0.165	0.168	
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.080	0.100	0.115	0.119	0.123	0.124	
5.00	0.003	0.006	0.015	0.029	0.053	0.089	0.085	0.091	0.097	0.099	
10.00	0.000	0.001	0.002	0.010	0.010	0.019	0.029	0.032	0.042	0.045	
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.014	0.020	
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	

Tabla 32. Valores de Fv para incendio cilíndrico.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016.

Factor de visión horizontal (Fh)								
a/b								
c/b	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0
0.1	0.0732	0.1380	0.1705	0.1998	0.2126	0.2217	0.2279	0.2305
0.2	0.0263	0.0728	0.1105	0.1549	0.1774	0.1944	0.2083	0.2113
0.3	0.0127	0.0414	0.0720	0.1182	0.1459	0.1687	0.1855	0.1928
0.4	0.0073	0.0257	0.0485	0.0899	0.1190	0.1452	0.1660	0.1752
0.5	0.0047	0.0171	0.0339	0.0687	0.0966	0.1243	0.1478	0.1588
0.6	0.0032	0.0012	0.0245	0.0530	0.0784	0.1059	0.1312	0.1436
0.7	0.0023	0.0067	0.0182	0.0414	0.0638	0.0903	0.1162	0.1296
0.8	0.0017	0.0065	0.0139	0.0327	0.0522	0.0767	0.1028	0.1169
0.9	0.0013	0.0050	0.0108	0.0261	0.0429	0.0653	0.0908	0.1054
1.0	0.0010	0.0040	0.0086	0.0211	0.0355	0.0567	0.0803	0.0951
1.2	0.0007	0.0026	0.0056	0.0142	0.0249	0.0409	0.0629	0.0774
1.5	0.0004	0.0015	0.0032	0.0084	0.0152	0.0265	0.0440	0.0572
2.0	0.0002	0.0007	0.0015	0.0041	0.0076	0.0139	0.0253	0.0355
3.0	0.0001	0.0002	0.0005	0.0013	0.0026	0.0050	0.0100	0.0154
4.0	--	0.0001	0.0002	0.0006	0.0011	0.0023	0.0047	0.0077
5.0	--	--	0.0001	0.0003	0.0006	0.0012	0.0026	0.0043

Tabla 33. Valores de Fh para incendio rectangular.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016.

Factor de visión vertical (Fv)												
b/c												
a/c	10	5	3	2	1	0.75	0.50	0.25	0.2	0.1	0.05	0.02
10	0.2480	0.2447	0.2369	0.2234	0.1767	0.1499	0.1118	0.0606	0.0490	0.0249	0.0125	0.0050
5	0.2447	0.2421	0.2350	0.2221	0.1750	0.1491	0.1114	0.0604	0.0489	0.0248	0.0124	0.0050
3	0.2369	0.2350	0.2292	0.2176	0.1734	0.1478	0.1101	0.0598	0.0483	0.0245	0.0123	0.0049
2	0.2234	0.2221	0.2176	0.2078	0.1674	0.1427	0.1068	0.0581	0.0470	0.0239	0.0120	0.0048
1	0.1757	0.1750	0.1734	0.1674	0.1385	0.1193	0.0902	0.0494	0.0400	0.0203	0.0102	0.0041
0.75	0.1499	0.1494	0.1475	0.1427	0.1193	0.1032	0.0784	0.0431	0.0349	0.0178	0.0089	0.0036
0.50	0.1118	0.1114	0.1101	0.1068	0.0902	0.0784	0.0599	0.0331	0.0268	0.0137	0.0069	0.0027
0.25	0.0606	0.0604	0.0598	0.0581	0.0494	0.0431	0.0331	0.0184	0.0149	0.0076	0.0038	0.0015
0.20	0.0490	0.0489	0.0483	0.0470	0.0400	0.0349	0.0268	0.0149	0.0121	0.0052	0.0031	0.0012
0.10	0.0249	0.0248	0.0245	0.0239	0.0203	0.0178	0.0137	0.0076	0.0062	0.0031	0.0016	0.0006
0.05	0.0123	0.0124	0.0123	0.0120	0.0102	0.0069	0.0069	0.0038	0.0031	0.0016	0.0008	0.0003
0.002	0.0050	0.0050	0.0049	0.0048	0.0041	0.0036	0.0027	0.0015	0.0012	0.0006	0.0003	0.0001

Tabla 34. Valores de Fv para incendio rectangular.

Fuente: INSHTE, NTP 326, 2016.

- Intensidad de radiación de la llama (E): Depende del tipo de material combustible o inflamable derramado y a la postre incendiado. Mide la intensidad de energía por unidad de área. Algunos valores típicos se muestran a continuación.

Producto	$E(\text{kW}/\text{m}^2)$	Producto	$E(\text{kW}/\text{m}^2)$	Producto	$E(\text{kW}/\text{m}^2)$
Naftas	70-110	Acetaldehído	32	Acetato de vinilo	30
Kerosene	80-90	Amoniaco	13	acetonitrilo	37
Jet A1	70-80	Butadieno	86	Acrlonitrilo	26
Diesel	80	Bromuro de metilo	8	Ácido fórmico	2
Gasoil liviano	70-80	Butileno	93	Alcohol alílico	38
Gasoil pesado	50-60	Cloruro de etilo	14	Acrilato de metilo	30
Fuel oil	70	Cloruro de metilo	14	Benceno	70
Asfalto	30	Cloruro de vinilo	26	Cloruro de alilo	32
Petróleo crudo	20	Dimetilamina	61	Dicloropropano	20
Gas Natural	95	Etileno	89	Dietilmina	77
Butano	95	Óxido de etileno	35	Cloroformo	1
Propano	95	Monóxido de carbono	14	Etil mercaptano	59
Etano	95	Propileno	93	Formiato de metilo	30
Metano	95	Sulfuro de hidrogeno	20	Formiato de metilo	19
Metanol	15	Óxido de propileno	45	Tetracloruro de carbono	1

Tabla 35. Intensidad media de radiación de la superficie de llama.

Fuente: LEA Consultores, 2022.

Cabe mencionar que los tanques tienen su propio sistema de protección ante incendios, es decir un sistema de espumas y circuito de agua contra incendios, pero ante la ocurrencia de un terremoto de gran intensidad, estos sistemas pueden presentar fallas y el personal capacitado no estaría con las facultades para ponerlos en funcionamiento.

4.2.3.3. Explosiones

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (INSHTE, 2016), define explosiones como la liberación violenta de energía que estaba encerrada, causando un cambio súbito en la presión con desprendimiento de calor. Un caso típico de explosiones aplicado a hidrocarburos y derivados es la expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion [BLEVE]). Este tipo de explosiones involucra mucha masa de combustible (líquido o gaseoso) almacenada en recipientes a presión con posterior escape repentino hacia la atmosfera por falla en el recipiente que lo contiene. La explosión de una BLEVE puede causar el aumento hasta 200 veces del volumen del fluido en la explosión.



Figura 104. Expansión explosiva BLEVE en tanque.

Fuente: Viasasha, 2013.

Algunas consecuencias de una BLEVE son: Expulsión de fragmentos metálicos (recipiente que lo contiene) y sobrepresiones por la onda expansiva e irradiación térmica. Para caracterizar a una BLEVE usamos la Nota Técnica de Prevención 293:

Diámetro de la bola de fuego (D_f) :

$$D_f = 6.48 * M_c^{0.325} \text{ (m)} \quad (26)$$

Altura de la bola de fuego (H_f) :

$$H_f = 0.75 * D_f \text{ (m)} \quad (27)$$

Duración de la bola de fuego (t) :

$$t = 0.852 * M_c^{0.26} \text{ (s)} \quad (28)$$

Relación presión de vapor (P_v) y saturada (P_{vs}) se relacionan mediante:

$$P_v = P_{vs} * H_R \% \quad (29)$$

Factor geométrico de visión en bleve (Fg) :

$$Fg = \frac{D_f^2}{4 * c^2} \quad (30)$$

Intensidad media de irradiación por bleve (E_b) :

$$E_b = \frac{Ff * M_c * H_c}{\pi * D_f^2 * t} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (31)$$

La irradiación térmica por explosión percibida (I_b):

$$I_b = d * Fg * E_b \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (32)$$

Mientras a nivel del suelo, para una persona de altura promedio, se sentirá como:

$$I_{br} = I_b * \sin\left(\arctan\left(\frac{H_f}{x}\right)\right) \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (33)$$

Donde:

M_c : Masa total del combustible (kg).

P_v : Presión parcial absoluta del vapor en el aire (Pa).

P_{vs} : Presión absoluta del vapor de agua saturado (Pa).

H_R % : Humedad relativa

c : Distancia entre la parte externa de la explosión y el punto en estudio.

F_f : Factor de cobertura, explosiones abiertas 0.25.

H_c : Calor de combustión del fluido (kJ/kg).

Un indicador del peligro de las explosiones es la irradiación I_m , la máxima irradiación tolerable por algunos materiales se muestra a continuación:

Material	Irradiación máxima tolerable I_m (kW/m ²)
Cemento	60
Concreto Armado	200
Acero	40
Madera	10
Vidrio	30-300
Muros de ladrillo	400

Tabla 36. Irradiación máxima tolerable.

Fuente: INSHTE, NTP 293, 2016.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL SISMO

5.1. Entorno social

La refinería se encuentra en el límite de los distritos de Lurín y Villa el Salvador, los grupos poblacionales directamente involucrados con las actividades de la refinería según la Figura 105 son:

- (1) AA.HH. Villa de Jesús.
- (2) AA.HH. Ampliación Edilberto Ramos.
- (3) AA.HH. 20 de octubre.
- (4) Sector Virgen de la Candelaria.
- (5) Sector Villa Unión.
- (6) AA.HH. Lomas de Mamacona.



Figura 105. Poblaciones circundantes a la refinería.

Fuente: Editado desde Google, 2023.

La población de cada centro poblado se recogió del Observatorio Urbano del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018), que se basa en las oficinas catastrales de cada distrito, se tiene que el AA.HH. Villa de Jesús tiene 1155 habitantes; el AA.HH. Ampliación Edilberto Ramos, 1357; el AA.HH. 20 de octubre, 874; el sector Virgen de la Candelaria, 1357; el sector Villa Unión, 593 y el AA.HH. Lomas de Mamacona 2033,

haciendo un total de 7400 habitantes aproximados en zona de influencia de actividades de la refinería. El nivel socio económico (NSE) predominante es el D y E.

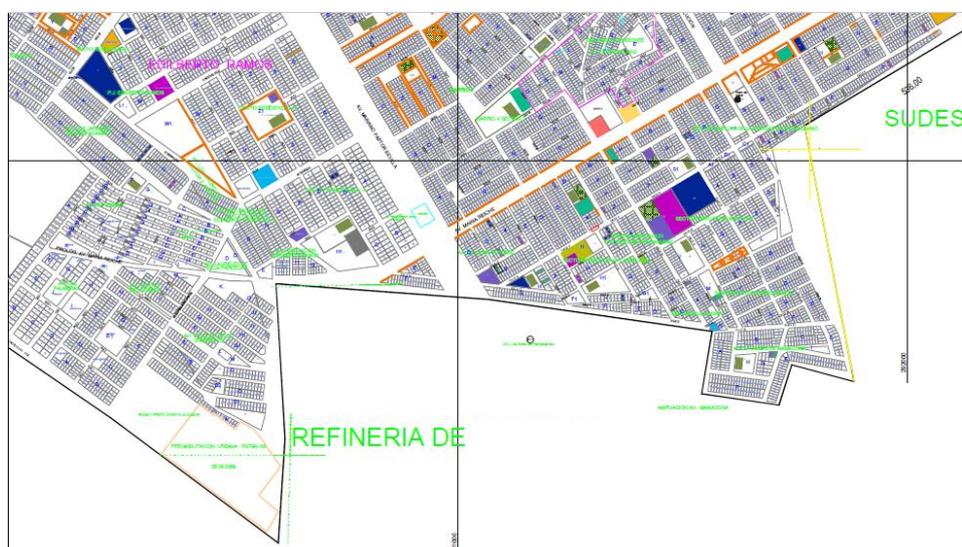


Figura 106. Plano Catastral de Villa el Salvador.

