

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

MODELO DE DISPERSIÓN EN AIRE PARA EL CONTAMINANTE
1,2-DICLOROETANO EN EL VERTEDERO PROTECO DE PEÑUELAS, PUERTO RICO.

YUMAYRA P. DUMENG- FIGUEROA

©Derechos Reservados

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
 RECINTO UNIVERSITARIO DE SAN GERMÁN
 DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Tesis presentada y aprobada como requisito parcial para completar el grado de Maestría en
 Ciencia Ambientales

MODELO DE DISPERSIÓN EN AIRE PARA EL CONTAMINANTE
 1,2-DICLOROETANO EN EL VERTEDERO PROTECO DE PEÑUELAS, PUERTO RICO.

YUMAYRA P. DUMENG- FIGUEROA

Miembros del Comité

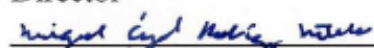


José Vera Serrano, Ph.D.

Director

15 de mayo de 2026

Fecha

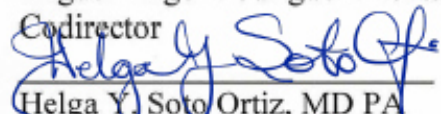


Miguel Ángel Rodríguez Montalvo, M.S.

Codirector

15/mayo/2026

Fecha

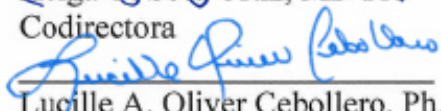


Helga Y. Soto Ortiz, MD PA

Codirectora

15/mayo/2026

Fecha

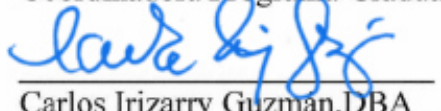


Lucille A. Oliver Cebollero, Ph.D.

Coordinadora Programa Graduado

15 de mayo de 2026

Fecha

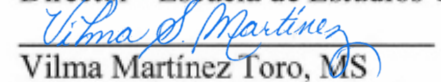


Carlos Irizarry Guzmán, DBA

Director - Escuela de Estudios Graduados e Investigación

18 de mayo de 2026

Fecha



Vilma Martínez Toro, MS

Decana de Asuntos Académicos

18 de mayo de 2026

Fecha

Dedicatoria

Esta investigación es dedicada, primeramente, a Dios y a todo lo que envuelve mi fe, ya que, gracias a Él, la misma fue posible; y en adición a que, mi formación académica y profesional fue entregada a su divina providencia desde los inicios. De igual manera, esta investigación es dedicada a mi familia; ya que, creyeron en mi desde el comienzo y gracias a sus oraciones, apoyo, y ayuda incondicional; me impulsaron a lograr culminar esta meta académica. Recordando igualmente, que esta investigación es dedicada, a todas las personas que me abrazaron con sus oraciones. Sin olvidar, que deseo dedicar esta investigación al ambiente o naturaleza, ya que, siendo ambientalista, dedicarle esta investigación a nuestro hogar, no puede faltar. Por tanto, aun siendo una dedicatoria, y reconociendo que dentro de a todos los que menciono anteriormente, se me quedaría, entre la dedicatoria, dar las gracias por mucho más, deseo incluir un agradecimiento especial a todos ellos, por formar parte, de todo lo que sostiene mi vida e impulsarme a lograr ser, la persona profesional, la cual contribuirá a la academia con esta investigación.

Agradecimientos

De manera general, deseo expresar mi agradecimiento, a la Universidad Interamericana Recinto de San Germán. Agradezco de igual forma a mi comité de tesis el Dr. José Vera Serrano, el Profesor Miguel Ángel Rodríguez Montalvo, y la Dra. Helga Y. Soto Ortiz; por creer en mis capacidades y compartir conmigo sus conocimientos e información para lograr esta investigación. De la misma manera deseo extender mis agradecimientos, al Programa Master Workforce del Departamento de Educación Federal (“Fund for the Improvement of Postsecondary Education Project award #P116S220001”), y todo su personal, los cuales presenciaron mis búsquedas de inicio para encontrar el procedimiento apropiado para la investigación y me brindaron información importante, para mi formación profesional, bajo el tema de la modelación y simulación. De igual forma, agradezco también, al Programa UCAN (“El proyecto University Center for Advancing & Nurturing Postgraduate Quality Title V PPOHA #P031M230038”), y a todo su personal, los cuales me brindaron su apoyo, ayuda técnica, y talleres muy importantes, para mi formación académica y profesional a nivel graduado.

Resumen

La investigación realizada en el Vertedero Proteco en Peñuelas, P.R., pretendió dar enfoque a la calidad del aire, como un asunto a considerar en términos de la dispersión de contaminantes, para garantizar la salud y seguridad de las poblaciones cercanas al área de estudio. Por tanto, mediante el programa de QGIS y en conjunto con la aplicación de la fórmula gaussiana; se realizó el modelo de dispersión en aire para simulación del contaminante 1,2- dicloroetano, que puede ser volatilizado desde la fuente. Siendo así, como resultados, se presentó: la dispersión en la localización, los valores numéricos generales y estadísticos de la misma, y la concentración vs la distancia de la dispersión en el área de estudio. En conclusión, la investigación por medio de una aproximación, nos demostró lo que en términos de calidad del aire se está presentando con respecto al contaminante estudiado.

Abstract

The research conducted at the Proteco Landfill in Peñuelas, Puerto Rico, aimed to focus on air quality, as a matter to consider in terms of pollutants dispersion, in order to guarantee the health and safety of the populations near the study area. Therefore, using the QGIS software and applying the gaussian fórmula, an air dispersion model was created to simulate the pollutant 1,2-dichloroethane, which can be volatilized from the source. The results presented included: the dispersion at the location, the general and statistical numerical values of the dispersion, and the concentration vs the distance of the dispersion in the study area. In conclusion, the research through an approximation, demonstrated the current air quality situation with respect to the pollutant studied.

Tabla de Contenido:

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1 Objetivos generales	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3. Justificación.....	3
4. Revisión de Literatura	8
5. Marco Teórico.....	15
6. Hipótesis.....	19
7. Metodología.....	20
7.1. Diseño de la investigación- Visión general.....	20
7.2. Determinación del área de estudio.....	20
7.3. Listado o registro de Contaminantes y/o Selección de Muestras	23
7.4. Selección del modelo de computación y/o predicción.....	33
7.5. Análisis y validación de los parámetros.....	35
7.6. Posibles soluciones ante las concentraciones resultantes.....	37
7.7. Procedimiento de la Aplicación de QGIS en Peru.....	38
7.8. Procedimiento de la Aplicación de QGIS en PR.....	123
8. Resultados y Discusión.....	323
9. Conclusión.....	324
10. Recomendaciones.....	325
11. Reflexión.....	326
Literatura Citada /Bibliografía.....	327
Apéndice	337

1. Introducción

Entre las amenazas a la salud en general la contaminación del aire juega un papel muy importante. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año la contaminación del aire es la responsable de aproximadamente siete millones de muertes globalmente. Actualmente, nueve de diez humanos respira aire que excede los límites guías de contaminantes de la OMS (Mackenzie, J., & Turrentine, J., 2021). Para Puerto Rico la consciencia sobre la calidad del aire es un asunto de especial importancia para el cuidado de una alta población que padecen de asma o diferentes condiciones de salud (Cochrane & Associates, LLC., 2022). Por tanto, esta investigación se centrará en el estudio de los contaminantes Compuestos Orgánicos Volátiles (contaminantes primarios) y los contaminantes secundarios; que pudieran ser liberados al aire por medio de Proteco, un vertedero de desperdicios peligrosos abandonado en Peñuelas, P.R. y que actualmente forma parte de la “Lista de Prioridades Nacionales” (NPL) del Superfondo por parte de la Agencia de protección Ambiental (EPA) (EPA., 2019). Para visualizar la migración y la exposición de los contaminantes en la población, la investigación será realizada mediante el programa QGIS que es uno de los cuales actualmente se utilizan para modelos de dispersión gaussiana. En busca de resultados apropiados y confiables la ampliación del marco de referencia (“DPSIR”), serán considerados (Ali, H. & Khan E., 2017). Finalmente, se espera que los hallazgos de la investigación puedan ser compartidos e informados a la población más susceptible a la exposición de los contaminantes encontrados en este vertedero.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Generales

- Evaluación de contaminantes aéreos, impacto ambiental y riesgos a la salud presente por parte del lugar perteneciente al Superfondo, llamado PROTECO que fue un vertedero de desperdicios peligrosos al sur de Peñuelas, Puerto Rico.
- Evaluar un modelo de dispersión acorde con la metodología actualmente aceptada y/o validada para la determinación de los contaminantes e impacto de la calidad del aire en el área.
- Analizar los resultados obtenidos, para evaluar el impacto de los contaminantes y poder brindar recomendaciones para trabajos futuros de investigación en el área.

2.2 Objetivos Específicos

- Comparar los resultados obtenidos con la literatura existente a cerca de la calidad del aire en el lugar de: PROTECO que fue un vertedero de desperdicios peligrosos al sur de Peñuelas, Puerto Rico.
- Analizar los problemas a la salud que pueden estar asociados a la dispersión de contaminantes por parte de PROTECO.
- Evaluar y exponer las medidas presentes posibles para evitar la contaminación y/o brindar soluciones.

3. Justificación

Para la justificación de la investigación, primero se debe considerar que la química ambiental, se presenta como la base de la investigación, ya que, por medio de esta, se ayudará a las otras áreas de las ciencias ambientales a presentar un análisis que asegure el bienestar para el medio ambiente. La química ambiental muestra un soporte o unión hacia las demás áreas de las ciencias ambientales, por ejemplo: para la biología ambiental, asegura las cantidades de sustancias químicas que son saludables para los organismos vivos y para la salud y seguridad ambiental, asegura que cantidad de compuestos químicos pueden representar una amenaza, de manera que es una herramienta para la creación de leyes y estándares de calidad. Por medio de la química ambiental, se estudia el ambiente en general (las esferas del ambiente: atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera) y en ocasiones (como es el caso de esta investigación), se ve enfocado a una de las áreas de estudio. Por medio de la química ambiental se estudia los procesos (interacciones), compuestos (reactivos y productos), exposiciones y resultados, que pueden impactar al ambiente de manera positiva o negativa.

En adición a esto, el enfoque de la investigación será en torno de lograr un proceso basado en química verde y química computacional, ya que actualmente mediante estas van encaminado el futuro de la ciencia. Discutiendo el concepto mencionado anteriormente; dentro de la química ambiental, el término: química verde es mencionado como la visión oportunista para el futuro y en sí, el futuro de la ciencia. Según Loste N. & Giner, B. (2019), la química verde busca reducir el uso y la generación de sustancias peligrosas en procesos químicos. Por tanto, la química verde presenta las siguientes ventajas: reducción en cantidad de sustancias químicas a adquirir para los procesos (diferentes procesos industriales o de investigación científica), reducción en mano de

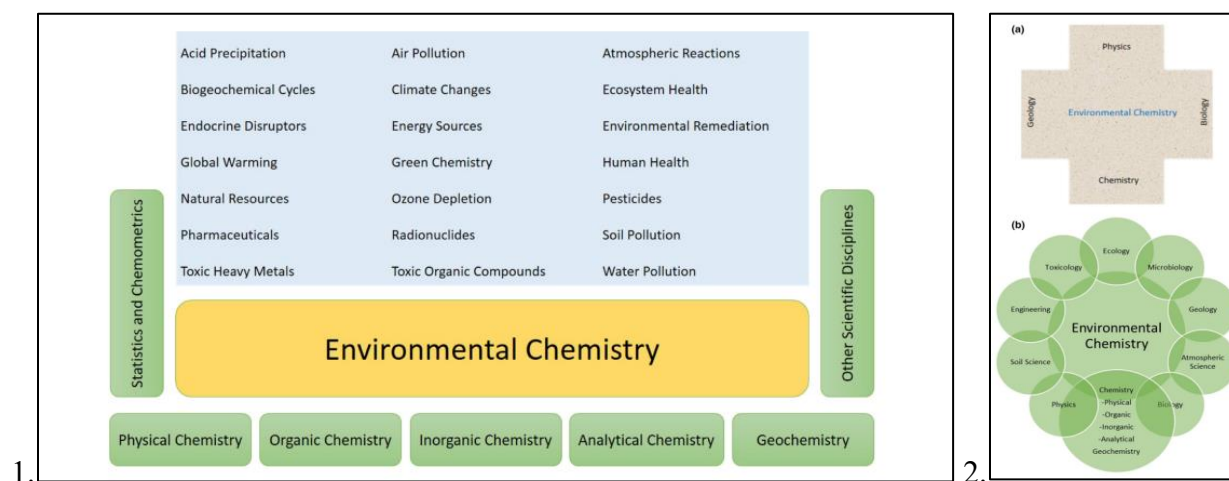
obra y costos de disposición de las sustancias químicas de forma apropiada, facilidad para lidiar con las reglamentaciones de estándares de calidad ambiental debido a la reducción de sustancias químicas a manejar, y una reducción en costos generales, presentando una implementación de acciones efectivas ante la demanda de necesidades de las industrias empresas, instituciones o laboratorios de investigación. Por otra parte, la química computacional, según Boyd, R. J. (2019), es la integración de modelos computarizados de predicción para realizar análisis químicos, físicos, toxicológicos y estadísticos. Esto ahorra tiempo en: experimentaciones prácticas, materiales y desperdicios de laboratorio e industriales. Entonces con la unión de la química verde y la química computacional, se espera que la ciencia alcance mayor cantidad de investigaciones, con el menor impacto negativo al ambiente.

La calidad del aire es importante y como se mencionó antes, por esta se pueden afectar todas las esferas del ambiente. Varrica, D. (2021) menciona, que las interacciones del ser humano con la naturaleza son constantes, de manera que su influencia se manifiesta de diferentes formas: desde el aire que respiramos, el agua que tomamos, la comida que ingerimos, etc. Por tal motivo, cualquier cambio en el ambiente puede representar una amenaza a los seres vivos, al igual que las diferentes actividades de la sociedad actual pueden representar un impacto negativo en el ambiente, como menciona Varrica, D. (2021). Para evaluar la calidad del aire hay que tener en cuenta que se deben evaluar las fuentes fijas (en el interior de los lugares) y las fuentes no fijas que interaccionan con el todo, en el medio ambiente. Diferentes acciones son necesarias para asegurar un balance en las esferas del ambiente (atmósfera, hidrosfera, la litosfera y biosfera), ya que estas se pueden afectar entre sí, debido a esto la calidad del aire se cataloga importante. Por tanto, la importancia de la calidad del aire, abarca una gran diversidad de temas importantes para

el ambiente en general. En la próxima **Figura 1** se muestra como las esferas de la química ambiental están relacionadas. Entre las interrogantes para la investigación, la principal sería si: En términos de los límites de exposición federales, exigidos por las agencias reguladoras: ¿Puerto Rico, cumple con los límites establecidos para asegurar una calidad del aire segura para la población (en el área de estudio)?

Figura 1

Imagen de lo que envuelve la Química Ambiental



Nota. El esquema 1. muestra parte de las esferas de la Química Ambiental en color verde y a su vez como la variedad de subdivisiones se conectan para resolver las diferentes variables mostradas bajo el renglón azul. El esquema 2. muestra la variedad de disciplinas que se conectan en modo de apoyo que el estudio de la Química Ambiental sea posible (Ali, H. & Khan, E., 2017)

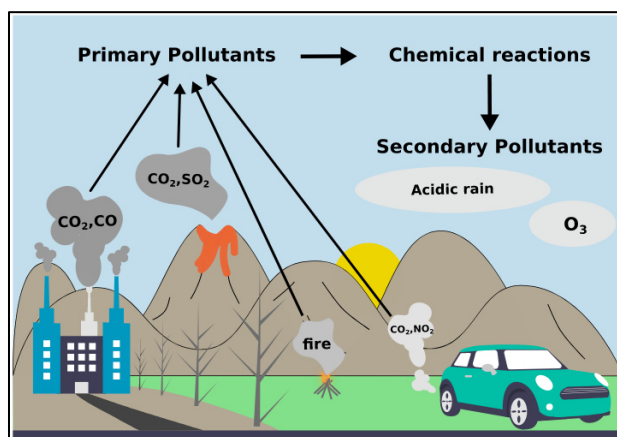
(<https://www.proquest.com/docview/1899718910/fulltextPDF/67A2E50B4F4906PQ/4?accountid=206157>).

En adición a los puntos mencionados anteriormente la investigación va en busca de ser accesible, efectiva, de bajo costo y con los menos desperdicios posibles generados en el ambiente de investigación. Siendo así, la accesibilidad de la investigación va de la mano de los siguientes factores a considerar: un lugar de investigación apropiado (que consta de un laboratorio o salón con la computadora específica para realizar los modelos de predicción), el tiempo provisto para el estudio (disponibilidad para el laboratorio o salón en horarios accesibles), la búsqueda bibliográfica (disponibilidad de las bases de datos universitaria) y la base teórica (que consta de conocimientos generales de las disciplinas relacionadas y profundidad en las disciplinas de énfasis del estudio). La efectividad de la investigación es esperada, en conjunto de las variables mencionadas anteriormente y los factores que catalogan la investigación como una sustentable y sostenible. Debido a la utilización de modelos computarizados de predicción, se reduce los costos de reactivos, materiales, y tiempo de experimentación práctica. A su vez, genera la menor cantidad de desperdicios posibles, ya que en términos de desperdicios lo único a considerar sería la generación de electricidad para la computadora.

Este estudio se enfocará en los Contaminantes Orgánicos Volátiles (VOC's) (que son contaminantes primarios) y en los contaminantes secundarios (o que puedan estar presentes en el aire y reaccionar para producirlos), como por ejemplo considerando las reacciones de combustión (PSIBERG., 2022). Según el "United States Geological Survey" (USGS) y a modo de justificación; los VOC's son componentes químicos que puede tanto pueden evaporarse al aire o disolverse en el agua; estos son productos del uso en la industria, la agricultura, la transportación y de actividades del día a día en el hogar (y sus alrededores) (USGS., 2019 y EPA., 2022).