Nota: la refinería se ubica en el distrito de Lurín, pero la población colindante pertenece al distrito de Villa el Salvador. Fuente: Municipalidad de Villa el Salvador, 2021.

5.1.1. Afectación por derrames

Según lo analizado en los apartados Vulnerabilidad sísmica de tanques (4.2.2.1), Vulnerabilidad sísmica de zonas estancas (4.2.2.4) y Vulnerabilidad de Líneas de Conducción (4.2.2.5), los derrames de los tanques colapsados que pueden ocurrir serán contenidos por la respectiva zona estanca de cada tanque, por lo que se espera que no causen problemas a la población circundante.

En caso colapsen los muros de las zonas estancas (no por efecto sísmico, sino por impacto con el tanque colapsado, por ser material frágil) debido a la topografía de la refinería con pendiente aproximadamente de 45°, cualquier derrame se dirigirá a la parte baja donde se ubica la zona de refinación y áreas administrativas (Figura 107) y pueden ser contenidos por los muros de la periferia de la refinería. De esto se desprende que la población colindante no se vería afectada por derrames.



Figura 107. Sentido de derrame en caso de colapso de tanques.
Fuente: Google, 2023.

5.1.2. Afectación por incendios

Primero se determinan las distancias más próximas hacia las poblaciones vecinas, teniendo la Figura 108 . Se observa que la distancia horizontal más corta (65 m) se da desde la zona estanca del tanque N°68 (almacena gasolina) y también es uno de los tanques que más volumen almacena (25 600 m³). Usamos la metodología dada en el apartado Vulnerabilidad de tanques (4.2.2.1) e Incendios (4.2.3.2) para estimar si un incendio por colapso de este tanque puede emitir radiación peligrosa más allá de los 65 m que pueda causar problemas a la población cercana.



Figura 108. Distancias horizontales desde tanques hasta poblaciones.

Fuente: Editado desde Google, 2023.

Para este caso, el colapso del tanque ocasiona que el combustible se vierta sobre la zona estanca (forma rectangular aproximada) que tiene dimensiones 68m x 91m x 1.5 m, por lo que el análisis corresponde al caso de incendio rectangular.



Figura 109. Tanque N°68 y su zona estanca.
 Fuente: Editado desde Google, 2023.

El cálculo de la radiación se hace con los siguientes datos mostrados a continuación:

Condiciones de la zona	
Temperatura media (t_i)	19 °C
Humedad relativa (H_R)	73 %
Propiedades de la gasolina	
Calor de combustión (h_c)	43960 kJ/Kg
Calor latente de vaporización (h_v)	350 kJ/kg
Temperatura de Ebullición (t_f)	126 °C
Calor especifico medio a presión constante (C_p)	2.22 kJ/°C.kg
Presión de vapor saturado del agua a 19°C (P_v)	2170 Pa
Intensidad media de radiación (E)	80 KW/m ²

Tabla 37. Datos del lugar y del combustible del tanque N°68.
 Fuente: Adaptado de SENAMHI, 2023 y Petroperú, 2023.

Completando los datos:

b (lado más largo) = 91 m

p (lado más corto) = 68 m

Se calcula el área equivalente, como un círculo:

$$b_{eq} = (91 * 68/\pi)^{0.5} = 44.38 \text{ m}^2$$

Según la Tabla 30, el caudal de evaporación en la combustión es:

$$m = \left(\frac{43960}{2.22 * (126 - 19) + 350} \right) * 10^{-3} = 0.0748 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Y la altura del incendio es:

$$a = 29 * 44.38^{0.7} * 0.0748^{0.6} = 87 \text{ m.}$$

El valor de "c" (distancia analizada) se irá variando como indica en Tabla 38 (desde 10 hasta 300 m), donde también irán los valores a/b, c/b, b/c y a/c; así como los valores de Fh y Fv para el caso de incendio rectangular (Tabla 33 y Tabla 34). El valor de d se obtiene de la Ecuación (25).

c (m)	d	a/b	c/b	b/c	a/c	fh	fv	F	E	$I_r=d.F.E$ (kW/m ²)
10	0.921	0.96	0.11	9.10	8.71	0.2217	0.251	0.3349	80	22.0
20	0.866	0.96	0.22	4.55	4.35	0.1911	0.2375	0.3048	80	18.8
30	0.835	0.96	0.33	3.03	2.90	0.1523	0.2298	0.2757	80	16.4
40	0.813	0.96	0.44	2.28	2.18	0.1367	0.2169	0.2564	80	14.9
50	0.797	0.96	0.55	1.82	1.74	0.1143	0.1865	0.2187	80	12.5
60	0.784	0.96	0.66	1.52	1.45	0.1002	0.1654	0.1934	80	10.8
65	0.779	0.96	0.71	1.40	1.34	0.0903	0.1523	0.1771	80	9.8
70	0.773	0.96	0.77	1.30	1.24	0.07834	0.1419	0.1621	80	9.0
80	0.764	0.96	0.88	1.14	1.09	0.0653	0.1394	0.1539	80	8.4
100	0.749	0.96	1.10	0.91	0.87	0.0591	0.1246	0.1379	80	7.4
120	0.737	0.96	1.32	0.76	0.73	0.0381	0.1045	0.1112	80	5.9
140	0.727	0.96	1.54	0.65	0.62	0.0265	0.0891	0.0930	80	4.8
160	0.718	0.96	1.76	0.57	0.54	0.0186	0.0643	0.0669	80	3.4
180	0.710	0.96	1.98	0.51	0.48	0.0139	0.0501	0.0520	80	2.6
200	0.704	0.96	2.20	0.46	0.44	0.0101	0.0399	0.0412	80	2.1
300	0.678	0.96	3.30	0.30	0.29	0.005	0.0151	0.0159	80	0.9

Tabla 38. Valores de radiación (Ir) para diferentes distancias (c).

En el cuadro anterior se observa que, sobre los 65 m desde la zona de incendiada, se tiene 9.8 kW/m², es decir es una zona de intervención (solo personal con equipo adecuado puede trabajar), a los 160 m se tiene la zona de alerta (hasta 4 kW/m²) donde las personas sienten el calor y se pueden acercar, pero no por mucho tiempo y sobre los 300 m se sentirá solo como la radiación solar.

Como resultado se tiene el gráfico de zonas de peligro mostrado en la siguiente figura.

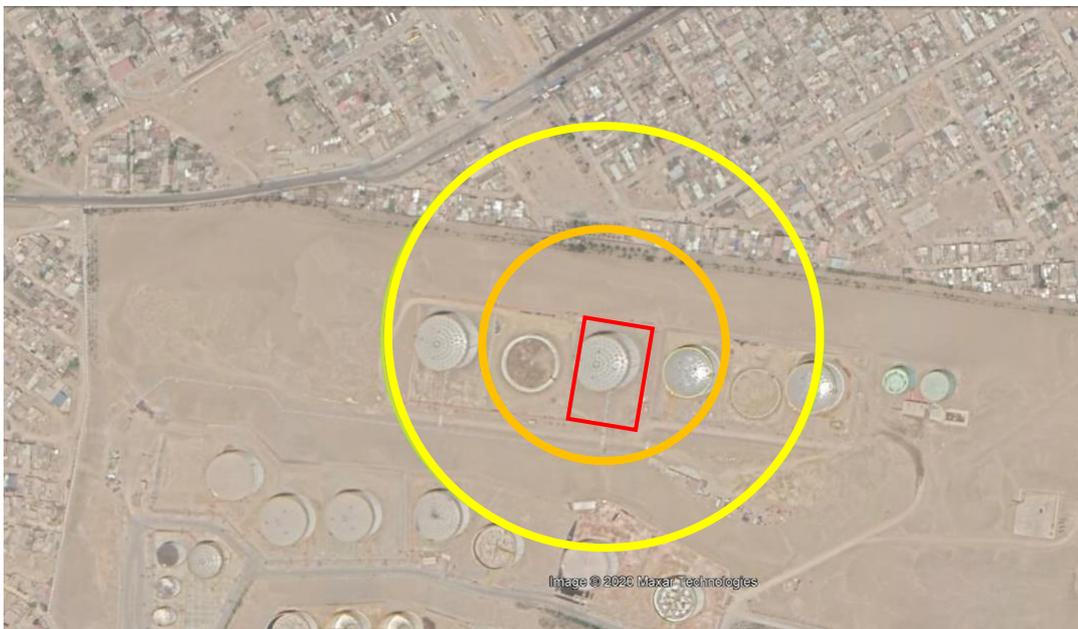


Figura 110. Afectación de la radiación por incendio del tanque N°68.
Nota: línea amarilla (radio 160m) y línea naranja (radio 65m). Fuente: Editado desde Google, 2023.



Figura 111. Cercanía tanques – vivienda.
Nota: Se observa la cercanía entre los tanques y la población, la separación se da por mallas metálicas. Fuente: Google, 2023.



Figura 112. Alcance de la radiación de incendios.
 Fuente: Editado desde Google, 2023.

Del análisis mostrado para el tanque N°68, se puede hacer el conteo para los otros tanques. Teniendo como base el plano catastral, se tiene aproximadamente 110 casas dentro de la Zona de Alerta, que al ser afectadas por la radiación tienen que ser evacuadas de inmediato. Según el plano catastral, aproximadamente 2000 personas serían las afectadas por daños a sus viviendas.

También puede darse que internamente dentro de la refinería se enciendan las torres de destilación, hornos u otros elementos no estructurales (ver apartados 4.2.2.2, 4.2.2.3 y 4.2.2.6), pero no es causa de estudio en esta tesis por no implicar a la población colindante.

5.1.3. Afectación por explosiones

Siguiendo la metodología explicada en el apartados Vulnerabilidad de tanques (4.2.2.1) y Explosiones (4.2.3.3), se desarrollará el caso de explosión del tanque N°69 para estimar su efecto hacia las viviendas más cercanas (65m) y en la Tabla 40 se tabula para más distancias.

Condiciones de la zona	
Temperatura media	19 °C
Humedad relativa	73 %
Propiedades de la gasolina	
Calor de combustión (hc)	43 960 kJ/kg
Temperatura de Ebullición	126 °C
Calor específico medio a presión constante (Cp)	2.22 kJ/°C.kg
Presión de vapor saturado del agua a 19°C (Ps)	2170 Pa

Volumen almacenado	25 600 m ³
Densidad gasolina	800 Kg/m ³

Tabla 39. Datos iniciales para cálculo de la irradiación.

Fuente: SENAMHI, 2023 y Petroperú, 2023.

Los cálculos realizados para el análisis a la edificación más cercana (c=65m) son los siguientes:

$$\text{Masa de combustible } M_c = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 25600 \text{ m}^3 = 20\,480\,000 \text{ Kg}$$

De la Ecuación (26), el diámetro de la bola de explosión:

$$D_f = 6.48(20\,480\,000)^{0.325} = 1541 \text{ m}$$

De la Ecuación (27), la altura de la bola explosiva:

$$H_f = 0.75 * 1540 = 1156 \text{ m}$$

De la Figura 113, se observa que el recorrido de la radiación es:

$$L = \sqrt{65^2 + H_f^2} - \frac{D_f}{2} = \sqrt{65^2 + 1156^2} - \frac{1541}{2} = 387 \text{ m}$$

De la Ecuación (28), la duración de la bola de fuego:

$$t = 0.852(20\,480\,000)^{0.26} = 68 \text{ s}$$

De la Ecuación (29), la presión parcial de vapor absoluta:

$$P_v = 2170 * 73\% = 1519 \text{ Pa}$$

De la Ecuación (25), el coeficiente de transmisión atmosférica:

$$d = 2.02(1519 * 387)^{-0.09} = 0.611$$

De la Ecuación (30), el Factor geométrico de visión:

$$F_g = \frac{1541^2}{4 * \left(\frac{1541}{2} + 387\right)^2} = 0.443$$

De la Ecuación (31), la Intensidad media de radiación:

$$E_b = \frac{0.25 * 20480000 * 43960}{\pi * 1541^2 * 68} = 444 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

De la Ecuación (32), la irradiación recibida:

$$I_b = 0.611 * 0.443 * 444 = 120 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

De la Ecuación (33), la irradiación real percibida por una persona:

$$I_{br} = 120 * \sin\left(\arctan\left(\frac{1156}{65}\right)\right) = 119.8 \frac{kW}{m^2}$$

Según la Tabla 40 (para otros valores de c), se observa que casi hubiera destruido toda estructura de concreto armado, y destruido toda vivienda de madera que este dentro de los 65 m.

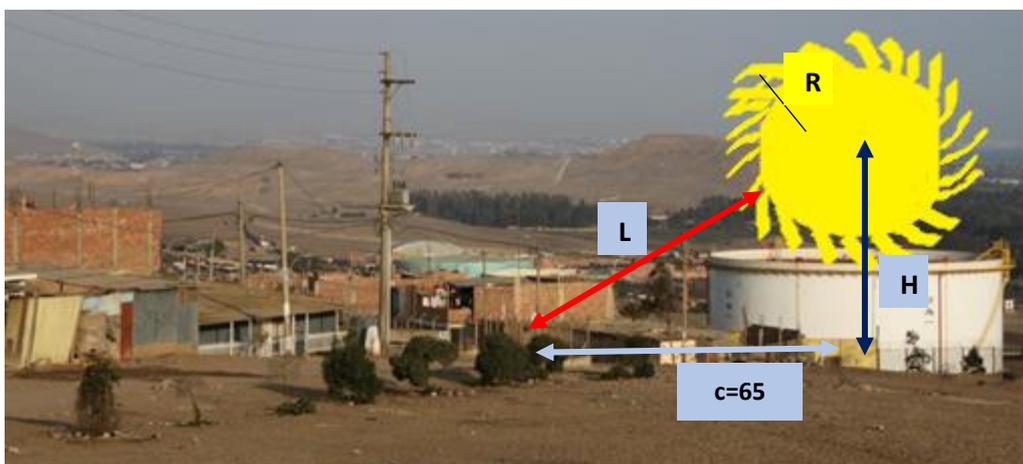


Figura 113. Alcance por irradiación producto de una Blevé.

Fuente: Editado desde Google, 2023.

c (m)	L (m)	d	Fg	E (kW/m ²)	I _b (kW/m ²)	I _{br} (KW/m ²)
20	166.1	0.659	0.444	406.10	118.83	118.74
40	167.3	0.659	0.442	406.10	118.18	117.80
60	169.3	0.658	0.438	406.10	117.11	116.27
65	169.9	0.658	0.437	406.10	116.78	115.80
70	170.6	0.658	0.436	406.10	116.43	115.29
80	172.0	0.657	0.433	406.10	115.65	114.18
100	175.6	0.656	0.427	406.10	113.82	111.58
120	179.9	0.655	0.420	406.10	111.66	108.54
140	185.0	0.653	0.412	406.10	109.21	105.12
160	190.8	0.651	0.403	406.10	106.51	101.38
180	197.2	0.649	0.393	406.10	103.60	97.41
200	204.4	0.647	0.382	406.10	100.54	93.27
220	212.2	0.645	0.372	406.10	97.35	89.02
240	220.6	0.643	0.360	406.10	94.08	84.72
260	229.6	0.641	0.349	406.10	90.76	80.42
280	239.1	0.638	0.337	406.10	87.43	76.17
300	249.2	0.636	0.326	406.10	84.11	72.00
350	276.5	0.630	0.297	406.10	75.99	62.13

Tabla 40. Irradiación sentida (I_r) para diferentes distancias (c).

Para la parte externa, haciendo el conteo usando el plano catastral, se tendría que 70 viviendas de albañilería y concreto armado directamente colindantes serían las afectadas. En la parte interna (dentro de las mismas instalaciones) la irradiación alcanzada sería suficiente para destruir todo elemento de acero, por lo que se espera que, si un tanque sufre una BLEVE, seguirá un efecto en cadena afectando a los tanques cercanos.

5.2. Entorno geográfico

Siguiendo la metodología de cálculo desarrollada en el apartado 5.1, se puede ubicar y graficar las zonas afectada por tipo de peligro.

- a) Derrames: El fluido vertido será contenido por las zonas estancas de cada tanque (ver Vulnerabilidad de zonas estancas 4.2.2.4), tal como se muestra en la Figura 114. Contabilizando el área total (color celeste) se tendría un área máxima de 165 170 m², que corresponde al 33% del área total de la refinería.



Figura 114. Áreas afectadas por derrames.

Fuente: Editado desde Google, 2023.

- b) Incendios: El principal efecto de los incendios es la radiación (ver Incendios 4.2.3.2), por lo que se muestran las zonas de acuerdo al nivel de peligro. La zona de alerta (a

partir de la circunferencia amarilla), la zona de intervención (entre la circunferencia naranja y amarilla) y la zona de riesgo máximo (en la misma zona del derrame).

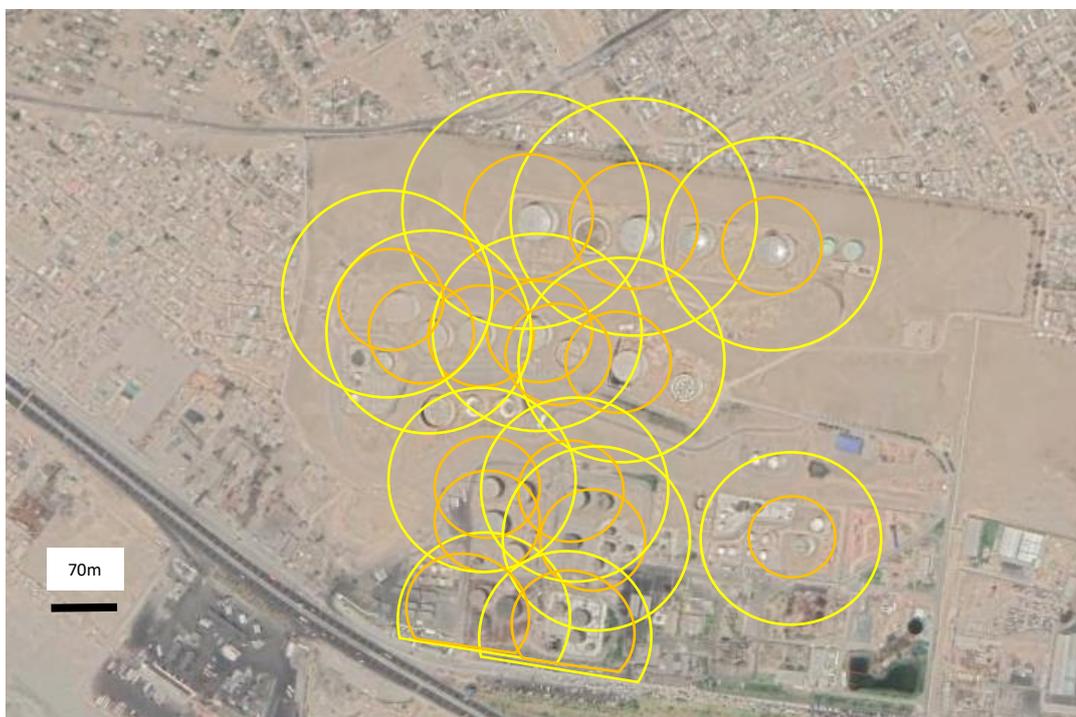


Figura 115. Zonas de peligros por radiación.

Nota: Circunferencias amarillo: Zona de Alerta, circunferencias naranjas: Zona de Intervención. Fuente: Editado desde Google, 2023.

- c) Explosiones: la afectación de la radiación (ver Explosiones 4.2.3.3) se mostrará para dos situaciones: por el borde norte se muestra el alcance de daño al concreto y madera (200 kW/m^2) y dentro de las instalaciones se hará para el daño a otras estructuras de acero (40 kW/m^2).



Figura 116. Efectos de Irradiación.

Nota: Las circunderencias naranjas indican la irradiación suficiente para destruir elementos de concreto armado (viviendas); las azules, para destruir elementos de acero (otros elementos dentro de la refinería). Editado desde Google, 2023.

5.3. Entorno económico

En los capítulos anteriores se analizaron todos los efectos que un terremoto puede ocasionar en las instalaciones de la refinería de petróleo en estudio (derrames, incendios, explosiones, etc.) lo que ocasiona un desabastecimiento de productos. En este subcapítulo se analizan las cifras del desabastecimiento y su valor económico.

De acuerdo con el estudio Recursos de Respuesta Inmediata y de Recuperación Temprana Ante la Ocurrencia de un Sismo y/o Tsunami en Lima Metropolitana y Callao, elaborado por el Instituto Nacional de Defensa Civil, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea (ECHO) (INDECI; PNUD y ECHO [2011]), la exposición al peligro sísmico de la refinería implica posibles daños a sus instalaciones y actividades productivas y por ende escasez de productos que hace que la cadena económica de las otras industrias de Lima se vea vulnerable. En la siguiente figura se puede observar que la refinería tiene una vulnerabilidad económica de peligro alto.

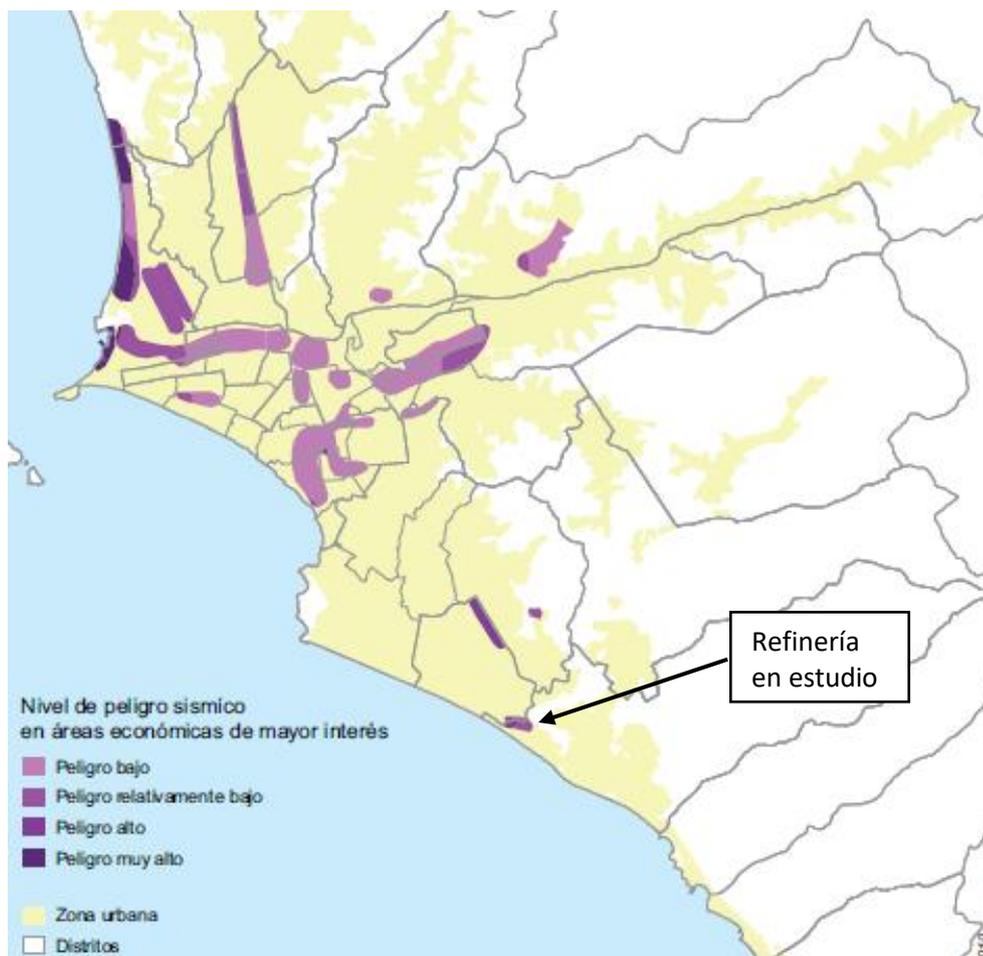


Figura 117. Vulnerabilidad de las áreas económicas de mayor interés por exposición al peligro sísmico.