Figura 2

Imagen de la contaminación en aire



Nota. Muestra como de los contaminantes primarios y las reacciones químicas se producen los contaminantes secundarios (PSIBERG., 2022).

(<https://psiberg.com/primary-and-secondary-pollutants/>).

El estudio utilizó la página del Superfondo para escoger el área de la investigación, ya que bajo la parte de la “Lista de Prioridades Nacionales”- “NPL”, los lugares que se presentan son de prioridad para realizar este tipo de investigaciones, que facilitan el estudio con la menor exposición posible (EPA., 2022).

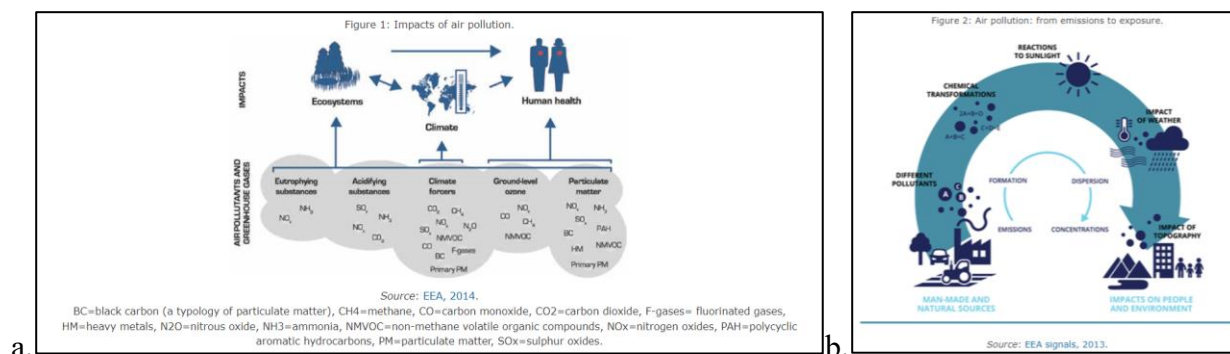
4. Revisión de Literatura

La calidad del aire se puede asociar con diferentes condiciones de salud por contaminantes persistentes:

De acuerdo con Seo, D. (2021), los contaminantes en el aire, por exposición por inhalación, pueden afectar diferentes órganos diana (en términos de toxicología y bioquímica), generando diferentes condiciones de salud. Además, varios artículos sobre evaluaciones de accidentes químicos, por ejemplo: el derrame de “Hebei Spirit” descrito por Kim, J. H. & Yi, J. (2012), se presenta el caso en el que los contaminantes, Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs) aerotransportados, tienen efectos adversos al ambiente marino y a la salud humana. Dentro de lo que son las exposiciones ambientales, los Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs), pesticidas y los contaminantes aéreos, entre otros compuestos; se menciona que estos están asociados a la diabetes, por parte de Taylor, K. W. & Lind, L. (2013). Incluso, la calidad del aire puede ser asociado al riesgo de muerte, tal como menciona Danesh Yazdi, M. et al (2021), en un estudio realizado a los pacientes del Medicare de EE. UU., en la cual se concluyó que, en individuos mayores, un aumento en la concentración de contaminantes en el aire, puede aumentar el riesgo de muerte.

Figura 3

Relación del humano y la exposición



Nota. En la parte **a.** se muestra el impacto a la salud, el clima y los servicios de los ecosistemas, por parte de los contaminantes aéreos y en la parte **b.** se muestra la exposición resultante de la contaminación aérea (EU., 2022) (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=air-pollution-41a05f>).

Los estudios epidemiológicos, toxicológicos, junto a la bioquímica, pueden ayudar en contexto químico a predecir condiciones y llevar un control:

Una gran variedad de estudios científicos (los cuales podemos ver al final en las referencias) centrados en la epidemiología, la toxicología y en unión a la bioquímica se han presentado para evaluar la calidad del aire, predecir condiciones, llevar un control de los estándares y exigir a las agencias reguladoras que tomen acción para reforzar los mismos. Por el artículo de Danesh Yazdi, M. et al (2021), se muestra un ejemplo de un estudio científico que presento, que hay la necesidad de implementar estándares para ciertos contaminantes del aire. Por otra parte, el estudio de Taboureau, O. et al (2020), de contaminantes generales; por medio de un análisis toxicológico, químico computacional, concluyeron con las recomendaciones a las agencias reguladoras para utilizar el método que se describe en el artículo, ya que en contexto de predicción el mismo mostro ser efectivo. Este estudio que se menciona anteriormente es

importante, ya que mediante una predicción efectiva se puede controlar los factores necesarios de exposición (filtros, regulaciones, y manejo de los desperdicios), de manera que se pueda anticipar una solución antes de presentar condiciones de salud o efectos negativos al medio ambiente.

Concentraciones de contaminantes, exposiciones y efectos:

La EPA (2017) nos brinda diferentes estudios centrados en sensores para mantener los estándares de la calidad del aire de forma apropiada, para monitorear los efectos a la salud. Además, Danesh Yazdi, M. et al (2021), nos brinda el método de implementar una curva de dosis respuesta para evaluar el efecto a la exposición por parte de los contaminantes aéreos. Cada contaminante tiene concentraciones establecidas para asegurar el menor impacto posible a la población y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) (2007) por medio del CDC, es una herramienta para conocer los efectos de los contaminantes atmosféricos.

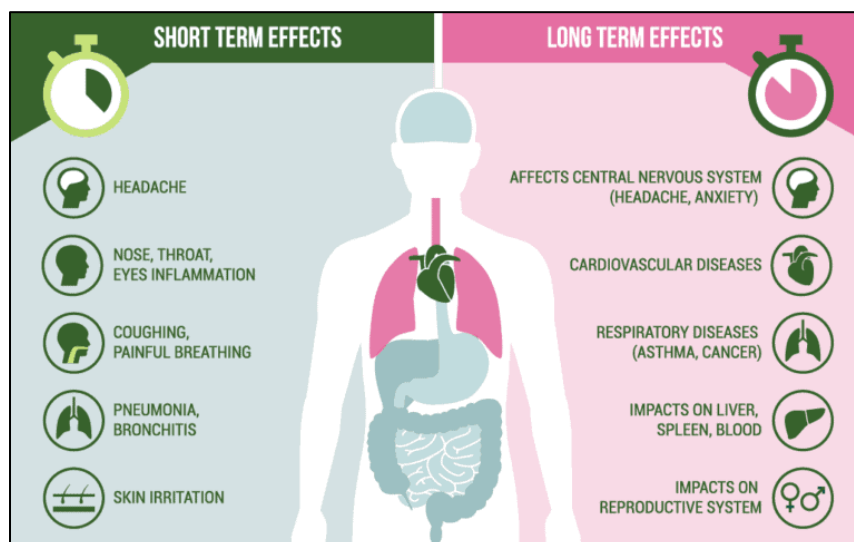
Tabla 1*Contaminantes y niveles de exposición*

Pollutant [links to historical tables of NAAQS reviews]		Primary/ Secondary	Averaging Time	Level	Form
Carbon Monoxide (CO)		primary	8 hours	9 ppm	Not to be exceeded more than once per year
			1 hour	35 ppm	
Lead (Pb)		primary and secondary	Rolling 3 month average	0.15 µg/m ³ ^[1]	Not to be exceeded
Nitrogen Dioxide (NO₂)		primary	1 hour	100 ppb	98th percentile of 1-hour daily maximum concentrations, averaged over 3 years
		primary and secondary	1 year	53 ppb ^[2]	Annual Mean
Ozone (O₃)		primary and secondary	8 hours	0.070 ppm ^[3]	Annual fourth-highest daily maximum 8-hour concentration, averaged over 3 years
Particle Pollution (PM)	PM _{2.5}	primary	1 year	12.0 µg/m ³	annual mean, averaged over 3 years
		secondary	1 year	15.0 µg/m ³	annual mean, averaged over 3 years
		primary and secondary	24 hours	35 µg/m ³	98th percentile, averaged over 3 years
	PM ₁₀	primary and secondary	24 hours	150 µg/m ³	Not to be exceeded more than once per year on average over 3 years
Sulfur Dioxide (SO₂)		primary	1 hour	75 ppb ^[4]	99th percentile of 1-hour daily maximum concentrations, averaged over 3 years
		secondary	3 hours	0.5 ppm	Not to be exceeded more than once per year

Nota. Según el “National Ambient Air Quality Standards (40 CFR part 50)” – (NAAQS) se presentan las concentraciones y los tiempos de exposición para los contaminantes aéreos. (EPA., 2022) (<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>).

Figura 4

Peligros asociados a la exposición



Nota. Muestra los peligros biológicos, químicos y físicos asociados a la exposición, a largo y a corto plazo (Department of Agriculture, Environment and Rural Affairs of Northern Ireland Government (MyNI)., 2019). (<https://www.myni.life/health-and-wellbeing/what-are-the-effects-of-air-pollution-on-the-human-body/>)

Leyes y reglamentaciones aplicables: (LIMITES DE LOS CONTAMINANTES)

Las reglamentaciones aplicables para la calidad del aire se pueden encontrar en las páginas de las agencias federales y del gobierno de Puerto Rico (EPA., 2022, LexJuris Puerto Rico., 2000 y LexJuris Puerto Rico., 2019). La Ley del Aire Limpio (“Clean Air Act”) y los Estándares Nacionales Ambientales de la Calidad del Aire (“National Ambient Air Quality Standards”), entre otras leyes relacionadas al aire están publicadas para el acceso al público en general. De manera que se pueda dar la atención y el manejo necesario, para asegurar la seguridad de la población (EPA., 2022). Además, la OSHA (2011), cuenta con documentos de guías para adiestrar a los empleados en cuanto a su seguridad en el ambiente de trabajo, bajo impacto en la

calidad del aire. Sin olvidar, que la parte de las reglamentaciones aplicables al aire para la isla de Puerto Rico, las recientes publicaciones de artículos científicos para el tópico pueden acompañar al adiestramiento de las leyes, como es el ejemplo de la revista de “Journal of Environmental Health (2020)”, en la cual se habla de las legislaciones de salud ambiental.

Modelos geográficos y bases de datos:

Según Taboureau, O. et al (2020), la predicción por medio de las bases de datos son una alternativa viable para señalar condiciones de salud resultantes, debido a exposición por contaminantes generales. En cuanto a los modelos de predicción geográficos, Danesh Yazdi, M. et al (2021), los presenta como relevantes para demostrar el impacto de diferentes concentraciones de contaminantes aéreos, en términos de mortalidad de la población de personas mayores de edad en Estados Unidos. Por tanto, la investigación se centrará en los modelos de computación química en referencia a los modelos geográficos y de bases de datos científicas para predecir el impacto por los contaminantes aéreos a la población de Puerto Rico.

Lugares contaminados en Puerto Rico que permitan ser analizados mediante análisis computacional/ o Modelos de dispersión:

Para realizar la búsqueda de lugares contaminados en la isla, la evaluación de las noticias ambientales que demuestran un potencial impacto al aire y que los contaminantes contengan las características de ser dañinos o peligrosos para la salud debe ser tomado en consideración. Siendo así, mediante la página del Superfondo, la búsqueda se puede especificar para la isla y la información de los contaminantes es brindada, de manera que posibilita la selección de un lugar de relevancia ante contaminantes importantes para la investigación (EPA., 2021). Parte de los lugares que cumplen con las características antes mencionadas; algunos de estos serían, los

vertederos, ya que por la producción de gases hay ciertas medidas que deben llevarse a cabo para asegurar el bienestar ambiental (EPA., 2022 y Ofungwu, J., & Eget, S., 2009).

En adición a esto, el riesgo de una posible explosión esta presente por la presencia de metano y información sobre la primera explosión en vertederos data del 1980 en Inglaterra como precedente a considerar (The Landfill Gas Expert (IPPTS Associates), 2012). Sin embargo, la importancia de los vertederos no radica en solo contaminantes que pueden ser expulsados a la atmosfera de forma directa, si no, de los contaminantes que pueden ser evaporados (que son volátiles) a partir del agua o incluso del lixiviado. Un ejemplo de esto sería el vertedero Proteco de Peñuelas, que según la publicación por parte de “Noticel” en 2018; se informaba que este vertedero de desperdicios peligrosos amenazaba las aguas de dicho municipio. Por tanto, el lugar del Vertedero de Proteco, al presentar el caso mencionado anteriormente, presenta un posible lugar de estudio con la necesidad de modelos de predicción de dispersión de sus contaminantes.

5. Marco Teórico

Enfocándose en la contaminación del aire, historia o datos referentes a la calidad: El Consejo de Defensa de los Recursos Naturales (NRDC por sus siglas en inglés), por parte de Mackenzie, J. & Turrentine, J. en 2021 menciona:

Por definición, la contaminación del aire es la liberación de contaminantes al mismo, contaminantes que son perjudiciales tanto para la salud humana como para todo el planeta. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año la contaminación del aire es la responsable de aproximadamente siete millones de muertes globalmente. Actualmente, nueve de diez humanos respira aire que excede los límites guías de contaminantes de la OMS. Como parte de la historia referente a la contaminación en aire, por parte de los Estados Unidos, surge la Ley de Aire Limpio (CAA por sus siglas en inglés); la cual autoriza a la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) a regular las emisiones de contaminantes aéreos perjudiciales de manera que sea posible salvaguardar la salud pública. Se menciona que la contaminación del aire es causada por la quema de combustibles mayormente, debido a que por contaminantes como el bióxido de carbono y el metano por ejemplo provoca nuestro enfrentamiento a aumentos en la temperatura del planeta. De igual forma la contaminación del aire puede dividirse en varios renglones donde tenemos la contaminación por el “smog” o niebla toxica, la cual a consecuencia del aumento en temperatura empeora, formándose cuando el clima es cálido y cuando cuenta con más radiación ultravioleta. Se detalla que el cambio climático también aumenta la producción de contaminantes atmosféricos alergénicos (por ejemplo: el moho y el polen).

Refiriéndose a la importancia de la calidad del aire en Puerto Rico, este es un asunto de gran atención para los que tienen familiares o sufren de asma y otras condiciones de salud. El 2 de mayo de 2022, se llevó a cabo la Celebración de la Semana de la Conciencia sobre la Calidad del Aire en Puerto Rico, demostrando en sí que la calidad del aire en la isla está siendo observada (Cochrane & Associates, LLC., 2022).

En lo que a la salud se refiere la población de Puerto Rico tiene un enfoque particular a lo que son los vertederos de la isla, sus capacidades y desperdicios; sin olvidar que estos pueden contribuir a la contaminación aérea. Por este motivo, la investigación se centrará en el vertedero de desperdicios peligrosos de Peñuelas Proteco. En mayo de 2018 el lugar fue propuesto para la “Lista de Prioridades Nacionales” por parte de la EPA, para el Superfondo; y en mayo de 2019 se estableció el mismo oficialmente bajo la lista. En la actualidad este vertedero se encuentra abandonado desde el 2001 y bajo limpieza de la EPA. “El mismo opero desde el 1975 al 1999, aceptando una variedad de desechos, de los cuales se pueden mencionar: lodos residuales de enchapes (galvanoplastia), plaguicidas y desechos farmacéuticos e industriales. La orden de cierre se originó a partir de querer investigar la potencial contaminación con mercurio y disolventes, de las aguas subterráneas (que abarcan incluyendo la propiedad cuatro millas) que sirven de abasto público y privado de agua potable a más de 17,000 residentes de la población. Se menciona que las escorrentías de las erosiones severas tienen posibilidad de estar contaminando la cuenca” (EPA, 2018 y Noticel., 2018). Información acerca de los contaminantes en el lugar serán presentadas más adelante.

Entre los contaminantes aéreos para esta investigación se reconocen: los contaminantes primarios, en los cuales se encuentran los contaminantes orgánicos volátiles (VOC's por sus siglas en inglés) y los contaminantes secundarios, como se mencionó anteriormente en la justificación. Por otro lado, según el DRNA (2021), algunos de los contaminantes registrados en Puerto Rico son: Particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, Dióxido de Sulfuro (SO_2), Dióxido de Nitrogeno (NO_2), Ozono (O_3), Plomo (Pb), Monóxido de Carbono (CO) y Especiación de $PM_{2.5}$.

Entre los modelos de dispersión en aire para simulación de contaminantes la EPA muestra varios como modelos alternativos: Air Force Dispersion Assessment Model (ADAM), Atmospheric Dispersion Modeling System (ADMS), AFTOX, Assessment System for Population Exposure Nationwide (ASPEN), BLP, CAL3QHC/CAL3QHCR, CALINE3, CALPUFF, entre una amplia variedad de modelos (EPA., 2022). Sin embargo, entre los modelos preferidos y recomendados la EPA muestra: “American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD), Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS) y Offshore and Coastal Dispersion Model Version 5 (OCD)” (EPA., 2022). De estos modelos AERMOD, es el que reemplaza a ISC3 (un modelo ampliamente utilizado para investigaciones) y el cual contiene mayor documentación (EPA., 2022). Es importante saber que AERMOD cuenta con un paso final para la visualización de la dispersión de la contaminación; en la cual se utiliza la aplicación de QGIS. Por tanto, se puede partir solo de QGIS para realizar un modelo de dispersión, sin la utilización de un modelo de dispersión amplio como lo es AERMOD y esto a su vez es corroborado por varios expertos y literatura científica (Chavez, V., 2023).

Otro aspecto que debe ser tomado en consideración de acuerdo con Ali, H. & Khan E. (2017), son los “Drivers Pressure State Impact Response (DPSIR)” o en resumen la ampliación del marco de referencia, es una parte clave para esta investigación, por tanto, cada uno de los factores del DPSIR, serán considerados, para asegurar los menos errores posibles en la investigación. Al comienzo, durante y al final de la investigación los mismos serán evaluados para realizar las respectivas recomendaciones futuras. Además se debe considerar que según la ONU (2019), en la página: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/cinco-razones-por-las-que-la-contaminacion-del-aire-debe>, menciona que la mayoría de la población desconoce los tópicos relacionados a la investigación (en si hay falta de conciencia), por tanto, se busca presentar la misma de la manera más comprensible posible. Todo esto en busca de educar a la población y compartir los hallazgos de la investigación.