Fuente: INDECI, PNUD y ECHO, 2011.

5.3.1. Costos por interrupción de actividades

Según el Anuario Estadístico 2022 Sub Sector Hidrocarburos (Dirección General de Hidrocarburos [DGH], 2022) las ventas de productos que se tuvieron en la refinería durante el año 2021 fueron de 13737.28 MBPD (miles de barriles de petróleo por día).

PRODUCTOS TERMINADOS	MBPD
Gasolina 84	404.66
Gasolina 90	3550.72
Gasolina 95	1586.47
Gasolina 97	343.21
Diésel B5 - S50	3299.26
Diésel Marino 2	1.75
Petróleo Industrial 500	274.15
Petróleo Industrial 6	529.85

PRODUCTOS TERMINADOS	MBPD
Combustible Residual Intermedio - 380 (IFO - 380)	76.23
Solvente 1	49.05
Solvente 3	68.54
Asfalto Líquido MC-30	32.19
Asfalto Líquido RC-250	79.05
Asfalto Sólido 120/150 PEN	75.87
Asfalto Sólido 60/70 PEN	410.84
Asfalto Sólido 85/100 PEN	148.67
Asfalto Sólido 10/20 PEN	3.41
<i>Sub Total</i>	<i>10 933.93</i>
PRODUCTOS EN PROCESO	
Nafta Primaria	75.87
Nafta Pesada	17.74
Residual de Primaria	0.40
Destilados medio para mezcla	5.45
Diésel 2	1773.50
Diésel 2 Bajo Azufre	608.87
Gas Unidad de Destilación Primaria	5.19
Gasóleo Pesado	37.48
Residuo de Vacío	6.05
Slop	258.64
Nafta de Vacío	0.27
<i>Sub Total</i>	<i>2789.46</i>
Recuperación de Productos	42.68
Mermas	-26.26
Pérdidas y Ganancias	-2.53
TOTAL DE PRODUCTOS EN REFINERÍA	13 737.28

Tabla 41. Producción de refinería.

Fuente: Dirección General de Hidrocarburos (DGH), 2022.

Para estimar el valor que se deja de recibir por día, usamos los valores de precios de los productos que brinda Petroperú en su portal web y multiplicamos por la producción, estas consideraciones son para el año 2021.

Productos terminados	Miles de barriles por día	Miles de galones por día	Precio soles/galón	Ingreso (miles)
Gasolina 84	404.7	16995.8	13.62	231 482.3
Gasolina 90	3550.7	149 130.1	13.98	2 084 839.0
Gasolina 95	1586.5	66 631.9	14.21	946 838.8
Gasolina 97	343.2	14 414.9	14.36	207 083.9
Diésel B5 - S50	3299.3	138 569.1	14.40	1 995 394.9
Diésel Marino 2	1.8	73.5	445.00	32 707.5
Petróleo Industrial 500	274.1	11 514.2	12.24	140 934.0
Petróleo Industrial 6	529.9	22 253.8	12.35	274 834.2
Combustible Residual Intermedio-380 (IFO-380)	76.2	3201.5	9.96	31 887.3
Solvente 1	49.1	2060.2	10.20	21 014.3
Solvente 3	68.5	2878.8	12.85	36 992.1
Asfalto Líquido MC-30	32.2	1352.0	10.91	14 750.6
Asfalto Líquido RC-250	79.1	3320.2	10.35	34 364.3
Asfalto Sólido 120/150 PEN	75.9	3186.5	10.91	34 764.2
Asfalto Sólido 60/70 PEN	410.8	17 255.3	10.91	188 255.1
Asfalto Sólido 85/100 PEN	148.7	6244.1	10.91	68 122.7
Asfalto Sólido 10/20 PEN	3.4	143.3	10.91	1563.4
Total diario (miles)				6 345 828.6
Total diario millones				6 345.8

Tabla 42. Ingresos por venta de productos en refinería.

Nota: 1barril = 42 galones. Precios sin impuestos.

Fuente: Petroperú, 2022 y DGH, 2022.

Según la Tabla 42 se observa que, en 2021, por día se tuvo un ingreso aproximado de 6 345 millones de soles; valor que da una indicación del costo de paralización por accidentes en caso un sismo afecte la totalidad de las instalaciones de la refinería. Dicho monto no considera el valor propio de los productos derramados ni de las estructuras dañadas, solo de la comercialización de productos.

De acuerdo con Petroperú (2020), en el año 2019 se hizo un mantenimiento general a la refinería (se realizaron trabajos en las columnas de destilación, hornos, tanque, entre otros) se invirtieron aproximadamente 19 millones de soles, que es el valor que mínimamente se necesita para reconstruir la refinería en caso sus estructuras sean afectadas por un terremoto de gran intensidad. Además, para las reparaciones

ambientales ante la ocurrencia de desastres, la provisión para mejoras fue de 698 000 soles.

En cuanto a los ingresos directos para el Estado, los combustibles son afectados por diferentes tipos de tributos. A las gasolinas se le aplica el Impuesto Selectivo al Rodaje (ISR), el Impuesto Selectivo al Consumo (ISC) y el Impuesto General a las Ventas (IGV), mientras que al diésel y residuales el ISC y el IGV. En el año 2021, la carga tributaria total en los combustibles fue del 28.0% para las gasolinas y de 27.0% para el diésel y petróleos industriales. Dichos tributos dejarían de percibirse ante la interrupción de actividades.

5.3.2. Desabastecimiento del mercado

Los combustibles y derivados del petróleo hacen posible que todas las actividades económicas presenten dinamismo en sus operaciones, esto trae como beneficio la satisfacción de necesidades del mercado que se atiende. Las industrias en el Perú que requieren los derivados del petróleo son: transporte, agrícola, manufactura, pesca, comercial, pecuario, minero, entre muchos otros.

Los principales clientes de la refinería en estudios son:

- Distribuidores de combustibles y productos química al por menor y mayor (32 000 barriles por día, más 300 cisternas).
- Múltiples estaciones de servicio (659 a nivel nacional).
- Clientes de entidades públicas: Empresas eléctricas, Fuerzas Armadas, etc.
- Entidades privadas: sector transporte, minería, pesca, marino, etc.
- Transferencia a otras plantas: Cerro de Pasco y Pucallpa.
- Transferencia por buques tanque a terminales y concesionarios.
- Clientes de otros países: Bolivia, Brasil, Argentina, etc.

Dada la condición de capital de la República del Perú, el departamento de Lima concentra la mayor población del país (junto con el Callao), por lo que también demanda la mayor parte de combustibles y derivados que se producen. Según el Anuario estadístico de la DGH (2022), Lima demandó el 31% de los combustibles líquidos producidos, seguidos de Arequipa con 12% y La libertad con 8%, esto debido a que en Lima existen más 366 estaciones de abastecimiento de combustibles (Figura 118) y según la Figura 119, la refinería en estudio es la segunda que abastece al mercado peruano, por lo que su paralización dejaría sin 37.53 MBPD al mercado local.

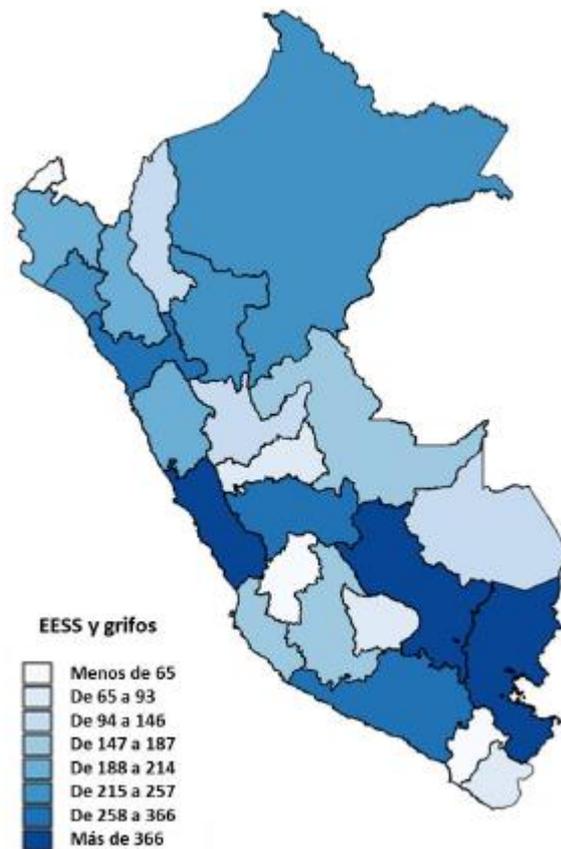


Figura 118. Cantidad de Estaciones de servicio por departamento.

Fuente: Osinergmin, 2022.

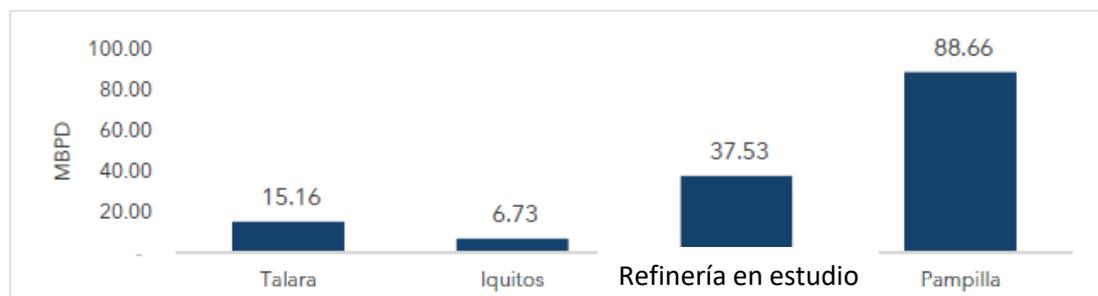


Figura 119. Producción de combustibles, según refinerías, 2021.

Fuente: DGH, 2022.

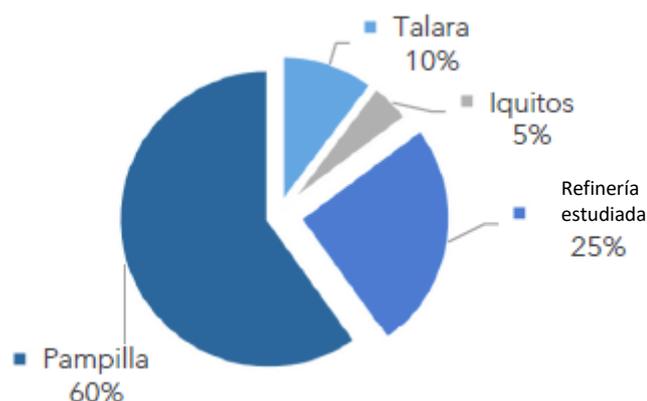


Figura 120. Producción por refinerías, 2021.

Fuente: DGH, 2022.

En Figura 120 se observa la participación nacional de la refinería en estudio (25%), pero si analizamos a nivel Lima, se tiene que la otra refinería que también la abastece es La Pampilla (60%). Comparando solamente entre ambas, se tendría que la refinería en estudio abastece en promedio al 30% de la demanda de Lima y la Pampilla al 70%.

Bajo este razonamiento, cuando ocurran problemas en la refinería (Vulnerabilidad sísmica de la refinería en estudio 4.2.2 y Consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos de la refinería 4.2.3) existirán problemas de desabastecimiento a más de la cuarta parte del mercado local de Lima. EL D.S N° 030-09-EM (MINEM, 2016): Reglamento para la Comercialización de Combustibles Líquidos y Otros Derivados de los Hidrocarburos, en su artículo 42, menciona entre otros aspectos, que la obligación de los distribuidores mayoristas es tener un volumen mínimo de ventas de 420 000 barriles semestrales de combustibles y derivados.