Dentro del marco teórico, también se debe informar que para enriquecer conocimientos y entender la teoría y parte práctica, se tomaron: cursos de modelación en aire (Udemy, Inc., 2021) y muchos talleres provistos tanto por la EPA, como por Sigma-Aldrich, pero para efectos de relevancia con la investigación, a continuación, en la **Tabla 2** se encuentran los más relacionados a la misma.

Tabla 2

Talleres y adiestramientos tomados para conocimiento teórico y práctico en la investigación

Talleres y/o “Webinars”:	
EPA:	• Web Based Data Visualization of Air Sensor Data with RETIGO Version 4. • EnviroAtlas: Connecting People, Nature, Health, and the Economy Training Webinar Archive. • EPA’s Wind Tunnel Modeling Urban Wind Flow & Dispersion. • EPA Webinar: Temperature, Precipitation, & More: Datasets for Comprehensive Analysis of Local Climate Change Impacts. • EPA Webinar: Health Impacts of Air Pollutants Beyond Cardiovascular or Respiratory Effects. • ACE Research Webinar: Airborne Survey Methane from U.S. Landfills. • Technical Assistance for Vapor Intrusion. • U.S. EPA Webinar: AI in Disaster Preparedness, Response, and Recovery. • EPA Tools & Resources Training Webinar: WSMART and AirNow Fire & Smoke Map. Wildfire Smoke Air Monitoring Response Technology & AirNow Fire and Smoke Map.
Sigma-Aldrich & Millipore Sigma:	• Millipore Sigma: Let’s Clear the Air: Get better results from PFAS air testing Title: Optimizing Other Test Method (OTM) 45: Dos and Don’ts from a Panel of PFAS Experts. • Sigma Aldrich/ Millipore Sigma: Live Webinar. Free webinar. Accelerating Chemical Synthesis: Digital Innovations for Lab to Industrial Scale. Smarter Synthesis in Labs.

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Nota. Registro para tomar los talleres y/o “webinars” e incluso para ver, son encontrados en las páginas de la EPA y de Sigma-Aldrich.

6. Hipótesis

Predecir el comportamiento de dispersión del contaminante 1,2-dicloroetano presente en el vertedero Proteco de Peñuelas, Puerto Rico.

7. Metodología

La metodología general para la investigación fue enfocada a: la selección del lugar de estudio con registro de contaminantes, la selección del modelo de dispersión, realizar una réplica del modelo (en el lugar original de estudio), y realizar el modelo con los datos de Puerto Rico. Sin embargo, a continuación, se mostrará la metodología en más detalle.

7.1. Diseño de la investigación- Visión general

Luego de la revisión de literatura (la cual se presenta anteriormente) acerca de la contaminación aérea, como primer paso se procedió a identificar lugares de exposición en los cuales se puedan identificar los contaminantes, aplicar modelos de predicción, registrar la información, todos esto para finalmente poder encontrar soluciones posibles ante las concentraciones que se presenten en el área.

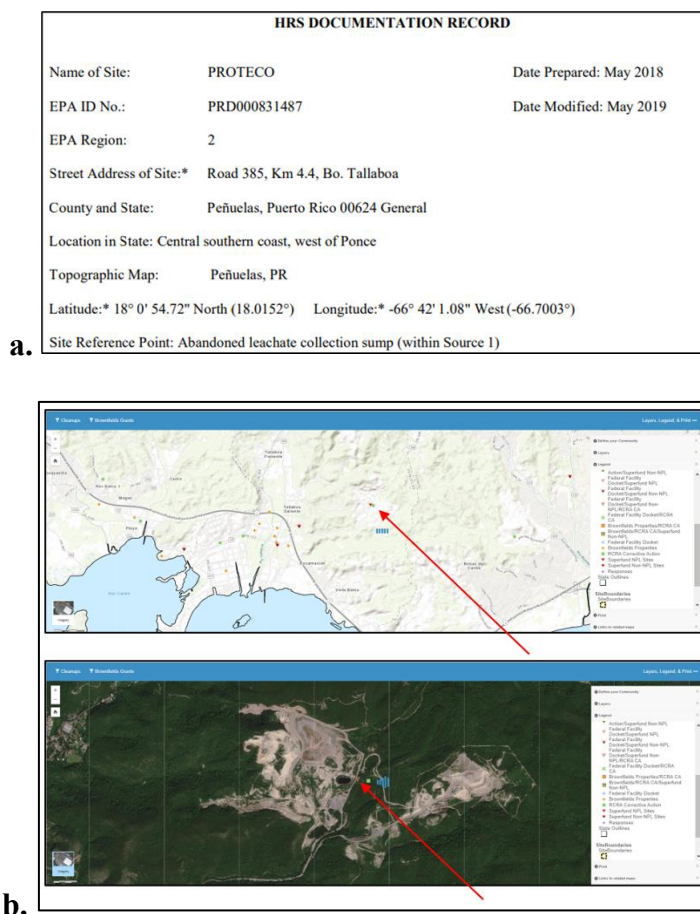
7.2. Determinación del área de estudio

Por lo tanto, para la determinación del área de estudio, se considerará la lista del Superfondo de los Estados Unidos, ya que en el mismo se presentan lugares que pueden estar asociados a contaminantes aéreos en Puerto Rico (EPA., 2021). De las áreas de la Isla, se les prestará especial atención a las zonas urbanas (las cuales cuentan con mayor población); que de acuerdo al Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA), estas zonas pueden identificarse mediante el mapa que se proporciona bajo la página oficial de la agencia (Martinuzzi, S., Gould, W. A., Ramos Gonzalez, O. M., Quinones, M., & Jimenez, M. E., 2008).

De los lugares potenciales para la investigación, PROTECO (Vertedero de Peñuelas, P.R.), es un lugar que figura en la lista del Superfondo, y que, en adición a esto, según el mapa del “USDA”, el mismo se encuentra en una zona urbana. PROTECO presenta un impacto al ambiente y a la salud, debido a los riesgos relacionados al lugar y áreas aledañas al mismo. Además, posee contaminantes que tienen la posibilidad de estar presentes en el aire. Entre las características del lugar se encuentra que el mismo opero en el pasado como Vertedero de Sustancias Peligrosas hasta los años 1999 y que se cuenta con registros de contaminación a pozos de agua subterránea que suple de forma pública y privada a una población de más de 17,000 habitantes de la isla (EPA., 2022).

Figura 5

Localización del área de estudio

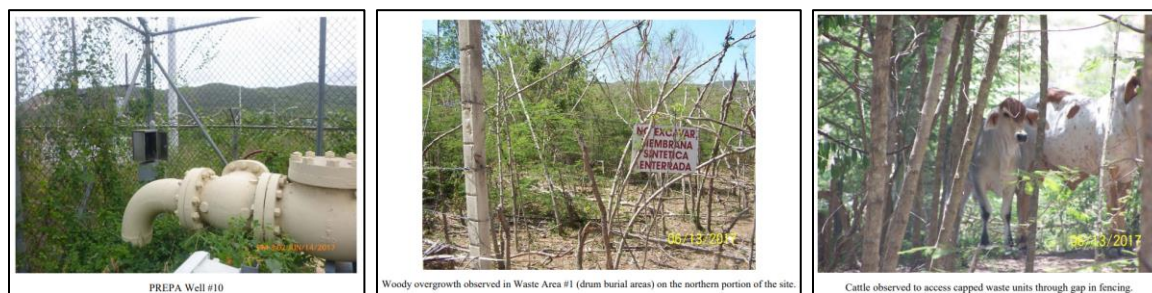


Nota. En la parte **a.** de la figura se muestra la información de la localización de Proteco en Peñuelas, Puerto Rico. En adición a esto, en la parte **b.** se muestra las imágenes satelitales de la localización. (EPA., 2016 y Decir, J., 2019).
(<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>)

Nota: Mediante la utilización de “Googlemaps 2D” se puede observar el vertedero en las coordenadas que proveen los documentos de la EPA, de manera satelital “animada” o con movimiento.

Figura 6

Imágenes de Proteco



Nota. Fotos generales de Proteco bajo documentación del “Hazard Ranking System (HRS)” (Decir, J. 2019). (<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>)

Pero para lograr esto se procedió primero a mediante un modelo de simulación y predicción (mediante la aplicación de QGIS), mostrar la dispersión de contaminantes para la población. El modelo se está trabajando en base a la réplica de un procedimiento o tutorial realizado en Perú. Una vez se logre replicar el procedimiento, se trabajará el procedimiento de forma similar para la isla de P.R. (Chavez, V., 2023).

7.3. Listado o registro de Contaminantes y/o Selección de Muestras (Niveles de concentración de los contaminantes).

Para enlistar los contaminantes presentes, estos serán obtenidos mediante los registros de la EPA y sus Informes de data de las investigaciones realizadas en el lugar (de manera que esta investigación será realizada sin exposición al lugar), ya que el área de estudio figura en la Lista de Prioridades Nacionales. Las muestras serán evaluadas a partir de los datos de los muestreos realizados en los pozos de agua potable, siendo así se determinarán los contaminantes (secundarios) que tiene la posibilidad de convertirse en Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC'S), para ser analizados en aire.

Entre los contaminantes algunos de los que se encuentran de manera general son (EPA., 2022):

- Mercurio
- Tetracloroetileno (PCE)
- 1,1-dicloroetileno (DCE)
- Tricloroetileno (TCE)
- Trans-1,2- dicloroetileno (Trans-1,2-DCE)
- 1,1,1-tricloroetano (1,1,1-TCA)
- 1,1-dicloroetano (1,1-DCA)
- 1,2-dicloroetano (DCA)

A continuación, se muestra como los VOC's, en términos de gases tienen rutas de migración que pueden afectar la población.

Figura 7

Ruta de migración en aire para los contaminantes

Air Migration Pathway

ORIGINAL HRS

Likelihood of Release	X	Waste Characteristics	X	Targets
Observed Release		Reactivity and Incompatibility Toxicity Hazardous Waste Quantity		Population Within 4-Mile Radius Distance to Sensitive Environment Land Use

FINAL HRS

Likelihood of Release	X	Waste Characteristics	X	Targets
Observed Release or Potential to Release		Toxicity/Mobility Hazardous Waste Quantity		Nearest Individual Population Resources Sensitive Environments
Gas				
Gas Containment				
Gas Source Type				
Gas Migration Potential				
Particulate				
Particulate Containment				
Particulate Source Type				
Particulate Migration Potential				

BILLING CODE 6900-98-C

Nota. Imagen que describe las características de los desperdicios por la ruta de migración de aire en el lugar (Decir, J., 2019). (<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>)

Los VOC's (volatile organic compounds) o vapor- intrusión candidates (como lo trabaja la EPA), son suficiente volátiles y son considerados por la ley de henry o como presión de vapor. Esta ley dice si un compuesto químico prefiere más el aire vs el agua. El factor de Henry para cada VOCs es diferente. Pero de acuerdo con la información que provee la EPA para “vapor-intrusion screening/approximation values” el concepto para la ley de Henry, para el factor (H') es recomendado tratar las constantes a una temperatura de $\sim 25^{\circ}\text{C}$. Por tanto, es necesario recordar que las concentraciones calculadas a partir de este serán concentraciones relativas o una aproximación, y no una realidad absoluta.

Por otra parte, como contaminantes registrados en términos de volatilización desde los pozos del vertedero encontramos los siguientes:

Tabla 3

Concentración de Contaminantes en los pozos de Proteco.

Tabla. Concentración de Contaminantes en los pozos de Proteco.

Contaminantes encontrados en pozos dentro de Proteco. (VOCs)	En que pozo y página de documento de la EPA en que se encuentra*. Pozo / pág.	Concentración en agua (ppb o µg/L).	Factor de Henry (H') aproximado para cada contaminante. ***
"Methylene chloride" ("diclorometano")	23 W-85 / 876 77 WVS- 88 78 WVS-88** / 878	140	0.12
"Xylenes"	23 W-85 / 876	2	0.27
"Trichlorofluoromethane"	23 W-85 / 876	210	1.10
"Chloroethane"	54 MSW88 / 877	10	0.70
"1,2-trans-dichloroethene"	54 MSW88 / 877	110	0.40
"Tetrachloroethylene"	54 MSW88 / 877	320	0.75
"Trichloroethylene (TCE)"	54 MSW88 / 877	69	0.40
"Acetone"	77 WVS- 88 / 878	69	0.0015
"1,1-dichloroethene (1,1-DCE)"	77 WVS- 88 78 WVS-88** 18W-85 / 878	70	0.90
Chloroform	77 WVS- 88 18W-85** / 879	9	0.15
"1,2-Dichloroethane (1,2-DCA)"	77 WVS- 88** 78 WVS-88 / 878	14,000	0.0011
"1,1,1-Trichloroethane" (1,1,1-TCA)	77 WVS- 88 / 878	34	0.70
"Benzene"	77 WVS- 88 / 878	20	0.22
"Toluene"	77 WVS- 88 / 878	5	0.27
"dichloroethane" (DCA)	18W-85 / 879	75	No se tomarán en consideración, ya que una versión de DCA, con mayor cantidad de concentración está presente anteriormente.
"1,1,-dichloroethane" (1,1-DCA)	18W-85 / 879	7	
Una vez realizada la conversión de estas cantidades de la manera apropiada se puede presentar la cantidad para el Q ("emission rate") del contaminante a modelar en base a los siguientes nombres: Vapor Potencial Relativo, "Air Proxy Concentration", Índice de Fortaleza de la Fuente de Vapor, y Potencial Relativo Estimado de Volatilización.			

*Documento de la EPA: "HRS Documentation Record with References for the Proteco Site". (El documento que tiene nombre duplicado por la EPA, pero es el de 6,346 páginas).

**Se escogió el pozo con la concentración mayor reportada.

*** Factor de Henry (H') para cada contaminante, encontrado en las siguientes fuentes:

- (National Center for Biotechnology Information, 2024)
- (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024)
- (U.S. Environmental Protection Agency, 2023)

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Tabla 4

Contaminante seleccionado de la *tabla anterior*

Contaminantes encontrados en pozos dentro de Proteco. (VOCs)	En que pozo y página de documento de la EPA en que se encuentra*. Pozo / pág.	Concentración en agua (ppb o ug/L).	Factor de Henry (H') aproximado para cada contaminante. ***
"1,2-Dichloroethane (1.2-DCA)"	77 WVS- 88** 78 WVS-88 / 878	14,000	0.0011

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Nota. Se observa la selección del contaminante con mayor concentración en agua.

A continuación, veremos la matemática aplicada para la conversión del contaminante seleccionado a ser el Q (tasa de emisión), que se utilizó en la fórmula gaussiana de la modelación:

Se seleccionó el contaminante **1,2- dicloroetano** (el de cantidad mayor) con una concentración en el pozo de 14,000 ppb. Se procedió a convertir la cantidad de ppb a $1\mu\text{g/L} = 0.001\text{mg/L}$. Entonces, resulta que $14,000\text{ ppb} = 14,000 \times 0.001 = 14\text{mg/L}$. Luego de esto para estimar un valor real del pozo, (todos estos valores originales son de la documentación de la EPA), se obtuvo un valor de diámetro de 2 pulgadas que en radio sería 1 pulgada = 0.0254 metros. Para el largo de la columna de agua (T) tenemos un pozo poco profundo de rango medio aproximado de 15 metros (aprox. 50 pies de columna de agua). Siendo así, se calcula el volumen utilizando la fórmula: $V=\pi r^2 h \rightarrow V=\pi(0.0254)^2(15) \rightarrow V\approx 0.0304\text{ m}^3$. Con una conversión a litros de: $0.0304\text{m}^3 = 30.4\text{L}$, lo cual nos lleva a un volumen estimado para el pozo de $\approx 30\text{L}$. Luego para calcular el total de contaminantes en masa en un pozo, se procedió con lo siguiente.

Masa = [Concentracion] x Volumen $\rightarrow 14\text{mg/L} \times 30.4\text{L} = 425.6\text{mg} \rightarrow \approx 0.426$ gramos de 1,2-dicloroetano en el pozo. Con esta información, se procedió a la conversión a Q (tasa de emisión) (que se utilizó en la fórmula gaussiana). Por tanto, la fórmula sería: Q = masa por tiempo (g/s), y teniendo solo la masa en agua, se procedió a estimar la evaporación (realizar una asunción para modelación). Si se asume que: 1% de la masa se volatiliza por hora (lo cual es típico para “screening assumption for volatile organics”, como lo trabaja la EPA), entonces:

$0.426\text{g} \times 0.01 = 0.00426\text{g/hr} \rightarrow \text{convertido a segundos} \rightarrow Q = 0.00426/3600 = 1.18 \times 10^{-6}\text{g/s}$, lo cual es una tasa de emisión $\rightarrow Q \approx 1.2 \times 10^{-6}\text{g/s}$.

Pero como necesitamos que la estimación sea lo mas cercano a la realidad se procedió a añadir la constante de Henry a la matemática como veremos a continuación. Para 1,2- dicloroetano:

La constante de Henry es: $H' \approx 0.0011$ y el peso molecular es: 98.96 g/mol , convirtiendo la concentración obtenemos que de:

$14\text{mg/L} \rightarrow 14\text{mg/L} = 14,000\text{ mg/m}^3 = 14\text{ g/m}^3 \rightarrow \text{que en moles es} \rightarrow C_w = 14/98.96 \approx 0.141\text{mol/m}^3$

Teniendo este valor se procedió con la ley de Henry (equilibrio en concentración de aire) con la fórmula: $C_{\text{air}} = H' \times C_{\text{water}} \rightarrow C_{\text{air}} = 0.0011 \times 0.141 \rightarrow C_{\text{air}} \approx 1.55 \times 10^{-4}\text{ mol/m}^3$. Entonces para realizar una transferencia de masa por parte de aire (control de volatilización) para un pozo

pequeño y con una brisa suave, tendremos un coeficiente de transferencia de masa por parte de aire de: $k_a \approx 0.01\text{ m/s}$ (valor estándar utilizado en ingeniería ambiental). Por otro lado, para la

superficie de área del pozo tenemos (de antes calculado) un radio = 0.0254 metros , que aplicado a la fórmula de área tenemos: $A = \pi r^2 \rightarrow A = \pi (0.0254)^2 \approx 0.00203\text{m}^2$. Una vez calculado esto, se aplica la fórmula para el calculo de flujo de masa (importante paso para la fisica del modelo):

$J = k_a \times C_{\text{air}} \rightarrow J = 0.01\text{ m/s} \times 1.55 \times 10^{-4}\text{ mol/m}^3 \rightarrow J = 1.55 \times 10^{-6}\text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$

Una vez realizado lo anterior se convierte el flujo de masa a tasa de emisión (Q), como se muestra a continuación.

$Q = J \times A \rightarrow Q = (1.5 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}) \times 0.00203 \text{ m}^2 \rightarrow Q = 3.15 \times 10^{-9} \text{ mol/s} \rightarrow \text{convertido a gramos} \rightarrow$

$Q = 3.15 \times 10^{-9} \times 98.96 \rightarrow Q \approx 3.12 \times 10^{-7} \text{ g/s} \rightarrow \text{con un Q final de} \rightarrow Q \approx 3.12 \times 10^{-7} \text{ g/s} .$

Se analizó, que en Proteco hay 15 pozos aproximadamente y el cálculo realizado solo incluye uno, pero como se buscaba la realización de la modelación desde un punto fijo representado como localización total de los pozos, el cálculo para emisión total de todas los 15 pozos ($Q_{\text{total}} = n \times Q$), no se tomara en consideración; ya que a diferencia de lo documentado, no hay conocimiento de cuanto del contaminante puede estar saliendo de los demás pozos (solo se mencionandos) y en la **Tabla 4**, solo se obtuvo un valor (el mayor) para el contaminante en un pozo.

Figura 8

De la explicación anterior, se muestra, una manera enfocada, en los conceptos de la matemática realizada.

1,2- dicloroetano tiene una concentración en agua de: 14,000 ppb

ppb a $1\mu\text{g/L} = 0.001\text{mg/L}$
 $14,000 \text{ ppb} = 14,000 \times 0.001 = 14\text{mg/L} \rightarrow$
 $14\text{mg/L} = 14,000 \text{ mg/m}^3 = 14 \text{ g/m}^3 \rightarrow \text{que en moles es} \rightarrow C_w = 14/98.96 \text{ g/mol} \approx 0.141 \text{ mol/m}^3$

Estimación del valor real del pozo:

Area:

- diámetro de 2 pulgadas que en radio sería 1 pulgada = 0.0254 metros, que aplicado a la fórmula de área tenemos: $A = \pi r^2 \rightarrow A = \pi (0.0254)^2 \approx 0.00203 \text{ m}^2$
- largo de la columna de agua (T) profundidad de rango medio aproximado de 15 metros (aprox. 50 pies de columna de agua).

Volumen:

- fórmula: $V = \pi r^2 h \rightarrow V = \pi (0.0254)^2 (15) \rightarrow V \approx 0.0304 \text{ m}^3$
- con una conversión a litros de: $0.0304 \text{ m}^3 = 30.4 \text{ L}$, lo cual nos lleva a un volumen estimado para el pozo de $\approx 30 \text{ L}$.

Total de contaminantes en masa en un pozo:
Masa = [Concentración] x Volumen $\rightarrow 14\text{mg/L} \times 30.4 \text{ L} = 425.6\text{mg} \rightarrow \approx 0.426 \text{ gramos de 1,2-dicloroetano en el pozo.}$

Buscando que la estimación sea lo más cercano a la realidad se procede a añadir la **Ley de Henry** (equilibrio en concentración de aire)

- para 1,2- dicloroetano: $H' \approx 0.0011$ y el peso molecular es: 98.96 g/mol
- fórmula: $C_{\text{air}} = H' \times C_{\text{water}} \rightarrow C_{\text{air}} = 0.0011 \times 0.141 \rightarrow C_{\text{air}} \approx 1.55 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3$

Transferencia de masa por parte de aire (control de volatilización) para un pozo pequeño:

- coeficiente de transferencia de masa por parte de aire de: $k_a \approx 0.01 \text{ m/s}$ (valor estándar utilizado en ingeniería ambiental)

Flujo de masa (importante paso para la física del modelo):
 $J = k_a \times C_{\text{air}} \rightarrow J = 0.01 \text{ m/s} \times 1.55 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3 \rightarrow J = 1.55 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$

Tasa de emisión (Q):

- $Q = J \times A \rightarrow Q = (1.5 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}) \times 0.00203 \text{ m}^2 \rightarrow Q = 3.15 \times 10^{-9} \text{ mol/s} \rightarrow \text{convertido a gramos}$
 $\rightarrow Q = 3.15 \times 10^{-9} \times 98.96 \text{ g/mol} \rightarrow Q \approx 3.12 \times 10^{-7} \text{ g/s} \rightarrow \text{con un Q final de}$
 $\rightarrow Q \approx 3.12 \times 10^{-7} \text{ g/s}$

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Nota. Imagen del cálculo realizado de forma resumida o matemáticamente más visualizada en pasos.

Lo cual nos resulta con todos los componentes que necesita una ecuación gaussiana original:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Donde:

- “source” $\rightarrow Q = 3.1 \times 10^{-7}$ g/s
- “wind speed at stack height” $\rightarrow U = 2$ m/s
- “Stack height (ground-level source)” $\rightarrow H = 1$ m
- Coeficientes de Pasquill- Gifford para clase A (atmosfera inestable):

$$\checkmark \quad \sigma_y = 0.22x (1+0.0001x)^{-0.5} \rightarrow \text{“horizontal spread (left/right)”}$$

$$\checkmark \quad \sigma_z = 0.20x \rightarrow \text{“vertical spread (up/down)”}$$

En la mayoría de las modelaciones se asume $z = 0$ y el termino vertical para la fórmula se elimina la z . Pero a continuación se brinda la comparación de la fórmula utilizada vs la que se utiliza en el procedimiento original (pero con sus términos separados matemáticamente, para mayor comprensión), y a la misma vez, más adelante en el procedimiento, se mostrará la fórmula utilizada, con la sintaxis para el programa QGIS.

Figura 9*Comparación de Fórmulas*

Comparación de Fórmulas:

$$C(x, y) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

VS

$$\frac{3.1 \times 10^{-7}}{2\pi \sigma_y \sigma_z^2} \cdot \exp\left(-\frac{B^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \text{logical_and}(A > 1, 1)$$

Donde:

$A = Xw$
 $B = Yw$
 $\sigma_y = 0.22A(1+0.0001 \cdot A)^{-0.5}$
 $\sigma_z = 0.22 \cdot A$
 $\text{logical_and}(A > 1, 1) = \text{donde } A = X, \text{ y se evitan } X=0$

(Dumena- Fidueroa. Y. P.. 2026)

Nota. Se muestra la fórmula para el procedimiento original a replicar y la fórmula a utilizarse, con la explicación del término añadido en la misma.

7.4. Selección del modelo de computación y/o predicción.

Luego se realizó una búsqueda de literatura de acuerdo con los modelos (o programas) existentes de computación y/o predicción, para escoger el apropiado para realizar la investigación. Entre los modelos existentes la EPA en su página:

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>, enlista los preferidos y recomendados a la fecha (2022) con documentación y guías

provistas para cada programa o modelo que se presenta (EPA., 2022). De acuerdo con la literatura y las investigaciones actuales para la dispersión de contaminantes en el aire, uno de los modelos preferidos y aprobados por parte de la EPA lo es AERMOD, un modelo “open-source” disponible para el público en general que puede ser descargado por la página de la EPA (mediante la página principal de Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM): <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod>) (EPA., 2022).

Dentro de los procedimientos alternos realizados a lo largo de la investigación, resulto que el mismo no fue utilizado; debido a que al depender de data “open source”, las bases de datos desde donde se descargaban múltiples datos para realizar cada parte del modelo, en repetidas ocasiones cambiaban de dominio de página web y la obtención de datos no se podía realizar, de manera que imposibilitaba la investigación.

No obstante, hay que recalcar lo siguiente, AERMOD cuenta con un paso final (aparte de los pre-procesadores) para la visualización de la dispersión de la contaminación; en la cual se utiliza la aplicación de QGIS. Siendo así, de acuerdo con la búsqueda realizada, se realizó la modelación partiendo solo del programa de QGIS, sin la utilización de un modelo de dispersión amplio como lo es AERMOD (Chavez, V., 2023).

Por tanto, la elaboración del modelo de dispersión para la simulación del contaminante fue realizada mediante el programa de código abierto (“open source”) QGIS versión 3.44.7-“Solothurn” (2026). Y bajo las especificaciones de una computadora portátil (“ASUS Laptop PC”): “Windows 10”, “Processor: Intel(R) Core(TM) i7-5500 CPU @ 2.40GHz”, “Installed RAM 8.00GB”, “Graphics Card 128MB”, “Storage 447GB”, más una memoria externa de 1TB.

7.5. Análisis y validación de los parámetros.

Para asegurar un análisis correcto, la determinación de los parámetros se tomaron en consideración de acuerdo a la data con relación al clima en el área y el límite de capa estable (“Stable Boundary Layer” – SBL) (que asume que la distribución de la concentración es gaussiana (que es una distribución normal, bajo las gráficas de estadísticas) tanto de manera vertical como horizontal (EPA., 2022).

Tabla 4

Parámetros utilizados, colocados en una tabla similar, a la del estudio original.

Parámetro	Valor
Chimney Coordinates	108088.275700
	1995784.987000
Wind Speed at Stack Height (m/s)	2 m/s*
Effective Stack Height (m)	1 m
Atmospheric Stability	Tipo A
Wind Direction	310° **

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Nota. Parámetros y valores de procedimiento.

* Se justifica, ya que es un valor de aproximación utilizado para la visualización de un Contaminante Orgánico Volátil, para los cuales la EPA en “Screening VOC’s”, utiliza valores que se aproximan a este, por que, al el contaminante ser tan volátil, se busca lograr una visualización de dispersión del mismo.

** Se justifica, ya que la dirección del viento en Perú es similar a la de la Isla que va de 270° a 310° en horario am en los “forecasts” del tiempo.

Estos valores se encuentran en la parte del cálculo realizado (y mediante estimación, son extraídos de la documentación de la EPA de la cual se obtuvo la concentración de los contaminantes), menos las coordenadas que se explican más adelante en el procedimiento, donde se realizó la conversión, y en el comienzo del procedimiento para PR con la data real.

La fórmula final se trabajó como una simplificación a la fórmula gaussiana, donde luego de muchas corridas y pruebas anteriores; para que la dispersión: estructuralmente, matemáticamente, físicamente sea visualizada en forma de un penacho gaussiano, de manera que QGIS lo pudiera correr, sin que se aborte o produzcan errores en la corrida. De manera que queda un modelo 3D a nivel de dispersión por la deposición de contaminantes en el suelo, pero 2D a nivel de la elevación en el modelo; donde no se usa la velocidad del viento y el decaimiento vertical; y se considera la reflexión y rotación para la línea de la dirección del viento (lo cual es ampliamente visto en los fundamentos de química atmosférica, física y modelación gaussiana). Lo realizado en el procedimiento se sustenta por las siguientes referencias, incluyendo la de Videl Chavez.

Figura 10

Artículos de interés para la investigación



Nota. Referencias de los artículos científicos que se muestran, se encuentran incluidas en la bibliografía.

7.6. Posibles soluciones ante las concentraciones resultantes.

Los resultados de la predicción serán discutidos y analizados con el fin de evaluar los objetivos de la investigación. Según la data obtenida se exhorta a la población a: evaluar los tipos de filtros (por ejemplo: los filtros de “High efficiency particulate air” (HEPA)), de acuerdo con la concentración del contaminante resultante; a realizar planes para recomendaciones que puedan ir en vía de lograr la menor exposición al contaminante (como por ejemplo: buscar un lugar con mayor ventilación, donde el contaminante no este concentrado); y principalmente a recurrir a brindar la educación para la población en cuanto a su propia protección y hasta a que lugares cercanos a su propiedad puede acercarse (a fin de que visualicen las búsquedas científicas y ciencia ciudadana como necesaria para su protección) (EPA., 2022).

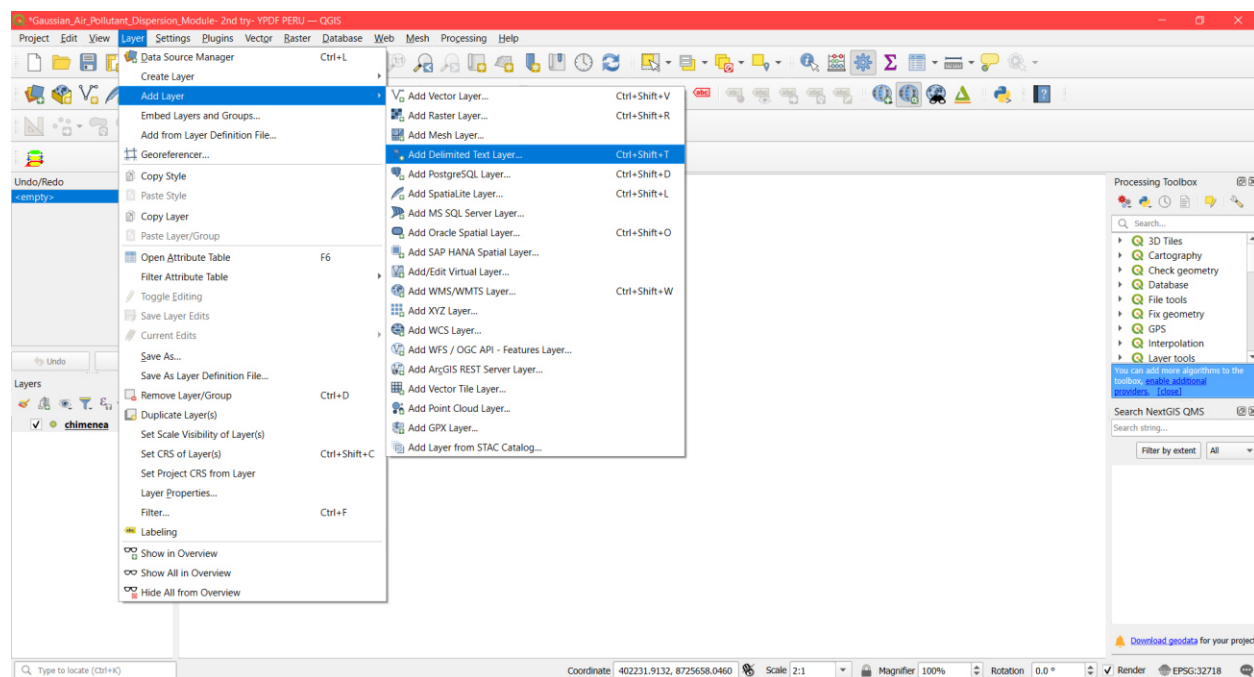
7.7. Procedimiento de la Aplicación de QGIS en Perú.

A continuación, se muestra el procedimiento para réplica del modelo basado en el Modelo Gaussiano que se mostró anteriormente en la **Figura 10** bajo la referencia de: “Gaussian air pollutant dispersion module in QGIS” por Chavez, V. (2023).

Paso1 “Load the Source Point”

Se procedió a abrir QGIS, un nuevo proyecto. Se guardó el proyecto como “2nd try” en adicional al anterior para diferenciarlos. Se procedió a añadir el CVS file (documento descargado por nombre “chimenea”) a QGIS (previo a esto se hizo un nuevo folder con los documentos a utilizarse, nuevamente para realizar el “2nd try”, en caso de que el “pathway” sea un obstáculo no previsto). Se nombró los puntos de coordenadas X (Este), Y (Norte) y el CRS (“coordinates reference system”) para Peru (EPSG:32718- WGS/ UTM zone 18S).