El posible colapso de la refinería en estudio provocaría una escasez de productos, lo que ralentiza la movilización de recursos de respuesta inmediata que realizan las autoridades encargadas del monitorio de la situación de Lima. También los consumidores directos de los productos de esta refinería aglomerarán las otras plantas provocando distorsiones del mercado como especulaciones de precios, acaparamiento, etc.

La demora en el regreso del funcionamiento de la refinería (Figura 121) afectaría la capacidad de reconstrucción de la ciudad, ya que, por ejemplo, el asfalto será un producto necesario para la reconstrucción de las vías de comunicación afectadas. En la siguiente figura se observa que la mayoría de centro de expendio de combustibles y

energía se encuentra en la costa central, por lo que son altamente vulnerables antes eventos sísmicos.

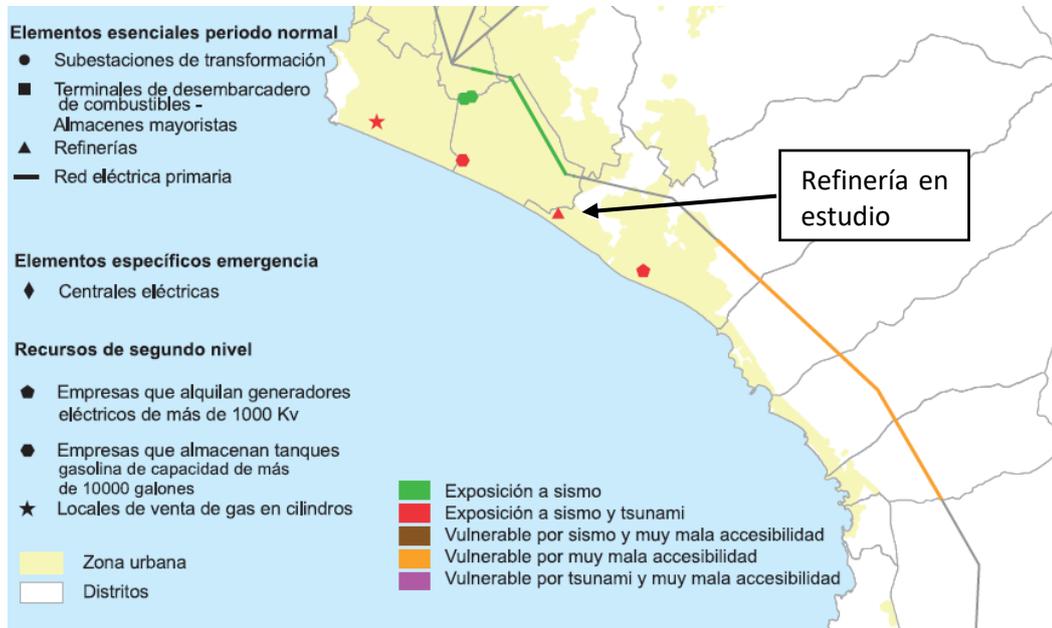


Figura 121. Recursos esenciales vulnerables del abastecimiento de energía.

Fuente: INDECI, PNUD y ECHO, 2011.

CONCLUSIONES

Del análisis desarrollado, se puede concluir:

Dado que la refinería en estudio presenta alta probabilidad de ser afectada por un terremoto de grado mayor o igual a los 8.5 Mw, los efectos indirectos que inmediatamente se desencadenarán son los colapsos, derrames, incendio y fugas en sus instalaciones. El estudio de vulnerabilidad física de la refinería demuestra que todos los elementos estructurales tienen una capacidad limitada ante un evento sísmico esperado, pudiendo ser superado ante uno de gran magnitud.

La extensión geográfica afectada, depende del tipo de peligro: por incendios de tanques se tiene un radio de alcance de daños de hasta 160 m y por explosiones se tiene un radio de alcance máximo de 65 m desde la zona donde se origina que afectaría la parte exterior hacia las viviendas. Mientras que los derrames afectarían el 33% del área total interior de la refinería.

El número de viviendas vulnerables (las más cercanas a la refinería por la parte norte) son: por incendio de los tanques se estima en 110; por explosión de las mismas, 70; y por derrame, ninguna (solo la infraestructura propia de la refinería). La cantidad de personas damnificadas estimada es de 2000 habitantes que viven alrededor de la refinería, y corresponden al nivel socioeconómico D y E.

La interrupción en las actividades genera que se deje de recibir un promedio de 6.3 mil de millones de soles al día como mínimo por ventas directas. Además, aproximadamente el 25% de consumidores del mercado local de Lima se vería afectado por la falta de productos.

La interrupción de abastecimiento de combustibles a la ciudad generará distorsiones en el mercado tales como especulaciones de precios, puntos de distribución informales, etc. Y otros derivados que no se produzcan, como el asfalto, serán necesarios para realizar obras de reconstrucción, por lo que, ante su demanda en otras refinerías, subirán de precio.

Las afectaciones ambientales por derrames del crudo dentro de las instalaciones de la refinería son mínimas, ya que pueden ser controlados, a diferencia de los derrames marinos, en este caso son derrames localizados y su control, recolección y limpieza son efectivos. El mismo efecto se tendrá en los derrames de los productos refinados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda crear una norma técnica sobre el diseño de estructuras industriales (como las que existen en otros países) para uniformizar criterios de diseños y evaluación estructural de estos. Además, se debe definir factores como el de Reducción de la capacidad R y el factor de importancia I .

Es importante hacer investigaciones similares abiertas relacionados a diferentes centros industriales importantes para el desarrollo del país, con el objetivo de realizar planes de prevención ante la interrupción de actividades por efectos de sismos.

Las investigaciones deben hacerse haciendo reconocimientos de campo para una mayor exactitud en la identificación de procesos. Este trabajo de investigación inicio en el segundo semestre del año 2020, en pleno desarrollo de la Covid-19, por lo que no estaban autorizadas las visitas a la refinería estudiada.

El sector hidrocarburos es importante por ser fuente de materia prima para el desarrollo de otras industrias, por lo que debe evaluarse la ubicación de las plantas de refinación, ya que casi el 80% del petróleo es refinado en la costa peruana, que es la zona sísmica más activa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Petroleum Institute. (2007). *Welded Tanks for Oil Storage (API std 650, 11th edición)*. API. <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard650>
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7-16*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Aranda, P.A. (2011). *Diseño de tanques de acero soldado apoyados sobre el suelo para almacenamiento de hidrocarburos*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/549>
- BBC News Mundo. (2017, febrero). *Por qué las placas tectónicas y sus movimientos son indispensables para la vida*. BBC Earth. <https://www.bbc.com/mundo/vert-earth-38659049>
- Canta, G.M. (2011). *Montaje de dos hornos de calentamiento de petróleo en una parada de planta en operaciones Conchán*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Carrasco, Y. P. (2019). *Impermeabilización de área estanca y construcción del dique de contención de tanques de refinería*. [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional UDEP. <https://hdl.handle.net/11042/4095>
- Carreño, P. (2008). *Historia de la industria del petróleo en el Perú*. Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (2005). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://www.cismid.uni.edu.pe/conceptos-basicos-de-sismologia-para-ingenieros/>
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres y Universidad Nacional de Ingeniería. (2013). *Microzonificación Sísmica del Distrito de Lurín*. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/2108>
- Centro Universitario de Ciencias Biológicas Agropecuarias. (2020). *Protección de áreas y tanques de almacenamiento*. CUCBA

<http://www.cucba.udg.mx/documento/documentos-de-normatividad-para-proteccion-civil>

Chileno, D. y Ramirez, J. (2005). *Estudio de análisis del proceso de corrosión en hornos de una refinería de petróleo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

CIME Ingenieros. (2022, marzo). *Servicio de habilitación y montaje de un tanque de 120 Mb para almacenamiento de biodiesel B-100 en operaciones Conchan*. CIME.
<https://www.cimeingenieros.com/proyectos.php>

ClockSpring NRI. (2022, marzo). *SnapWrap Repair Halts Refinery Line Leak*. Critica Infraestructure. https://www.cs-nri.com/case_study/snap-wrap-repair-halts-refinery-line-leak/

Compagnoni, M., Curadelli, R., y Martinez, C. (2012). Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilindricos bajo excitación sísmica. *Asociación argentina mecánica computacional*, 31(1), 2219-2230.
<https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4187/4113>

Condori, C. (2011). *Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú a partir de la variación del parámetro "b"*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA.
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/1309>

Delgado, J. R. (1977). *Evaluación de locales de almacenamiento y distribución de combustible en caso de ocurrir un sismo destructor en la ciudad de Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/3886>

Dirección General de Hidrocarburos (2022). *Anuario Estadístico de Hidrocarburos 2021*. Ministerio de Energía y Minas.
<https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/3724054-anuario-estadistico-de-hidrocarburos-2021>

Dizhur, D. (2013). *Damage to legged oil storage tanks during 1999 Tupras*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/228547801_Seismic_Risk_Formulation_of_Atmospheric_Steel_Tanks_in_Oil_Storage_Systems

- Earthquake Sloshing Failures. (2010, mayo). *Seismic Sloshing Failure History*. EFR Petroleum Storage. <https://burnabytankfarm.com/efr-earthquake-sloshing-failures/>
- Efecto Cocuyo. (2020, mayo). *Por cuatro días se rebosaron tanques de almacenamiento de petróleo en Morichal, denuncia Giroto*. Efecto Cocuyo. <https://efectococuyo.com/economia/por-cuatro-dias-se-rebosaron-tanques-de-almacenamiento-de-petroleo-en-morichal-denuncia-girot/>
- El Gas Noticias. (2019, noviembre). *Tras el sismo: Fuga de tubería en muelle de la refinería Talara fue controlada informó Petroperú*. El Gas Noticias. <https://elgasnoticias.com/tras-el-sismo-fuga-de-tuberia-en-muelle-de-la-refineria-talara-fue-controlada-informo-petroperu/>
- El País. (1999, diciembre). El incendio de la refinería de Izmit queda bajo control gracias a la colaboración internacional. Diario El País. https://elpais.com/diario/1999/08/20/internacional/935100004_850215.html
- Empresa Nacional del Petróleo de Chile (2015, febrero). *Gestión de diseño sísmico en refinería Bío Bío de Enap Refinerías*. ENAP Chile. <https://docplayer.es/45113910-Gestion-de-diseno-sismico-en-refineria-bio-bio-de-enap-refinerias.html>
- Espinoza, J. (2003). Tratamiento y Disposición Final de Residuos Industriales Generados en una refinería. *Revista del Instituto de Investigación UNMSM*, 6(11), 2003. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v6i11.746>
- European Commission. (2014). *Report on lessons learned from recent catastrophic events*. European Union. <https://op.europa.eu/mt/publication-detail/-/publication/a1ba47fa-9988-11e5-b3b7-01aa75ed71a1/language-en>
- Flores, R., & Vassilev, V. (1999). Consideraciones sísmicas en el diseño de tuberías. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(2), 49-64. <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/822>
- Galindo, A. (2009). *Evaluación del diseño mecánico de gasoducto*. [tesis de pregrado, Universidad de Oriente]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oriente. <http://ri2.bib.udo.edu.ve:8080/jspui/handle/123456789/1100>
- Geary, W., y Hobbs, J. (2013). Catastrophic failure of a carbon steel storage tank due to internal corrosion. *Elsevier*, 1(4), 257-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csefa.2013.09.002>

Geología de Segovia. (2021, diciembre). *¿Terremotos en Segovia?*. Geología de Segovia.

<https://www.geologiadesegovia.info/terremotos-en-segovia/>

Geoxnet. (2022, abril). *Tectónica de placas y volcanes*. Geoxnet.