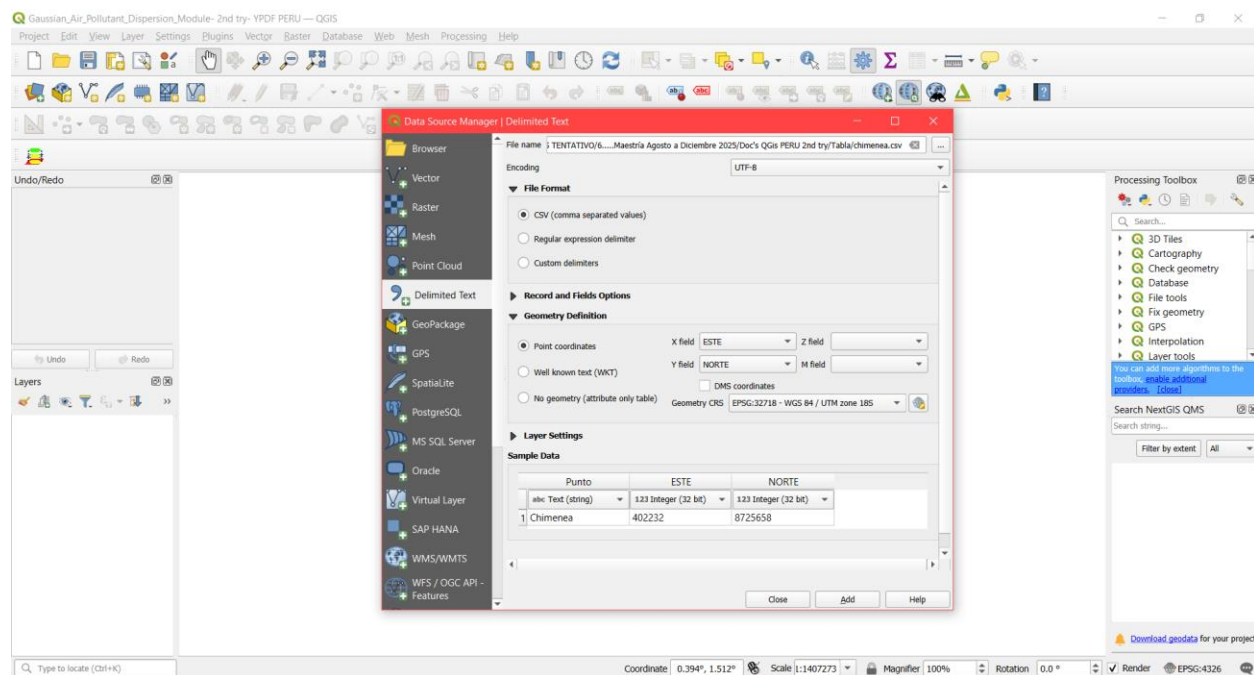
Figura 11

Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 12

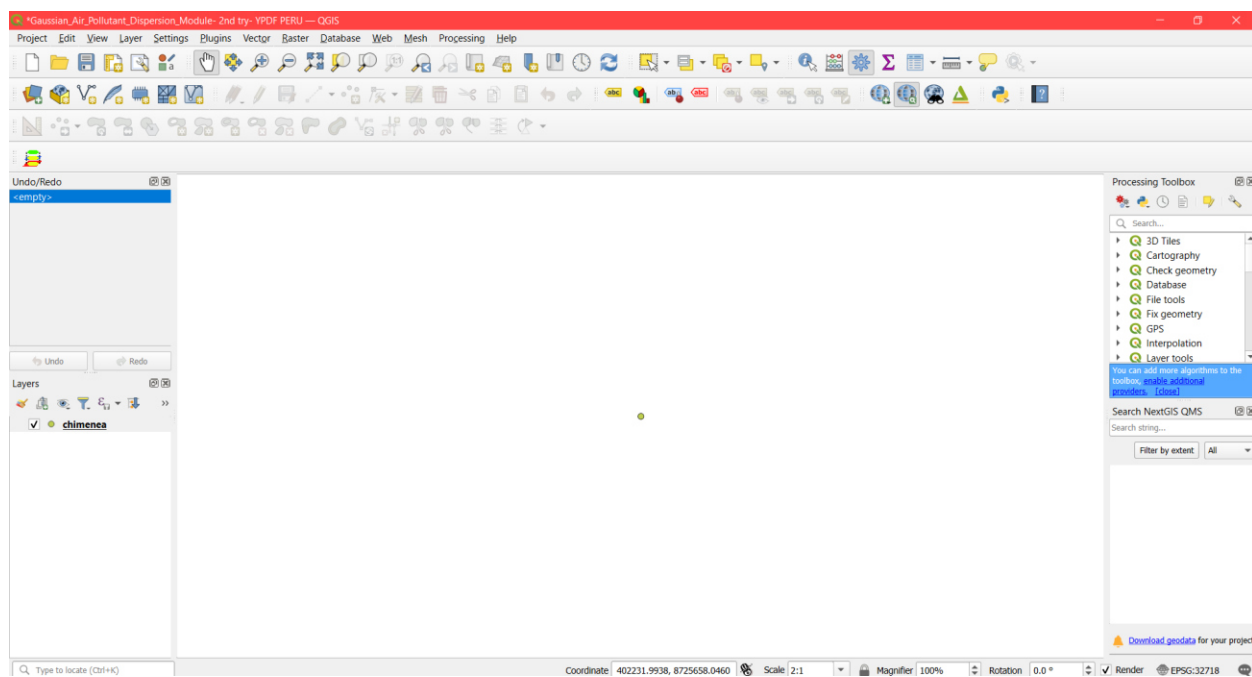
Información añadida



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 13

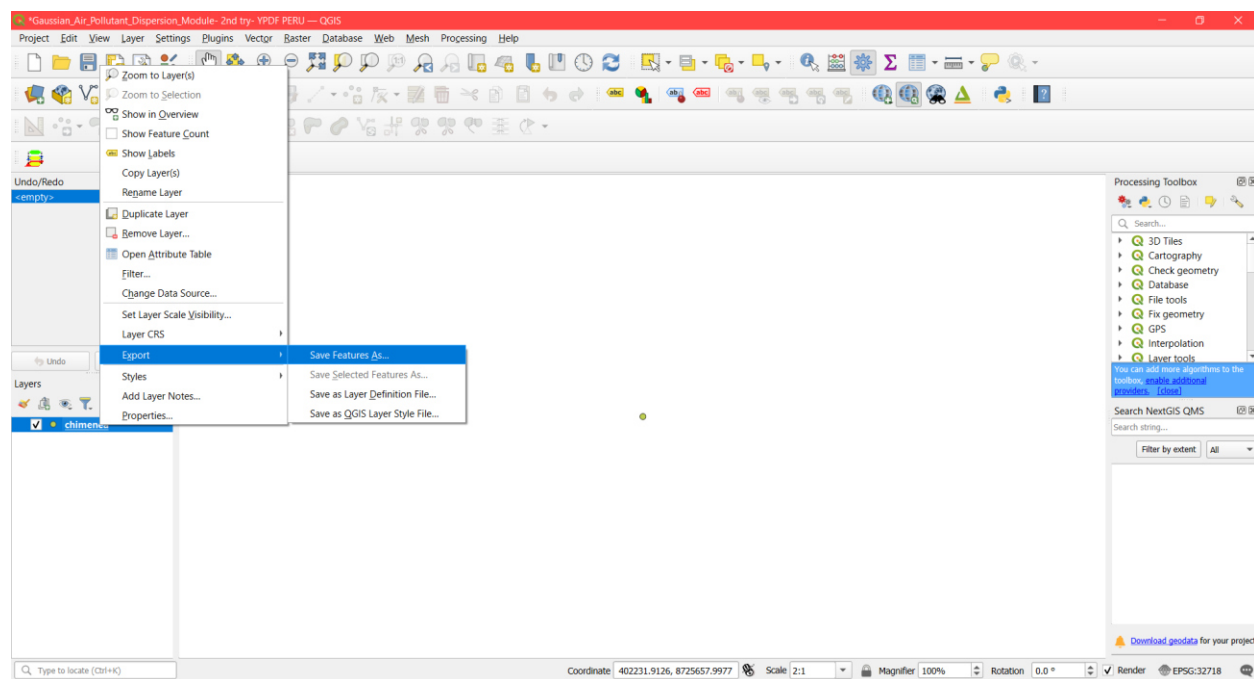
Punto de la localización de Perú presentada en el mapa



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 14

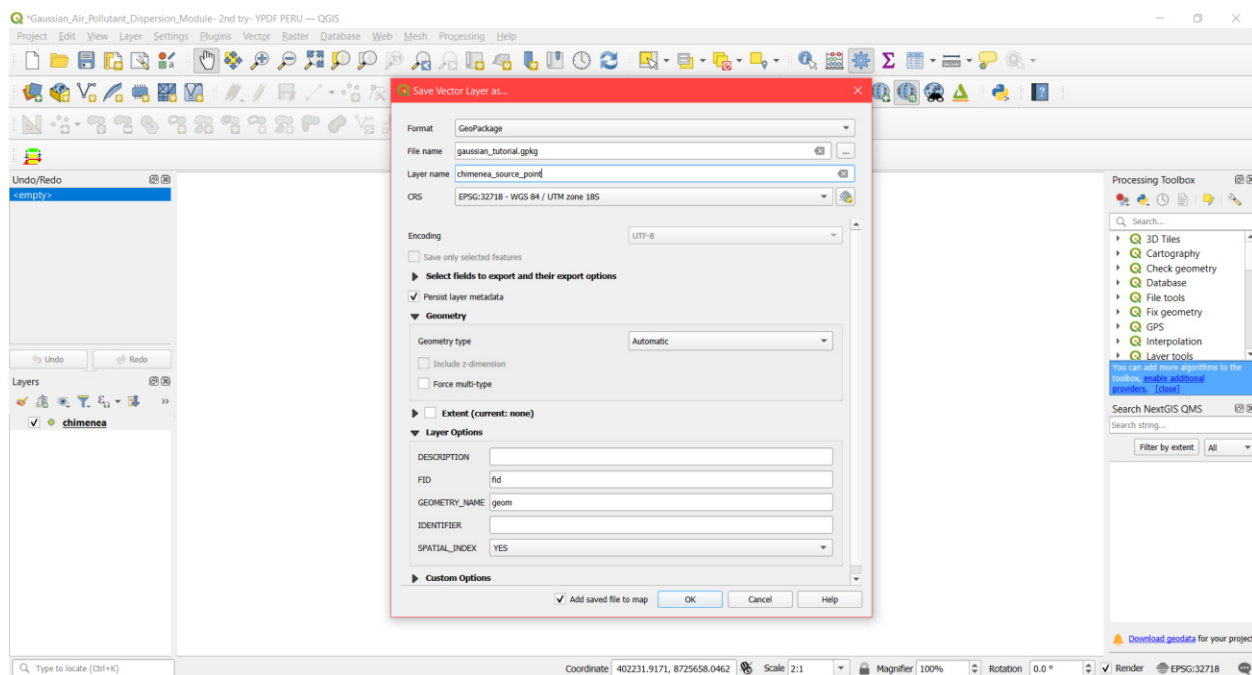
Guardar para que sea un “layer” regular de QGIS



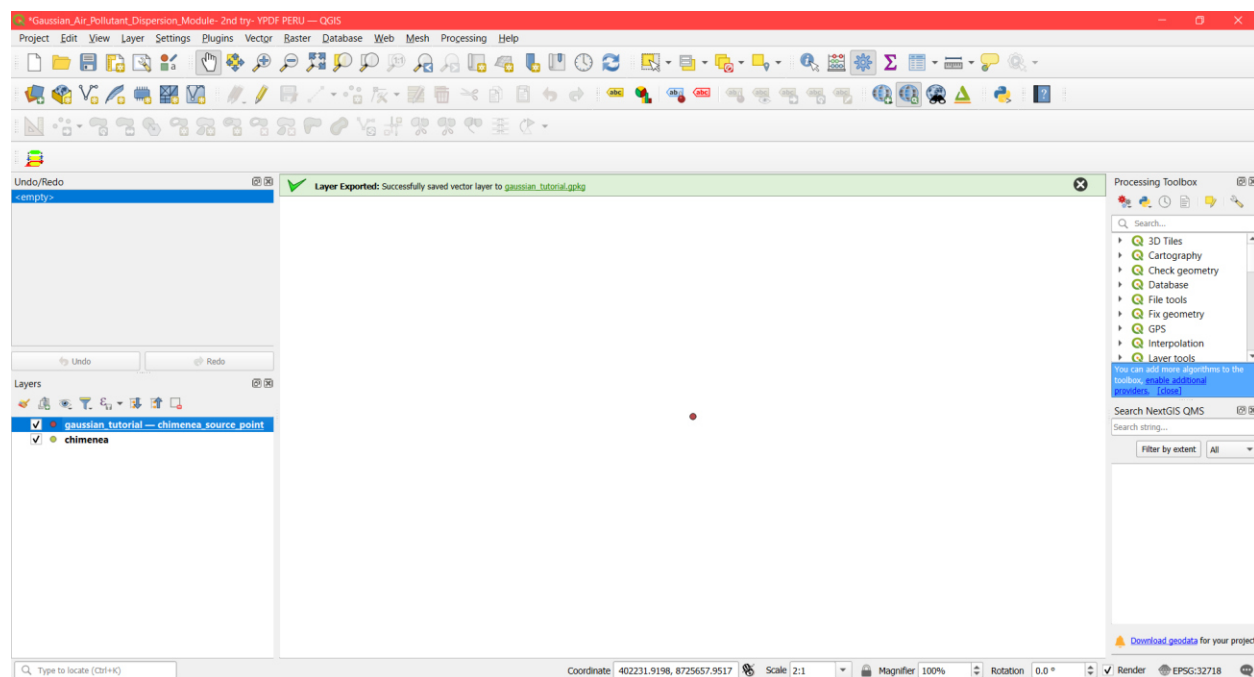
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 15

Información añadida



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 16*Visualización del “layer” en QGIS*

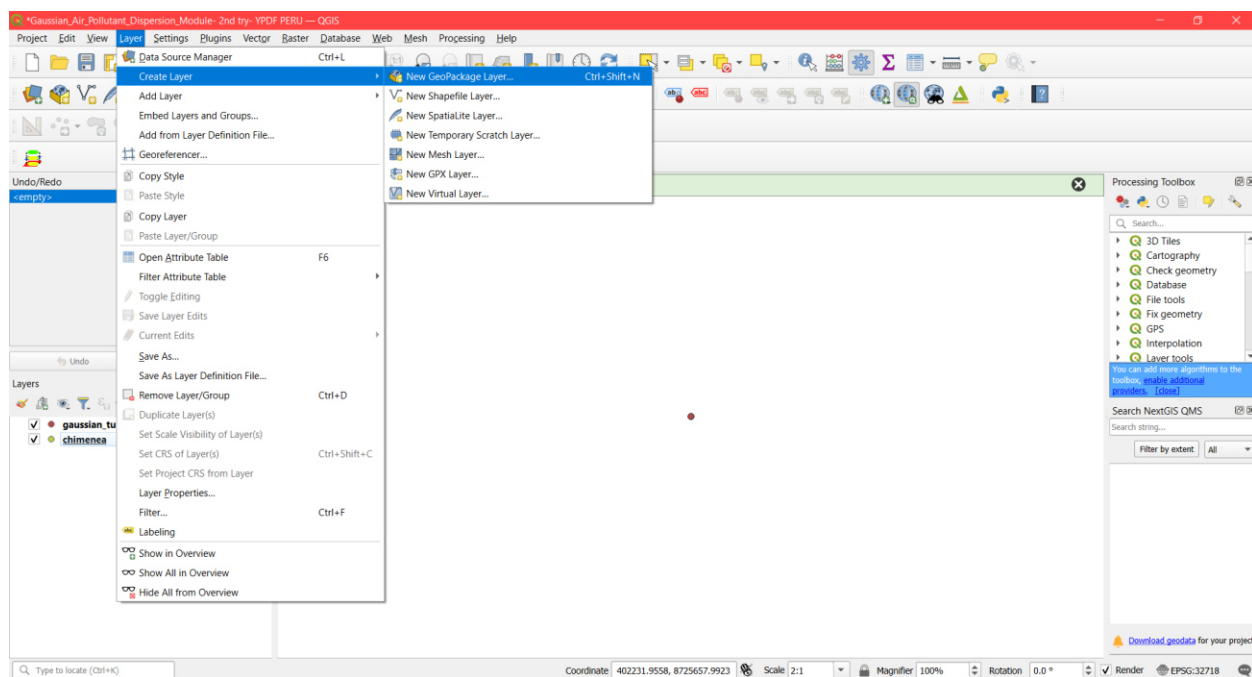
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Paso2 “Create the Wind Direction Line”

Importante saber que el gpkp file (GeoPackage), al crearlo se guardó en documents y antes de añadirlo, fue copiado al file del “2nd try”. Se añade el mismo a QGIS y se nombró “wind_direction” con un Geometry type de “LineString”, y corroboramos que el CRS fuera el de la numeración para Perú.

Figura 17

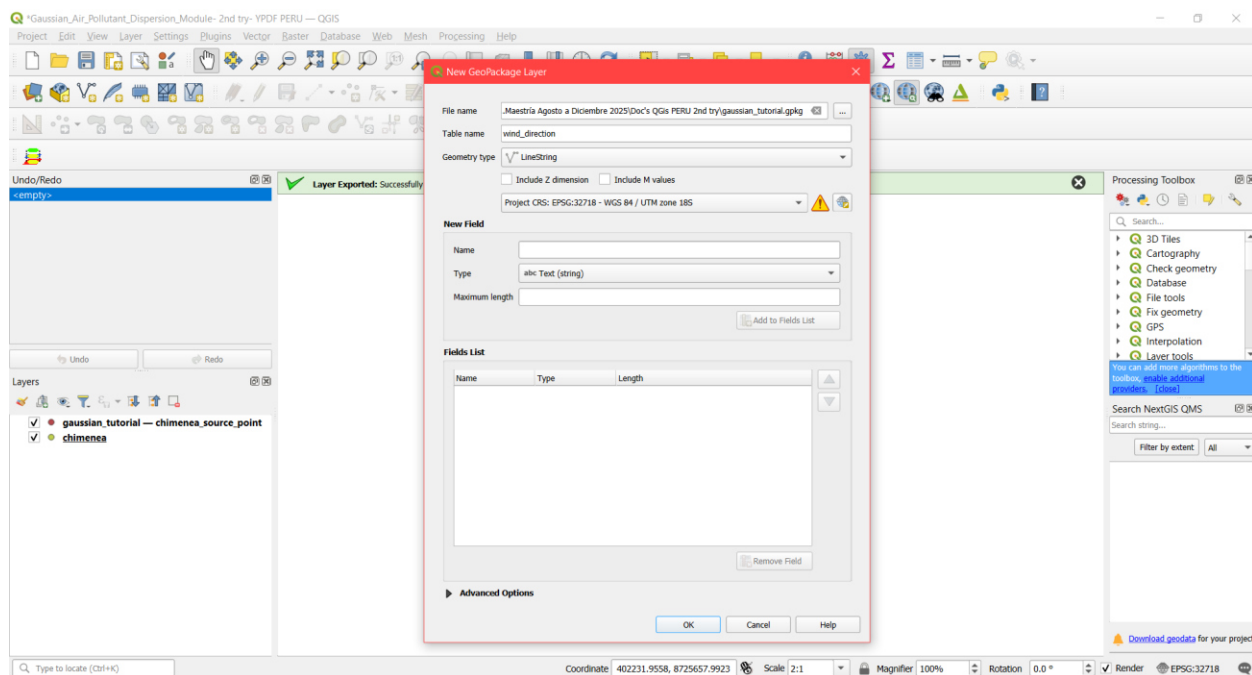
Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 18

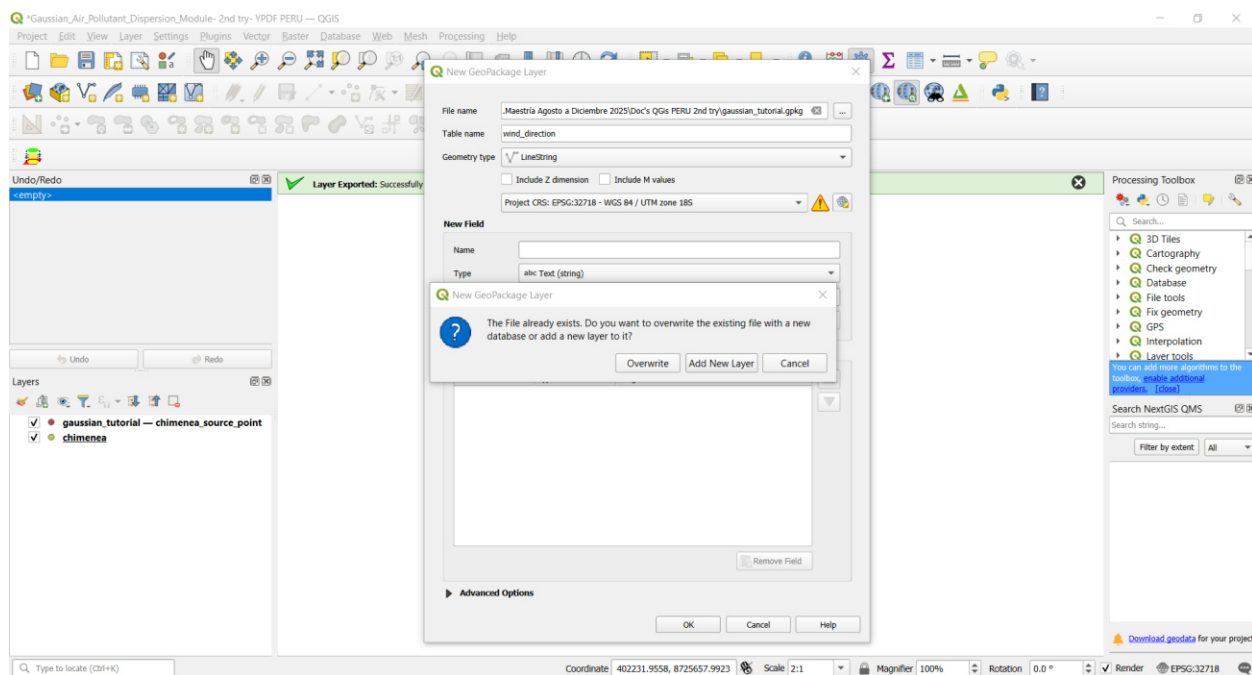
Información añadida



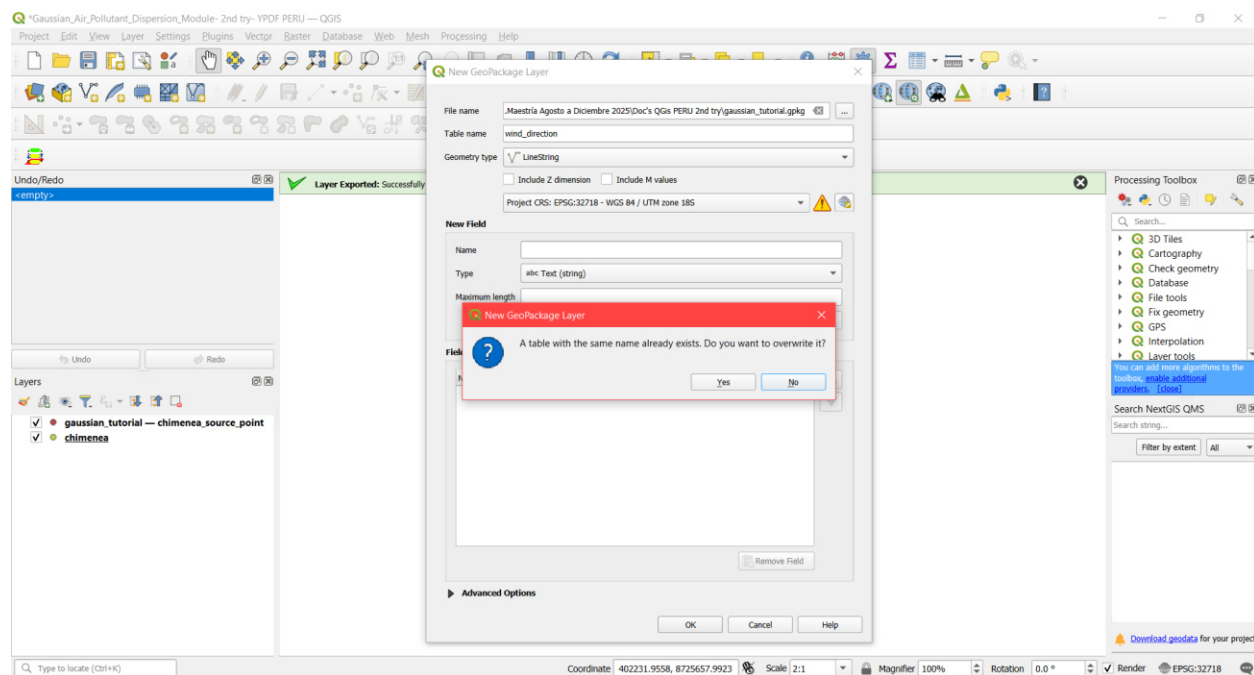
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 19

Notificación, escoger “Add a new layer to it” y NO “overwrite”



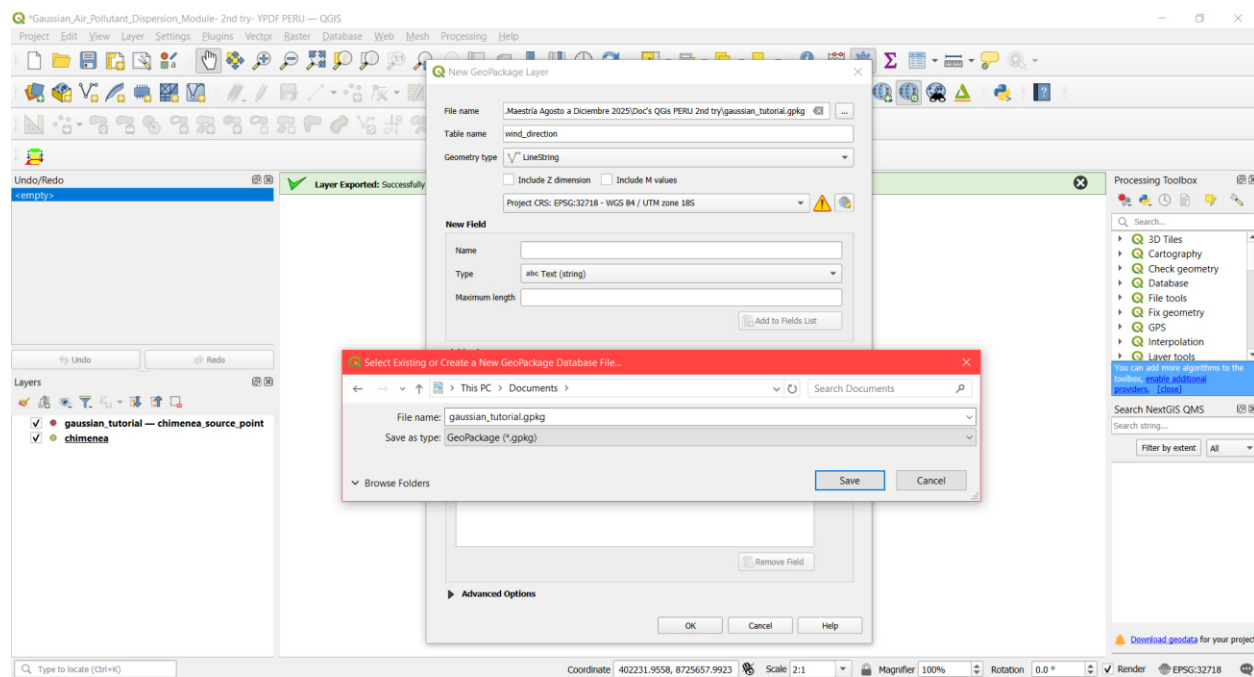
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 20*Continuación del Proceso*

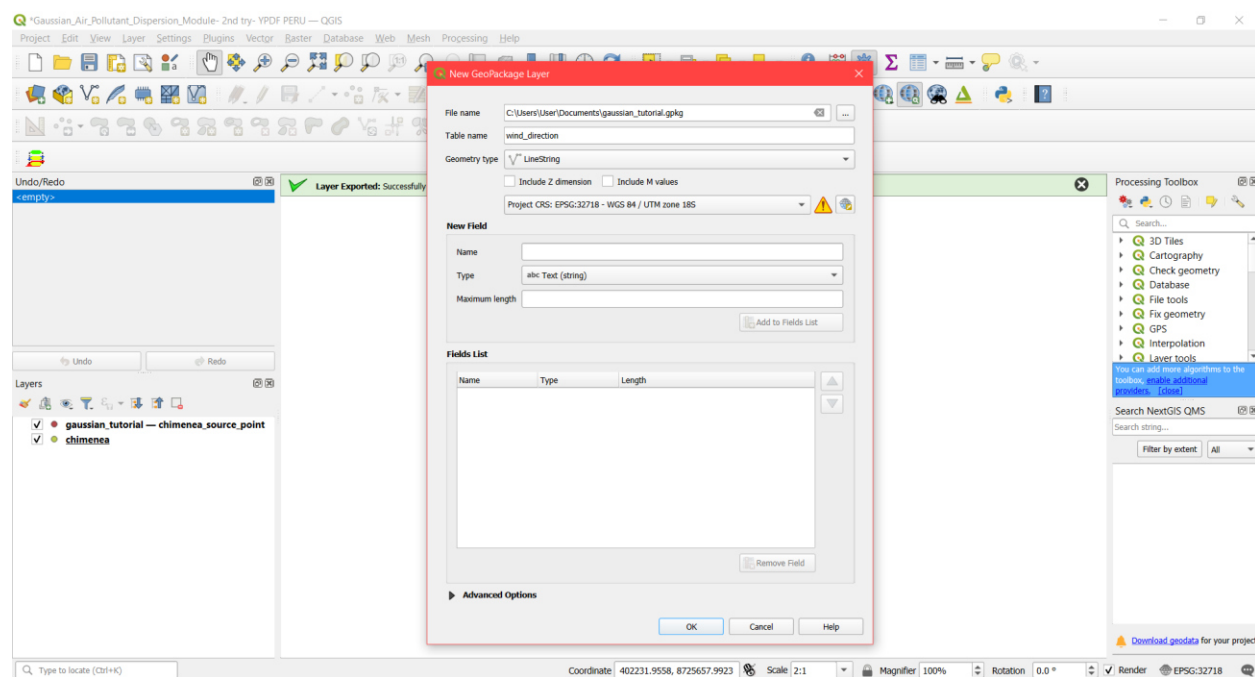
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 21

A la acción no ser ejecutada por QGIS, se procedió a escoger el “GeoPackage” creado y guardado en “Documents”, para comprobar si funciona.



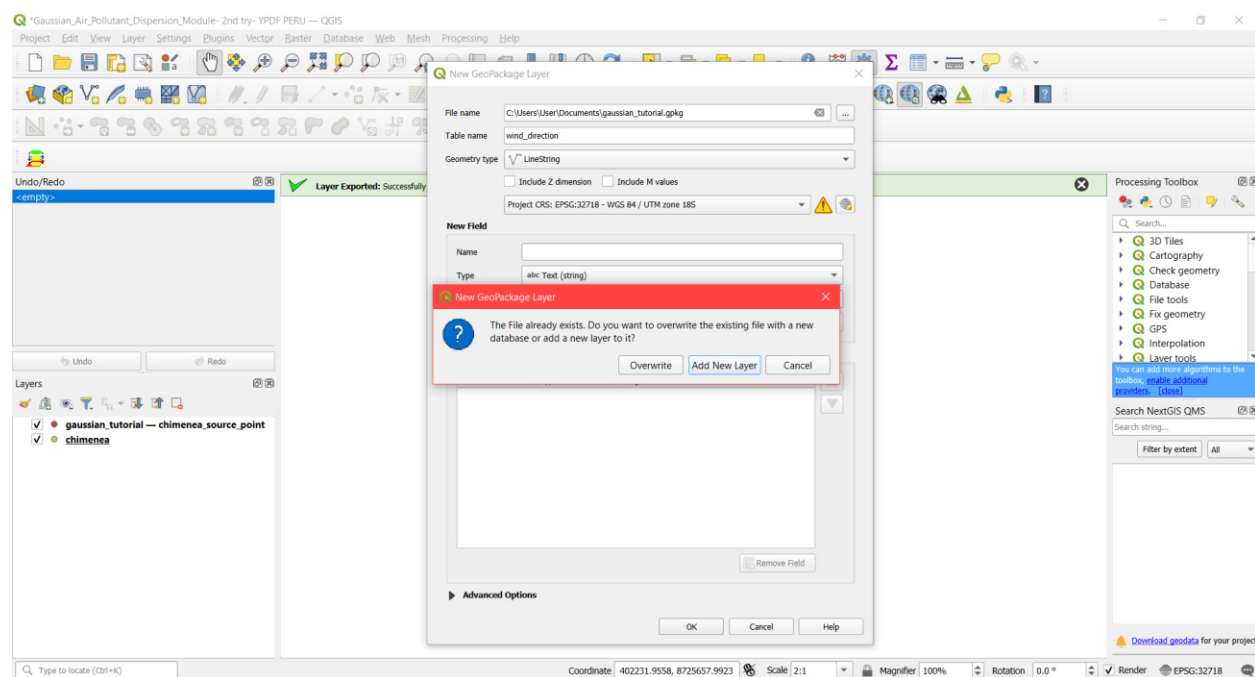
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 22*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 23

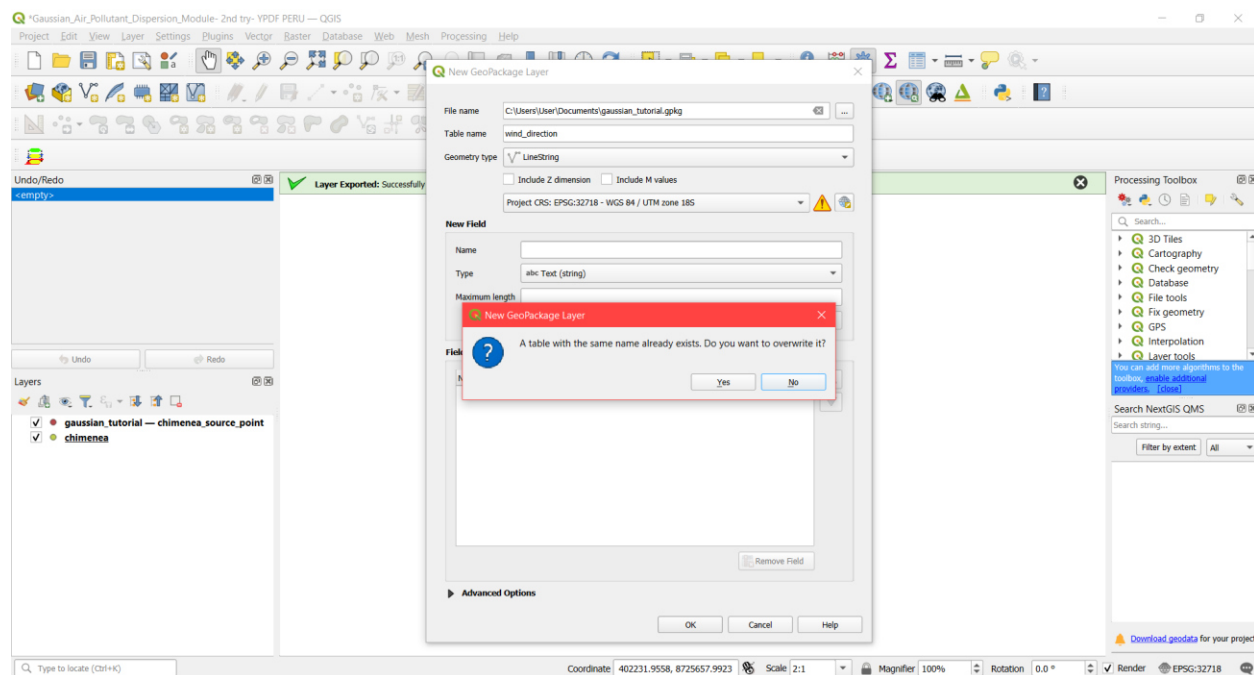
Notificación nuevamente



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 24

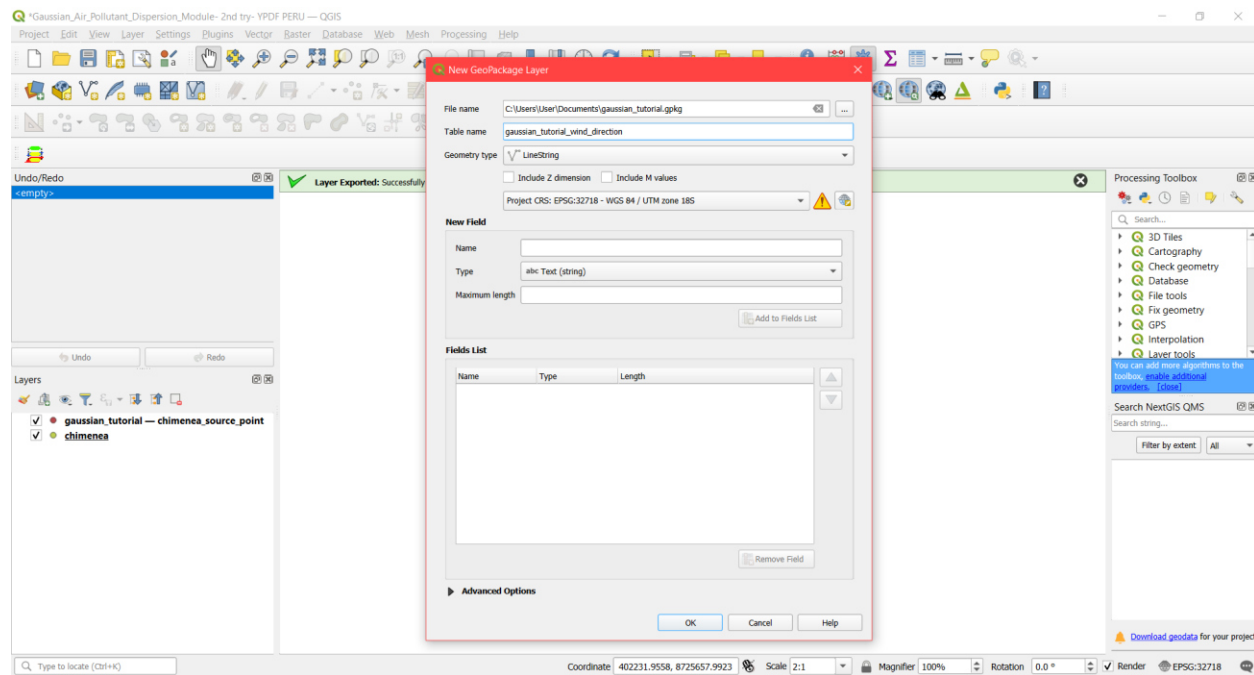
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 25