<https://post.geoxnet.com/tectonica-de-placas-y-volcanes/>

Google. (2023, enero). *Distrito de Lurin*. Google Maps.

https://www.google.com/mymaps/viewer?mid=1wPw8AC2JpaBG47_001oyc4W5TKk&hl=es

Goyburo D. (2012). *Diseño estructural de una columna de destilación primaria*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI

<http://hdl.handle.net/20.500.14076/2286>

Hosseinzadeh, N. (2008). Seismic vulnerability analyses of steel storage tanks in an oil refinery complex using dynamic analyses. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.

<https://www.researchgate.net/publication/228676583>

Instituto Geofísico del Perú (2023, marzo). *Sismología - Mapa Sísmico*. IGP.

<https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

Instituto Nacional de Cultura. (2005). Reconocimiento y registro del entorno territorial del Qhapaq Ñam. Ministerio de Cultura.

<https://repositorio.cultura.gob.pe/handle/CULTURA/498>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2017). *Escenario Sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw*. INDECI. [https://portal.indeci.gob.pe/wp-](https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf)

[content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf](https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf)

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2021). *Ley N° 29664: Ley del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)*. Ministerio de Defensa del Perú.

<https://www.gob.pe/institucion/indeci/informes-publicaciones/>

Instituto Nacional de Defensa Civil, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea. (2011). *Proyecto INDECI-PNUD-ECHO: Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao*. Municipalidad de Lima.

https://www.munlima.gob.pe/images/PC_Ante_Sismo_y_Tsunami_MML-V_11-5-2021_-Vfinal_VB-SDC.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil, Programa de la Nacional Unidas para el Desarrollo y Comision Europea (2011). *Recursos de Respuesta Inmediata y de Recuperación Temprana Ante la Ocurrencia de un Sismo y/o Tsunami en Lima Metropolitana y Callao*. INDECI-PNUD-EC.

<https://www.researchgate.net/publication/273316470> Recursos de respuesta inmediata y de recuperacion temprana ante la ocurrencia de un sismo y o tsunami en Lima Metropolitana y Callao Estudio SIRAD

Instituto Nacional de Defensa Civil y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2011). *Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao. Estudio SIRAD*. Proyecto INDECI-PNUD-ECHO.

<https://www.researchgate.net/publication/258627196> Recursos de respuesta inmediata y de recuperacion temprana ante la ocurrencia de un sismo y o tsunami en Lima Metropolitana y Callao - Estudio SIRAD IRD COOPI Proyecto Preparacion ante desastre sismico

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017, julio). *Encuesta Nacional 2017*.

INEI. <https://www.inei.gob.pe/bases-de-datos/>

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España. (2016). *NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases*. INSHT.

<https://www.insst.es/>

Jaimes, M., Reinoso, E., Ordaz, M., y Arredondo, C. (2009). *Correlación entre la aceleración y velocidad máxima del suelo: Aplicación en el análisis del peligro sísmico*. Revista Mexicana de Ingeniería Sísmica.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2009000200002

Korafi E. (2023, febrero). *Diseño sísmico de reservorios NTP E.030 - ACI 350.3*. [video]

Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=830eYA_ljnw&t=22s

LEA Consultores. (2022, abril). *Radiación Térmica: Efecto en incendios de líquidos y gases*. LEA RISK. www.lea-global.com

Linares L. y Pantoja G. (2016). *Evaluación estructural de un recipiente vertical existente ante acciones sísmicas empleando técnicas actuales, según Norma COVENIN 3621:2000*. [Tesis de Grado, Universidad Católica Andrés Bello]. Repositorio

UCAB.

<http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/Febrero%202018/AAT3181.pdf>

LITOCLEAN , Petroperú y Ministerio de Energía y Minas (2020). *Servicio de caracterización, evaluación de riesgos a la salud y el ambiente. Plan dirigido a la remediación de las instalaciones priorizadas de Petroperú*. Petroperú.

<https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/ESTUDIO%20DE%20CARACTERIZACION/REFINERIA%20CONCHAN/3138026.pdf>

Ministerio de Energía y Minas (1993). *Decreto Supremo N° 052-93-EM. Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos, Gerencia de Fiscalización de Gas Natural*. MINEM. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/732279-052-93-em>

Ministerio de Energía y Minas (2016). *Decreto Sepremo N° 030-09-EM. Modifican Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera aprobado por D.S. N° 059-2005-EM*. MINEM. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/4703482-003-2009-em>

Ministerio de Energía y Minas (2019). *Ventas refinería Conchan 2019*. Petroperú. https://www.petroperu.com.pe/Storage/tbl_documentos_varios/flid_1160_Documento_file/507-t0Ea0Oz8Ut4If0E.pdf

Ministerio de Energía y Minas. (2020, diciembre). *Balance Nacional de Energía 2020*. MINEM. <https://www.minem.gob.pe/publicaSector.php?idSector=12>

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España e Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2000). *NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_326.pdf

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España e Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2000). *NTP 293: Explosiones Blevé. Evaluación de la radiación térmica*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_293.pdf/ea4f0605-43a9-4207-b54b-870440eb6206?version=1.0&t=1614698407891

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Observatorio Urbano*.
Asociacion de Municipalidades del Peru.
https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/ciudades_sostenibles_1.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2015, julio). *Estudio de Desempeño Ambiental*. MINAM
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/estudio-desempeno-ambiental>
- Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). *Reglamento colombiano de construccion sismo resistente*. Asociacion Colombiana de Ingeniería Sismica. https://www.scipedia.com/public/Aguiar_Samper_2007a
- Montaño, E. (2016). *Análisis de esfuerzos en sistemas de tuberías*. [Tesis de Grado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco]. Repositorio Institucional ESIAUZ. <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/13922>
- Morán, D., Ferver, G., Stratta, J., C., T., Valera, J., Wyllie, y Loring, J. (1975). *Preliminary reconnaissance report. Engineering aspects of the Lima, Peru earthquake of October 3, 1974*. Earthquake Engineering Research Institute.
https://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_lima_eeri_preliminary_reconnaissance.pdf
- Municipalidad de Villa el Salvador. (2021, agosto). *Catastro Urbano 2019*. MuniVS.
<https://www.munives.gob.pe>
- Municipalidad Provincial de Talara. (2017, abril). *Historia de Talara*. MPT.
<https://munitalara.gob.pe/pagina.php?post=17>
- National Fire Protection Association. (2008). *Codes & Standards NFPA 30 & NFPA 704*. NFPA. <https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/List-of-Codes-and-Standards>
- Organismo de Evaluacion y Supervision Ambiental. (2018). *Resolucion Directoral N° 0160-2018-OEFA/DFAI*. Ministerio del Ambiente - OEFA.
https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=29451
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2019). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú*. Osinergmin.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro-industria-hidrocarburos-liquidos-Peru.pdf
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2022, mayo). *Análisis del Mercado de Hidrocarburos 2021*. Osinergmin.

https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/acerca_osinergmin/estudios_economicos/reportes-de-mercado#

Paolacci, F., De Angelis, M., y Giannini, R. (2012). Analysis of the Seismic Risk of Major-Hazard Industrial Plants and Applicability of Innovative Seismic Protection Systems. *ResearchGate*. <http://dx.doi.org/10.5772/38365>

Pascal, R. y Varma, C.K. (2015). Seismic analysis of oil storage tank. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 27(2), 489-501.
<https://doi.org/10.2339/politeknik.1127303>

Peek, R., y Jennings, P. (1988). *Simplified analysis of unanchored tanks*. University of Michigan. 16(7), 1073-1085. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160709>

Petroperú. (2008). *Levantamiento topográfico para identificación de tuberías y equipos*. Petroperú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1102940/RES800-2007-TC-S120200731-107894-1agmcni.pdf>

Petroperú. (2008). *Manual de operaciones refinería Petroperú*. Petroperú.
<https://www.petroperu.com.pe/acerca-de-petroperu/principales-procedimientos/>

Petroperú. (2014). *Servicio de habilitación y montaje de tanques*. Petroperú.
https://www.petroperu.com.pe/Storage/tbl_documentos_varios/fld_1160_Documento_file/105-y2Mj1lj2Jn9Zt1Z.pdf

Petroperú. (2018, agosto). *Memoria de Sostenibilidad 2018 PetroPerú*. Petroperú.
<https://www.petroperu.com.pe/petroperu-presenta-memoria-de-sostenibilidad-2018>

Petroperú. (2019, diciembre). *Petroperú monitorea situación de sus operaciones tras sismo*. Petroperú. <https://www.petroperu.com.pe/petroperu-monitorea-situacion-de-sus-operaciones-tras-sismo>

Petroperú. (2020, julio). *Estados Financieros Intermedios 2019*. Petroperú.
<https://inversionistas.petroperu.com.pe/principal/informacion-financiera/estados-financieros/anuales/>

Petroperú. (2022, abril). *Estados Financieros Intermedios 2021*. Petroperú.
<https://inversionistas.petroperu.com.pe/principal/informacion-financiera/estados-financieros/anuales/>

- Petroperú. (2023, febrero). *Lista de precios de productos*. Petroperú.
<https://www.petroperu.com.pe/productos/#>
- Petroperú. (2023, 3 de febrero). *Petroperú: nueva planta de efluentes industriales en refinería* [video]. YouTube.
https://youtu.be/sKkKpQ3yCKI?si=NAn4_5pnncHyvzrR
- Petroperú e Hispánica de Caldedería. (2017). *Memoria de calculo y diseño de área estanca para T-29 Y T-37*. Petroperú.
<https://www.scribd.com/document/411732130/Hc-673-lb-c-mc-001-Diseno-de-Area-Estanca-Para-T-296-y-T-376-rev0>
- Phoenix EPC (2019, marzo). *Productos y servicios para el desarrollo Industrial*. Phoenix EPC SAC. <https://phoenixepc.com>
- Porush, A., Bouabid, J., Wong, I., Graf, W. y Bouabid, J. (2005). *Potential losses in a repeat of the 1886 Charleston, South Carolina, Earthquake*. Earthquake Spectra.
<https://doi.org/10.1193/1.2083907>
- Praveen, M., Thomas, W. y Martin, W. (2000). Simple Procedure for Simple Analysis of Liquid - Storage Tanks. *Structural Engineering International*, 10(3), 197-201.
<https://doi.org/10.2749/101686600780481509>
- Pulido, N., Zenon, A., Hernando, T.; Mohamed, C., Aguilar, Z. y Chlieh, M. (2015). *Scenario source model and strong motion for future mega-earthquakes: Application to Lima, Central Perú*. Instituto Geofísico del Perú. Bulletin of the Seismological Society of America. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/2894>
- Reenu P. ; Prasad V. (2018). Seismic Analysis of Oil Storage Tanks. *NSS College of Engineering*, 6(3), 1240-1244.
<https://ijsrd.com/Article.php?manuscript=IJSRDV6I30703>
- Rios, A. (2012, agosto). *El Gas de Camisea: "Un regalo de Dios"*. Conexión ESAN.
<https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/gas-camisea-energia>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2009). *Norma E.060: Concreto Armado*. SENCICO.
<https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2018). *Norma E.030: Diseño Sismorresistente*. SENCICO.