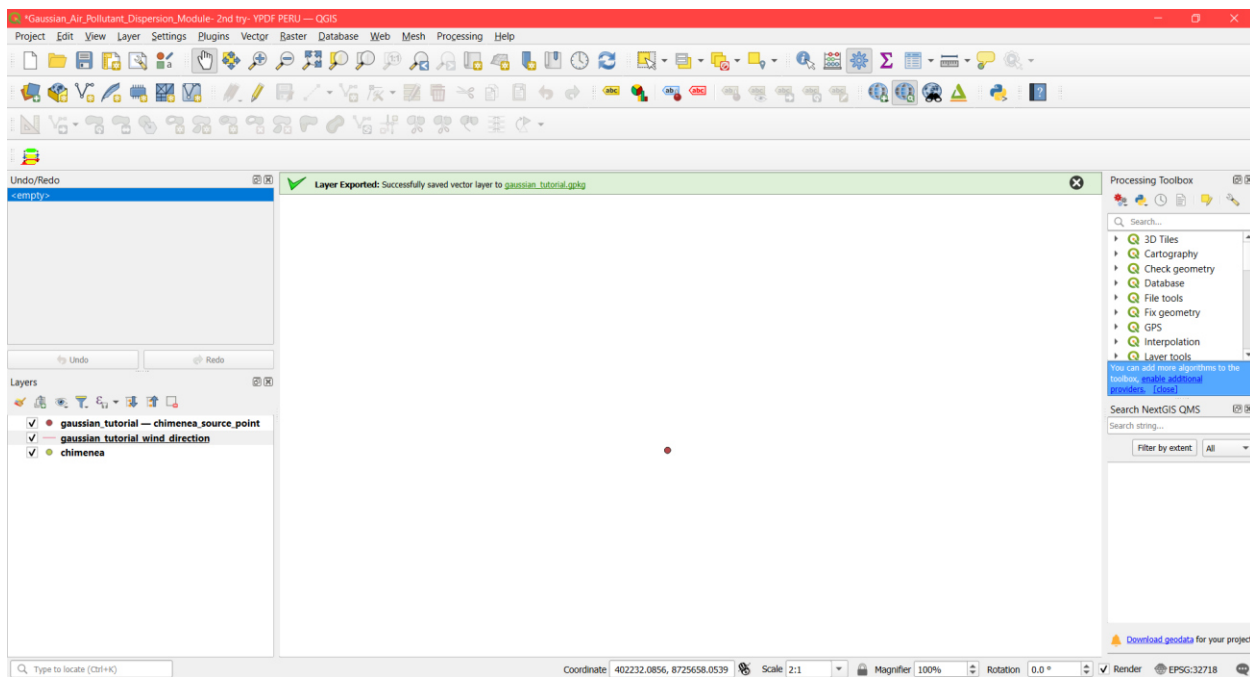
No se ejecuta nada en QGIS, Se procedió a añadirle “gaussian_tutorial” al nombre de “wind_direction” al comienzo. Ya que el layer apareció como que ya existía.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 26

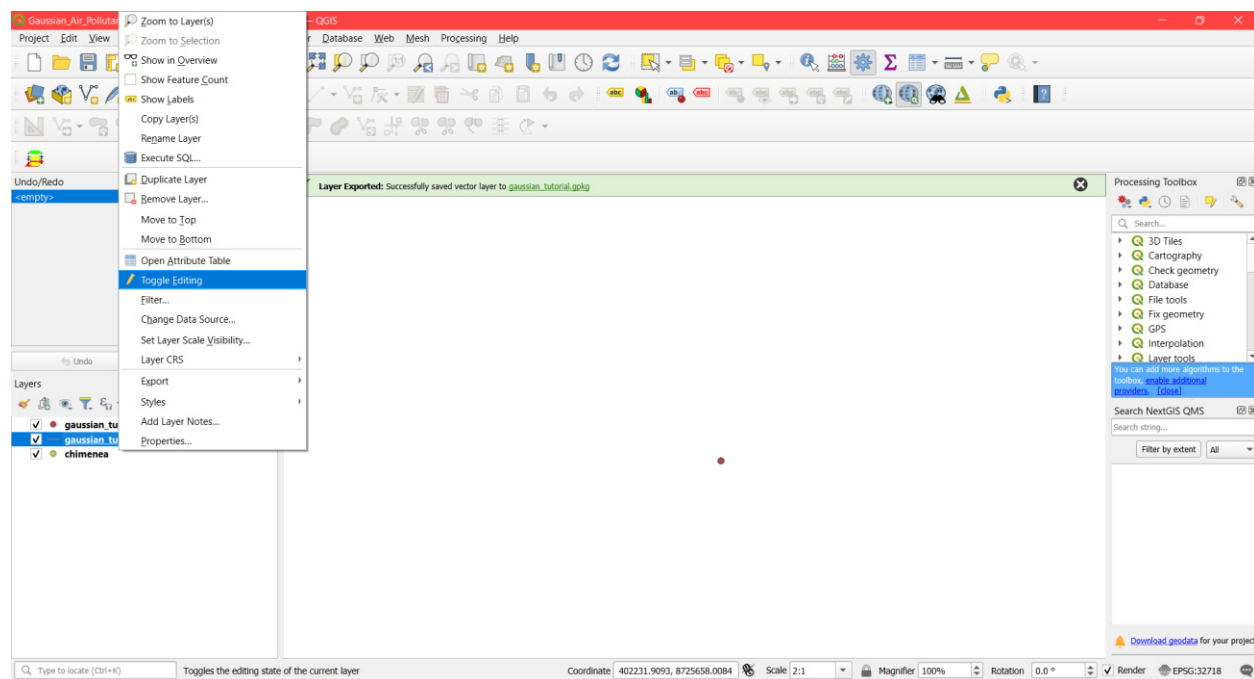
Luego apareció la notificación de la cual se escogió “Add a new layer to it” y finalmente se creó el “layer”.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 27

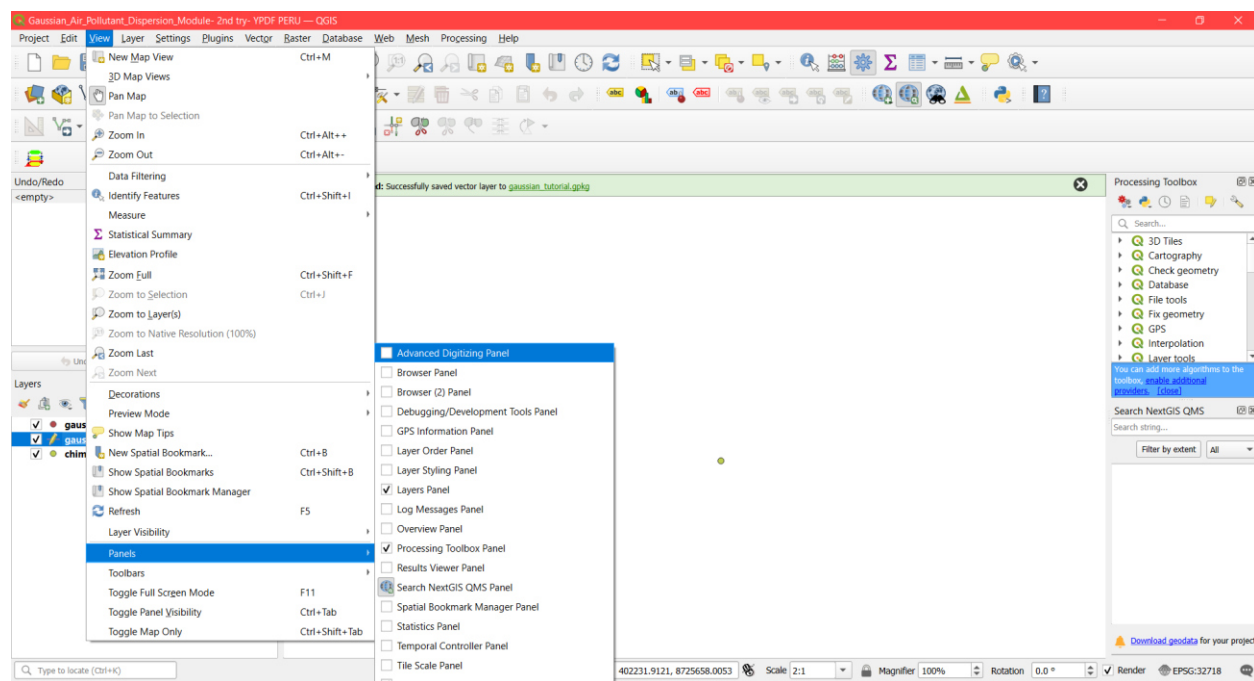
Se procedió a encender el modo para editar.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 28

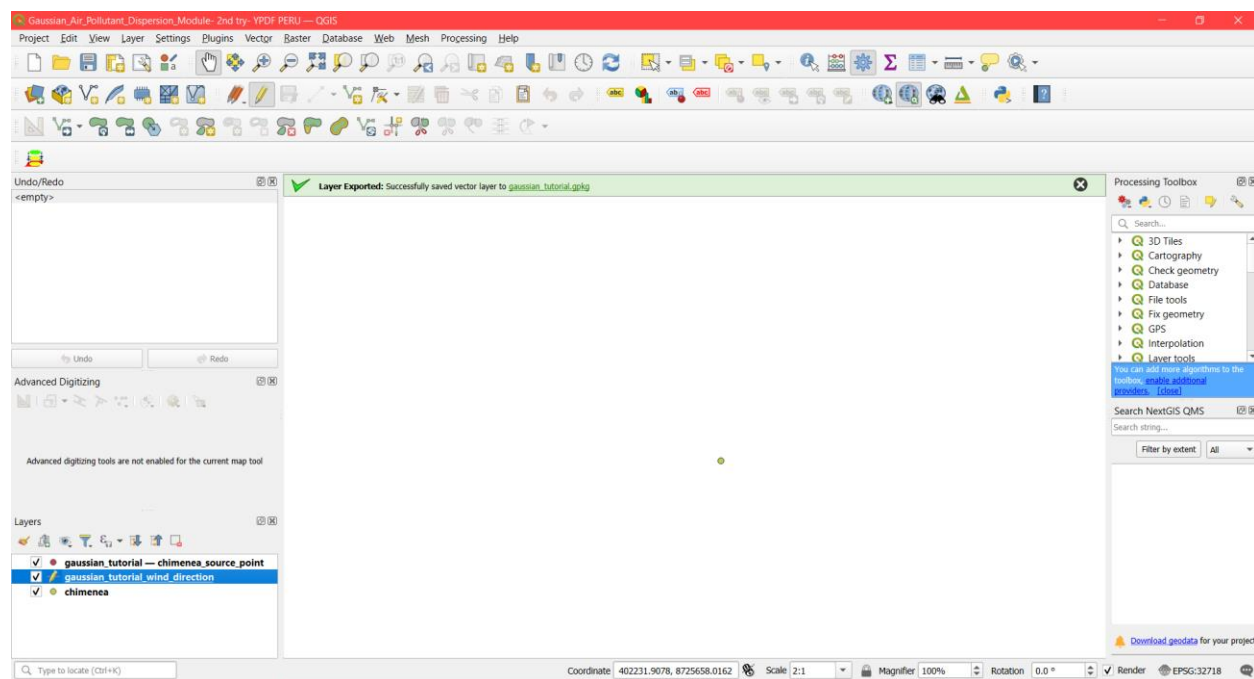
Activación de “Advanced Digitizing”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 29

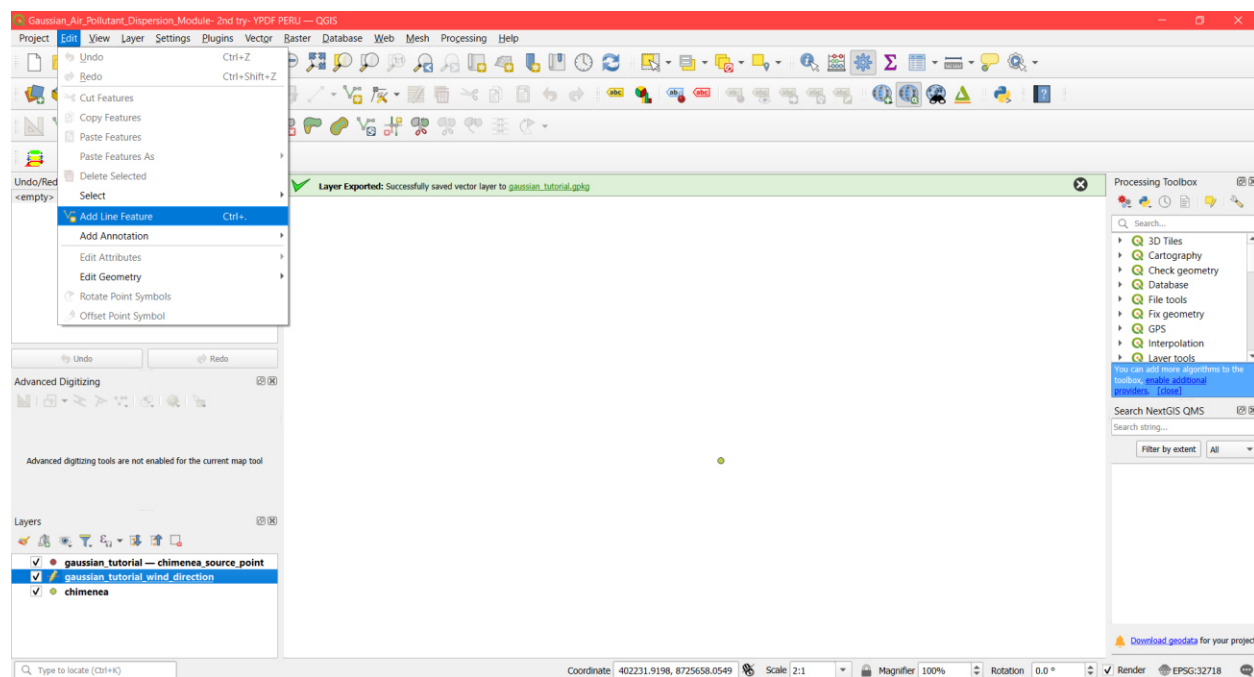
Aparición del panel “Advanced Digitizing”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 30

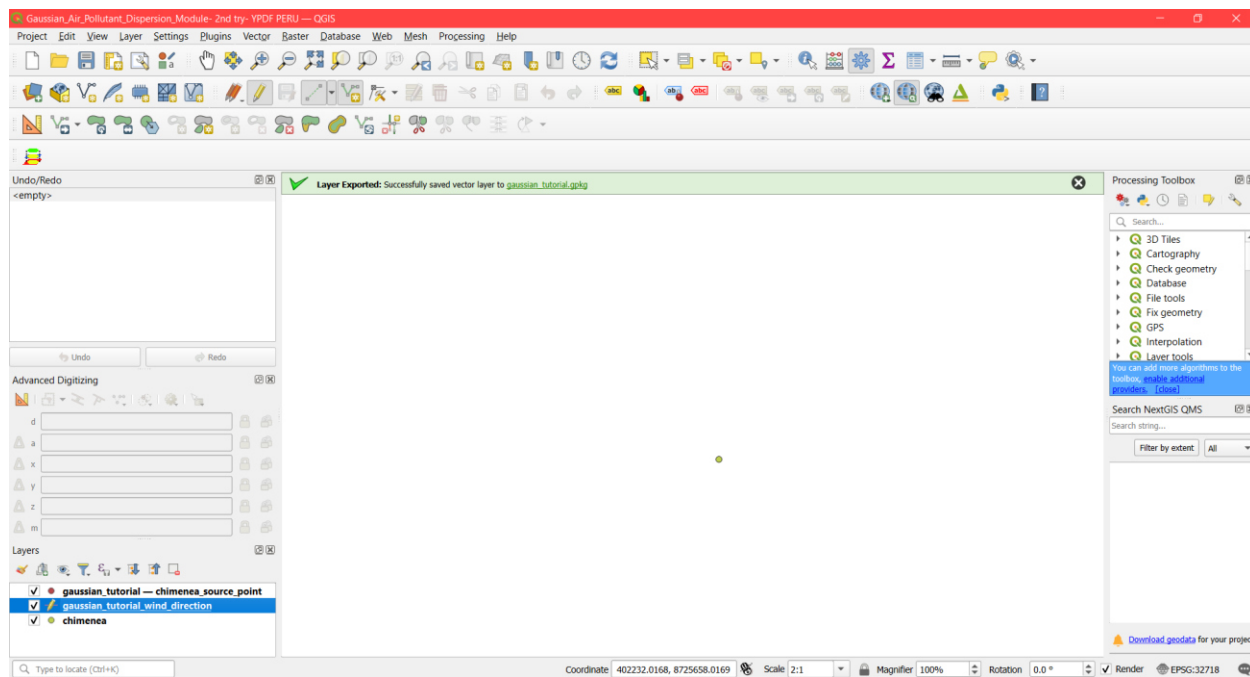
Como habilitar los campos del panel abierto anteriormente