<https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2022, marzo). *Servicio Web de Consultas para la Determinación del Peligro Sísmico en el Territorio Nacional*. SENCICO. <https://wsconsultasgin.sencico.gob.pe/wconsulta>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2023, febrero). *Pronostico del tiempo de Lurin*. SENAMHI . <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>
- Sezen, H., y Whittaker, A. (2004). Performance of industrial facilities during the 1999, Kocaeli, Turkey Earthquake. *WCEE Canada 2004*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:1(28))
- Silgado, E. (1878). *Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/251/2/C-003-Boletin-Historia_sismos_mas_notables_Peru.pdf
- Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (2011). *Reglamento de la Ley N°29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres DS N°048-2011-PCM*. SINAGERD. <https://geoidep.gob.pe/marco-normativo-institucional/normas-relacionadas/decreto-supremo-048-2011-pcm>
- Sociedad Nacional de Industria. (2021). *Lima concentra casi 60% del PBI Industrial por falta de políticas sectoriales en las macrorregiones*. Sociedad Nacional de Industria (SNI). <https://sni.org.pe/sni-lima-concentra-casi-60-del-pbi-industrial-por-falta-de-politicas-sectoriales-en-las-macrorregiones/>
- Sociedad Peruana de Hidrocarburos. (2019). *Hidrocarburos aportan más al PBI que sectores como pesca, saneamiento y electricidad*. *Gestion*. <https://gestion.pe/economia/sph-hidrocarburos-aportan-pbi-sectores-pesca-saneamiento-electricidad-85385-noticia/>
- Takada, S., Hassani, N., & Fukuda, K. (2001). A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. Shahid Beheshti University <https://doi.org/10.1002/eqe.62>

- Tang, Y., y Veletsos, A. S. (1990). *Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks*. U.S. Department of Energy.
<https://doi.org/10.1002/eqe.4290190402>
- Task Committee on Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities (TCSEDPF). (2011). *Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical and Other Industrial Facilities (GSEDPF)*. American Society of Civil Engineers (ASCE).
<https://doi.org/10.1061/9780784415481>
- Tavera, H. (2014). *Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central de Perú*. Instituto Geofísico del Perú.
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/779>
- United States Geological Survey. (2022). *Image of the Week: Deforestation in Peru*. USGS. <https://www.usgs.gov/media/videos/image-week-deforestation-peru>
- Universidad da Coruña. (2007). *Origen de los terremotos*. UDC.
<https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/Q UE ES.htm>
- Viasasha, S. (2013, noviembre). Understanding few Types of Explosion occurring in Oilfield. Entirely Safe. <https://entirelysafe.com/understanding-few-types-of-explosion-occurring-in-oilfield/>
- Villegas, J., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., y Nocquet, A. (2016). *Active Tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca*. Journal of Geophysical research: Solid Earth, 121 (10), 23-35.
<https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Wikipedia. (2022, abril). *Gobierno Regional de Lurin*. Wikimedia Projects.
https://es.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Lur%C3%ADn
- Zamudio, Y. I. (2003). *Análisis de la sismicidad asociada al proceso de subducción en el sur del Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/3143>

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Planos de refinería en estudio.....	161

ANEXO 1

PLANOS DE REFINERÍA EN ESTUDIO

UBICACIÓN GENERAL



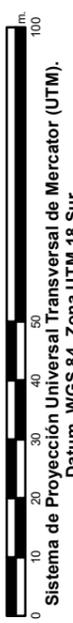
LEYENDA

	Accesos externos		Instalaciones
	Acceso internos		Cubetos
	Línea de conducción		Perímetro Refinería Conchán
	Tanques		

FIRMA

ESCALA NUMÉRICA: 1:1,200

ESCALA GRÁFICA

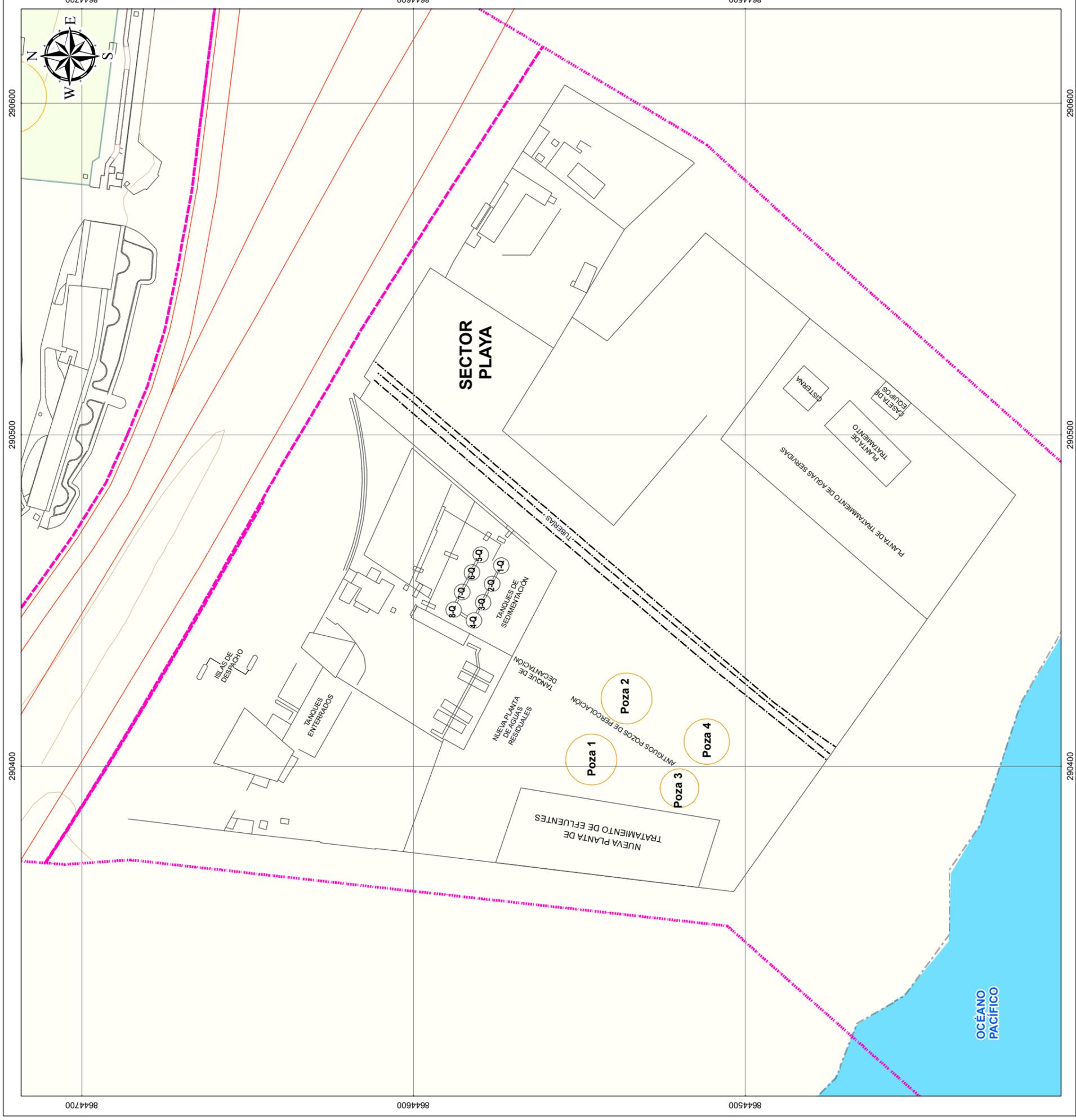


Petroperú

SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN
EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD Y EL
AMBIENTE Y ELABORACIÓN DEL PLAN
DIRIGIDO A LA REMEDIACIÓN DE LAS
INSTALACIONES PRIORIZADAS DE PETROPERÚ

Informe de Caracterización – Refinería Conchán

Plano N° 1.1	Instalaciones de la Refinería Conchán - Sector Playa
Referencia N° 61511 - 210	Realizado por: L. Moreno
Fecha: Abril 2021	Aprobado por: J. Nilsson
Rev: 0	Formato: A3



UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

- | | | | |
|--|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| | Accesos externos | | Cubetos |
| | Acceso internos | | Planta de ventas de productos blancos |
| | Línea de conducción | | Planta de ventas de productos negros |
| | Tanques | | Servicios Industriales |
| | Curvas de nivel | | Almacenes |
| | Instalaciones | | Unidad de procesos |
| | Perímetro Refinería Conchán | | |

FIRMA

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.300

ESCALA GRÁFICA



Sistema de Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM).
Datum WGS 84. Zona UTM 18 Sur.



SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN
EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD Y EL
AMBIENTE Y ELABORACIÓN DEL PLAN
DIRIGIDO A LA REMEDIACIÓN DE LAS
INSTALACIONES PRIORIZADAS DE PETROPERÚ
Informe de Caracterización – Refinería Conchán

Plano N° 1.2

Referencia N°
61511 - 210



Realizado por:
L. Moreno

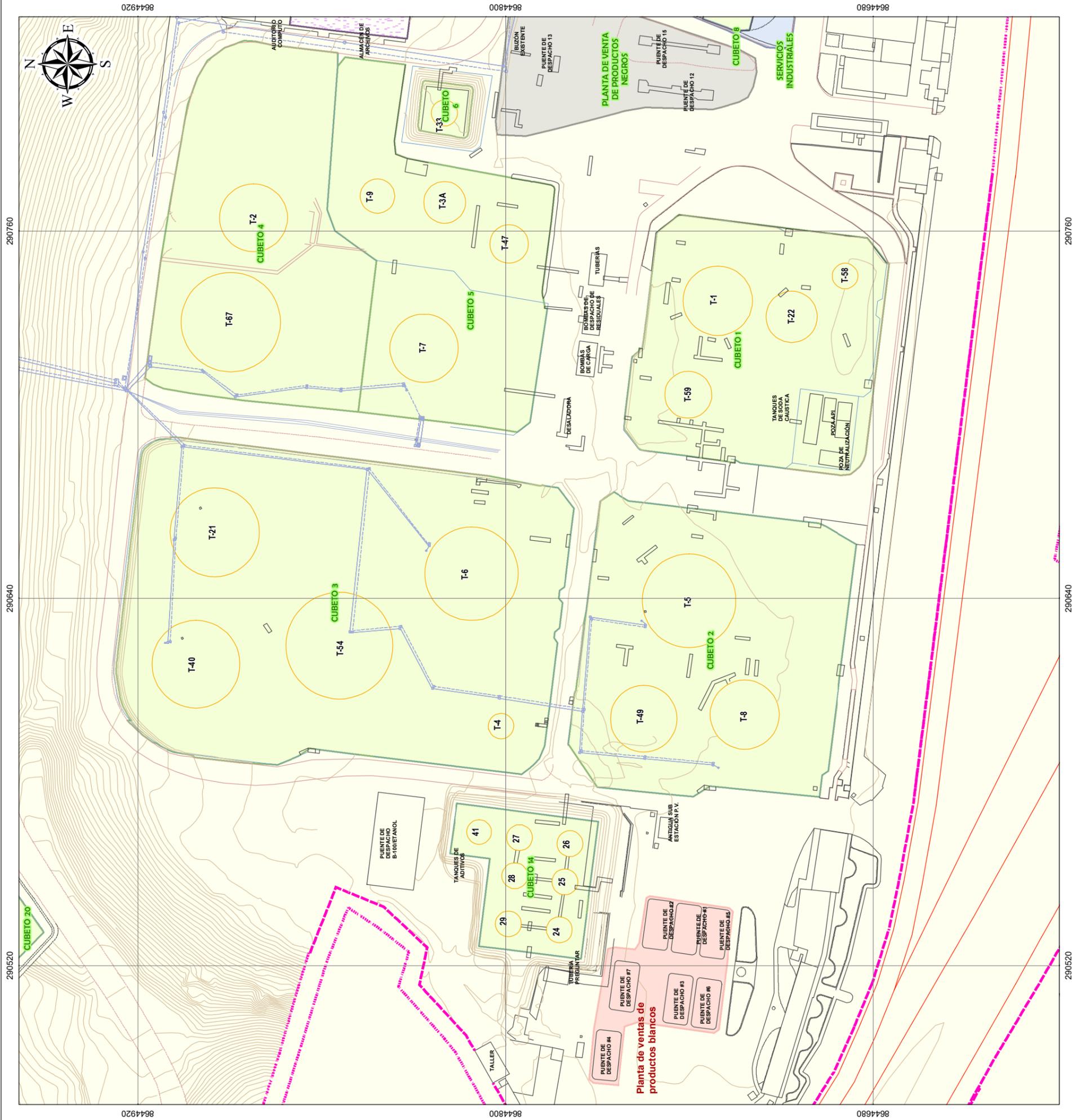
Fecha:
Abril 2021

Rev: 0

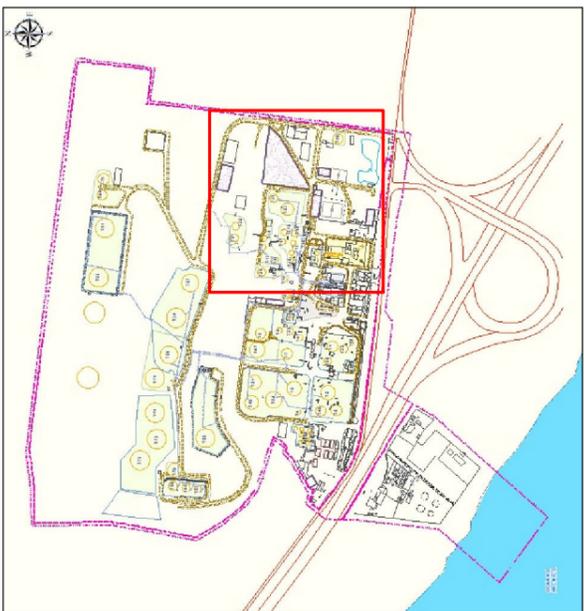
Aprobado por:
J. Nilsson

Formato: A3

Instalaciones de la Refinería Conchán -
Sector Centro 1



UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Accesos externos | Cubetos |
| Acceso internos | Planta de ventas de productos blancos |
| Línea de conducción | Planta de ventas de productos negros |
| Tanques | Servicios Industriales |
| Curvas de nivel | Almacenes |
| Instalaciones | Unidad de procesos |
| Perímetro Refinería Conchán | |

FIRMA

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.400

ESCALA GRÁFICA



Sistema de Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM).
Datum WGS 84. Zona UTM 18 Sur.



SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN AMBIENTE Y ELABORACIÓN DEL PLAN DIRIGIDO A LA REMEDIACIÓN DE LAS INSTALACIONES PRIORIZADAS DE PETROPERÚ

Informe de Caracterización - Refinería Conchán

Instalaciones de la Refinería Conchán - Sector Centro 2

Plano N° 1.3

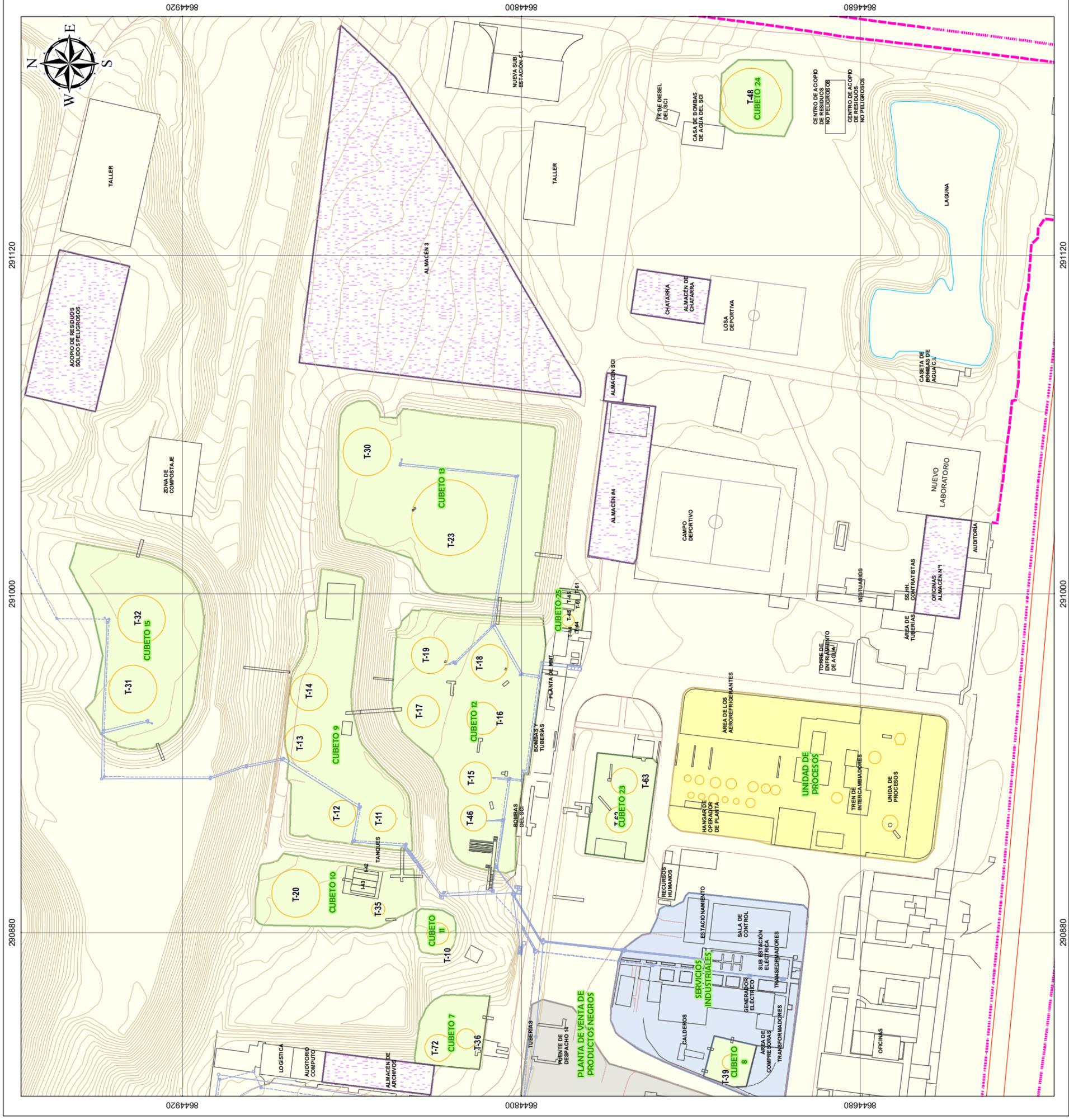
Referencia N° 61511 - 210
Realizado por: L. Moreno

Fecha: Abril 2021
Aprobado por: J. Nilsson

Rev: 0
Formato: A3



INVESTIGACIÓN & REMEDIACIÓN DE SUELOS



290880 291000 291120

8644800 8644800 8644800

8644920 8644920 8644920

UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

	Accesos externos		Cubetos
	Acceso internos		Planta de ventas de productos blancos
	Línea de conducción		Planta de ventas de productos negros
	Tanques		Servicios Industriales
	Curvas de nivel		Almacenes
	Instalaciones		Unidad de procesos
	Perímetro Refinería Conchán		

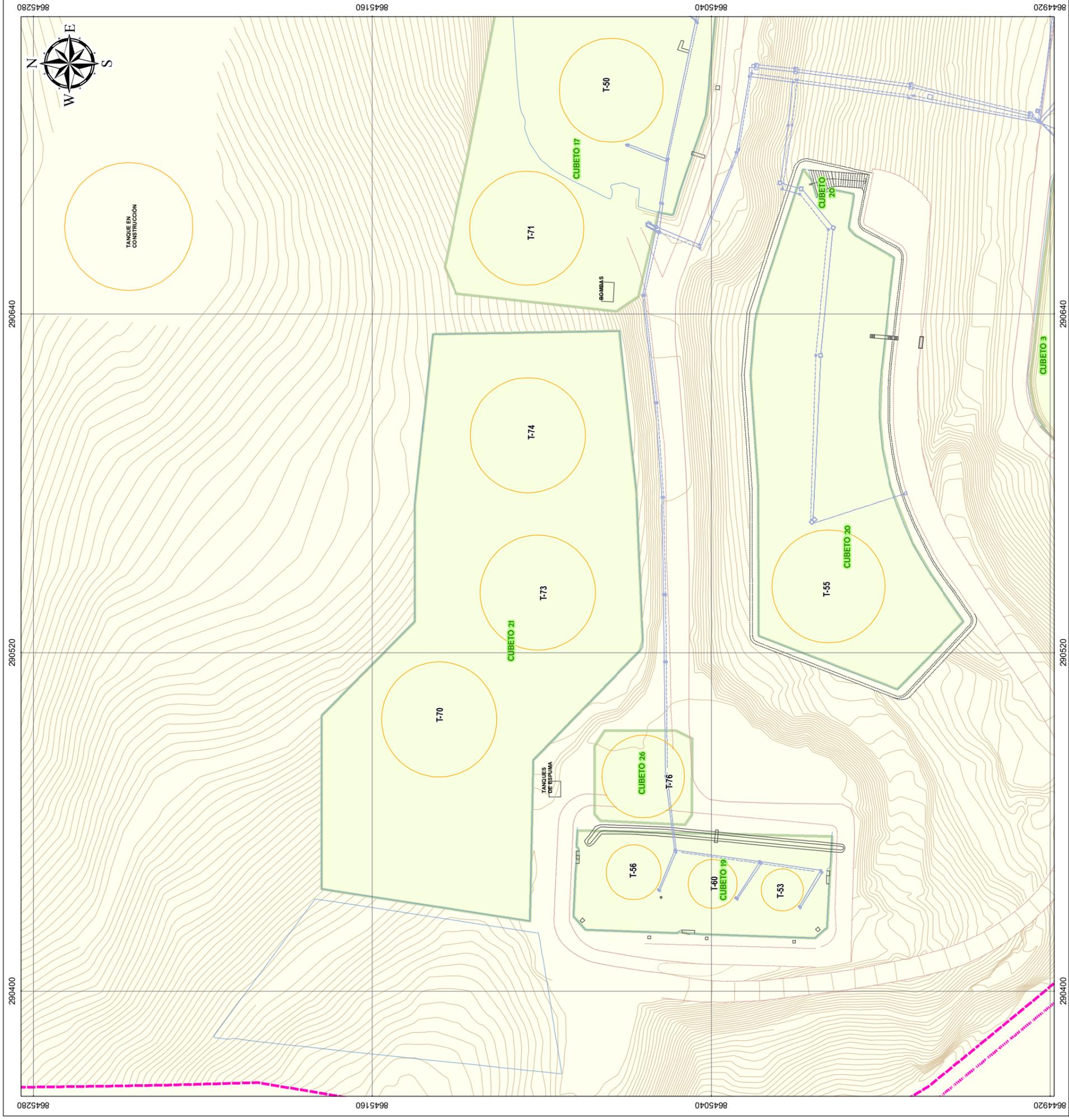
FIRMA

ESCALA NUMÉRICA: 1:1,400

ESCALA GRÁFICA



<p>Petroperú</p>	<p>SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD Y EL AMBIENTE Y ELABORACIÓN DEL PLAN DIRIGIDO A LA REMEDIACIÓN DE LAS INSTALACIONES PRIORIZADAS DE PETROPERÚ</p>
	<p>Informe de Caracterización – Refinería Conchán Instalaciones de la Refinería Conchán - Sector Cerro 1</p>
<p>Plano N° 1.4</p>	<p>Realizado por: L. Moreno</p>
<p>Referencia N° 61511 - 210</p>	<p>Aprobado por: J. Nilsson</p>
<p>Fecha: Abril 2021</p>	<p>Rev: 0</p>
<p>Formato: A3</p>	



8645280 290400 290520 290640 8645160 8645040 8644920

UBICACIÓN GENERAL



LEYENDA

	Accesos externos		Cubetos
	Acceso internos		Planta de ventas de productos blancos
	Línea de conducción		Planta de ventas de productos negros
	Tanques		Servicios Industriales
	Curvas de nivel		Almacenes
	Instalaciones		Unidad de procesos
	Perímetro Refinería Conchán		

FIRMA

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.500

ESCALA GRÁFICA



Sistema de Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). Datum WGS 84. Zona UTM 18 Sur.

Petroperú

SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN AMBIENTE Y ELABORACIÓN DEL PLAN DIRIGIDO A LA REMEDIACIÓN DE LAS INSTALACIONES PRIORIZADAS DE PETROPERÚ

Informe de Caracterización – Refinería Conchán
Instalaciones de la Refinería Conchán - Sector Cerro 2

Plano N° 1.5

Referencia N°	Realizado por:
61511 - 210	L. Moreno
Fecha:	Aprobado por:
Abril 2021	J. Nilsson
Rev: 0	Formato: A3