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 31

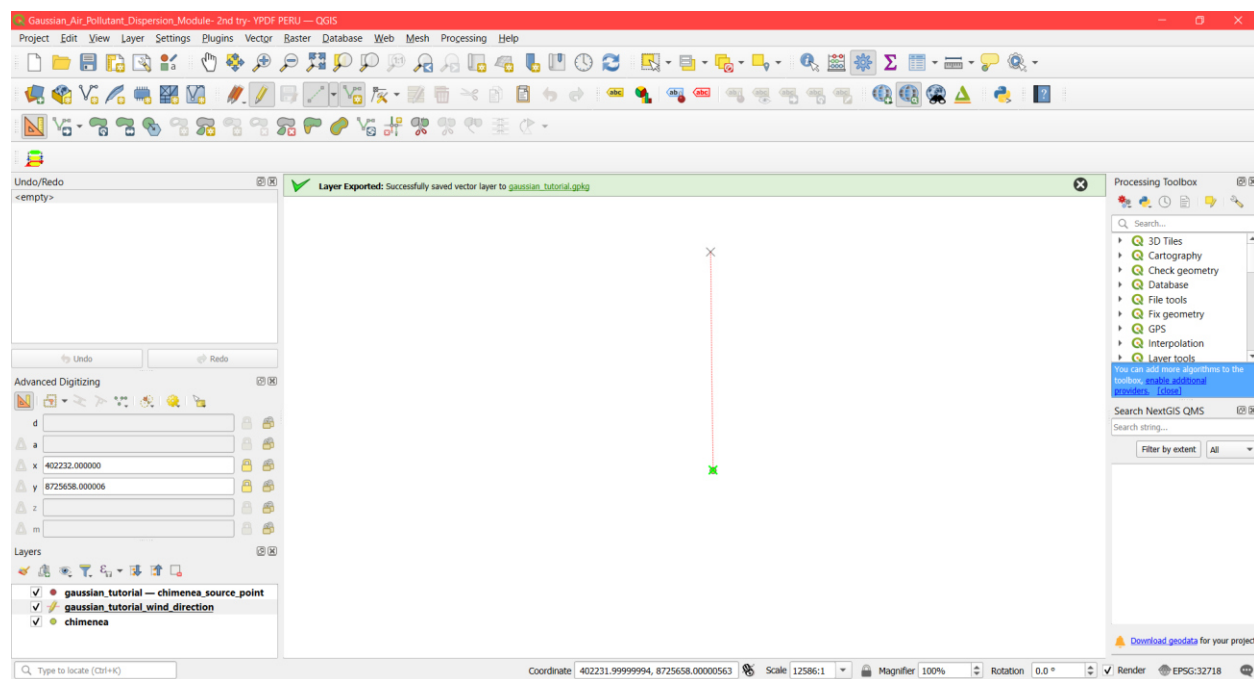
Al tener los campos habilitados, se puede observar que el cursor cambia como a la forma de un punto de mira o una cruceta



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 32

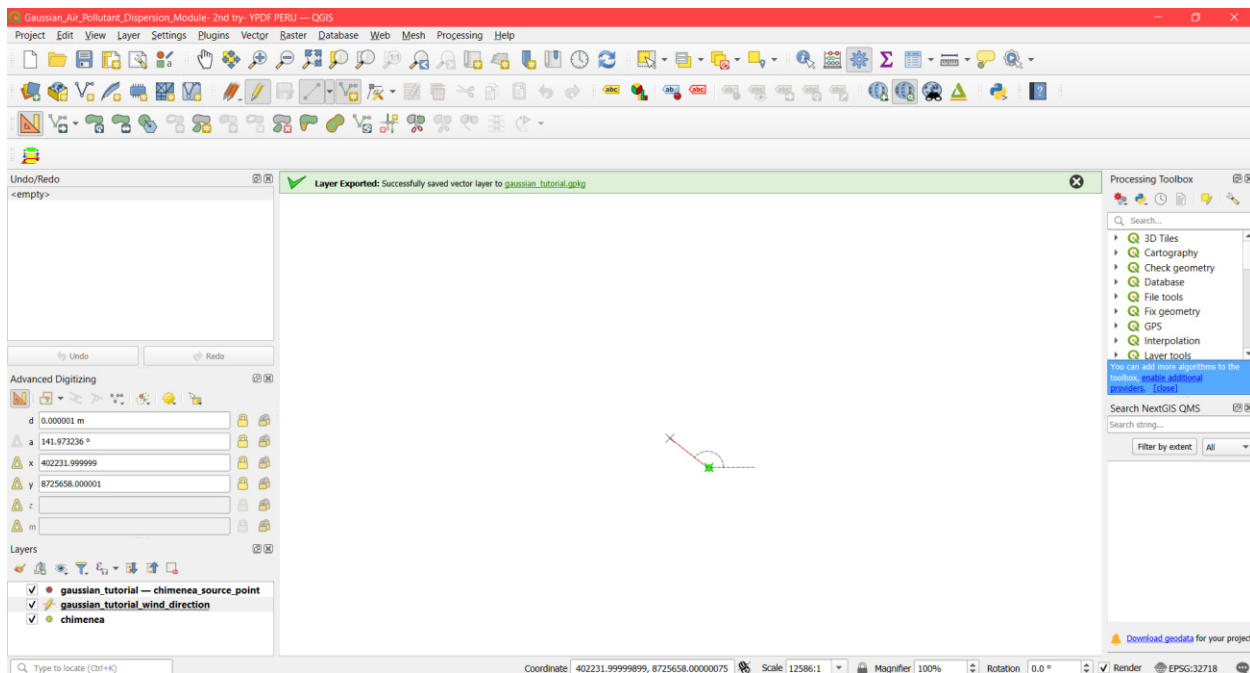
Preparación del comienzo de la línea del viento



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 33

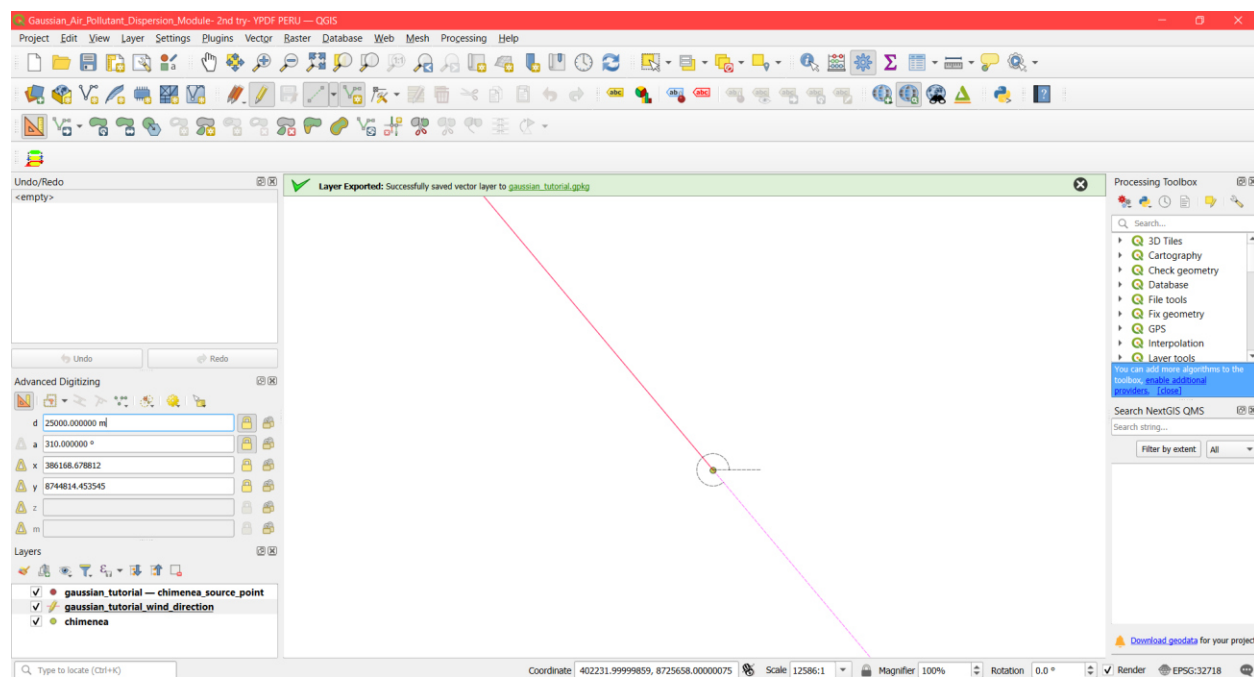
Al momento, para el ángulo y la distancia, no se permite añadirlos al parecer se debe a que hay que cambiar de modo cartesiano a modo polar. Al mover el cursor y oprimirlo con un solo click en el canvas, los encasillados de ángulo y distancia comenzaron a ser funcionales.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 34

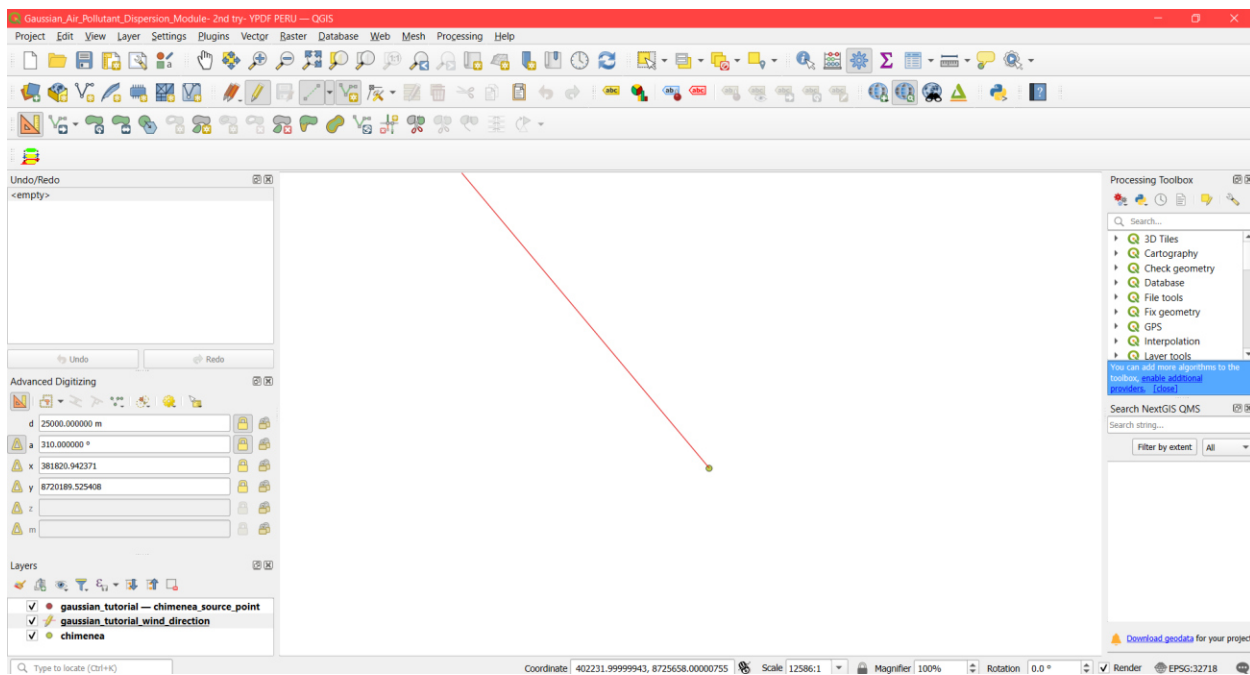
Visualización de la línea con distancia de 25000 y ángulo de 310



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 35

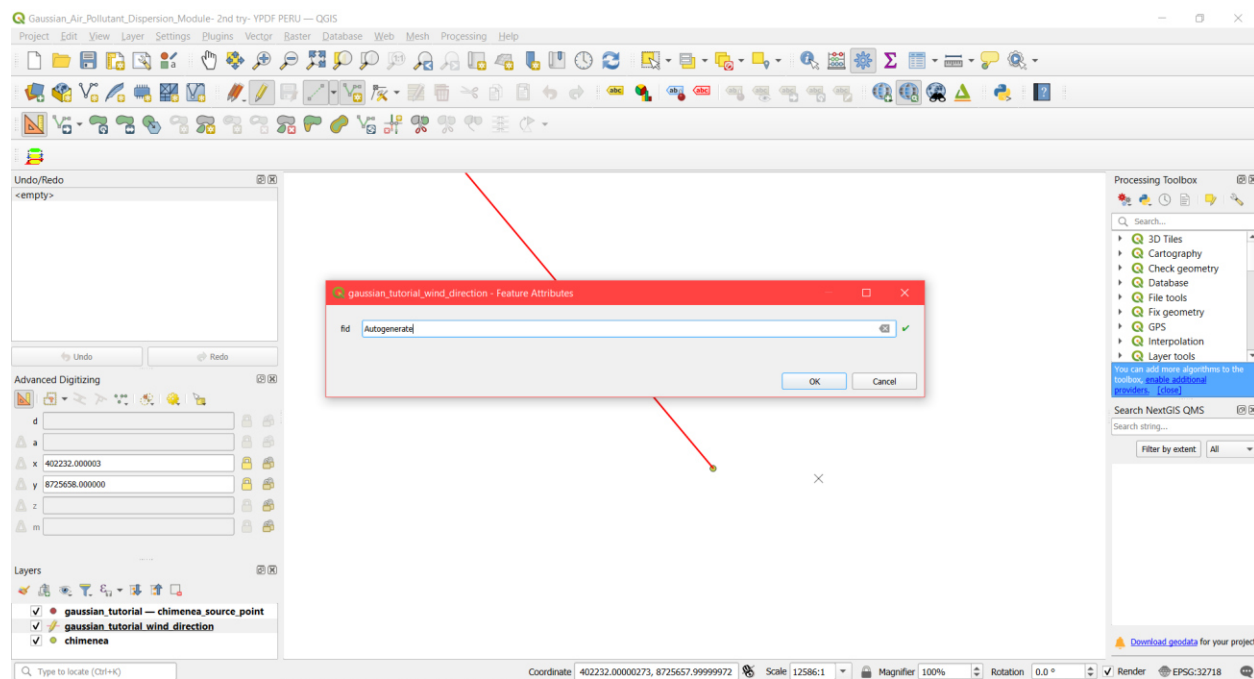
Luego de un click izquierdo (no un right click) así se visualizó la línea en el canvas



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 36

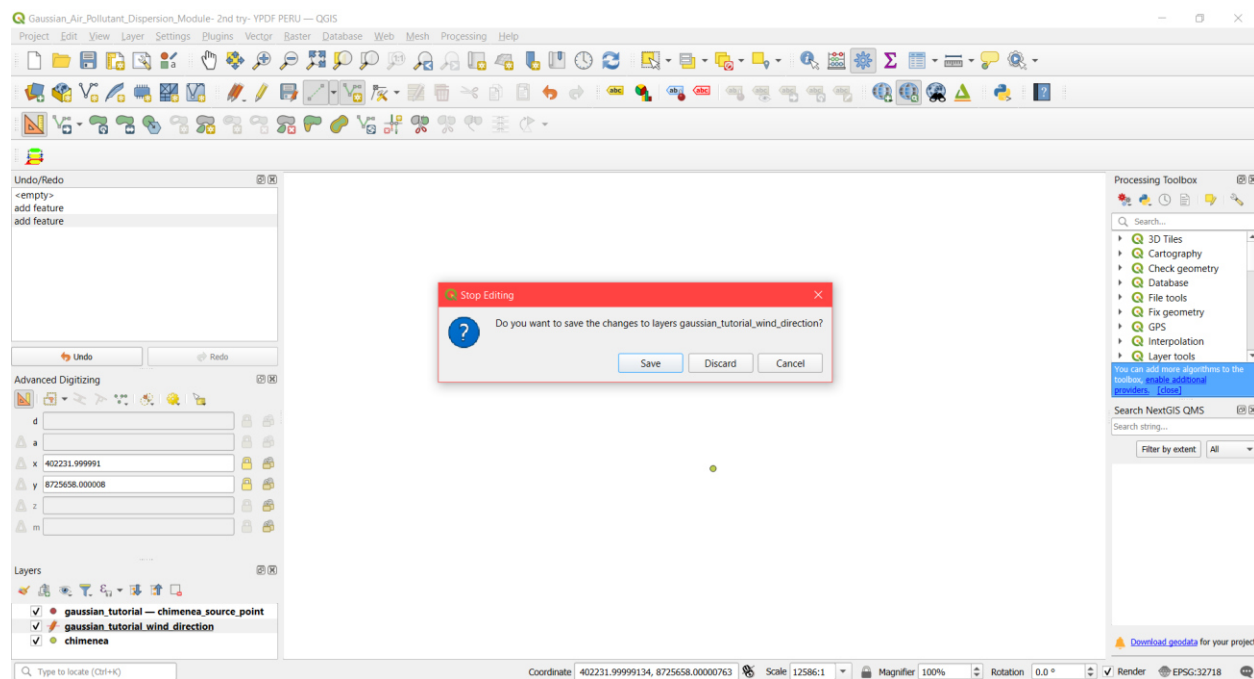
La línea en el proyecto no se guarda de manera permanente, y es debido a unos arreglos que se deben hacer para la última versión de QGIS



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 37

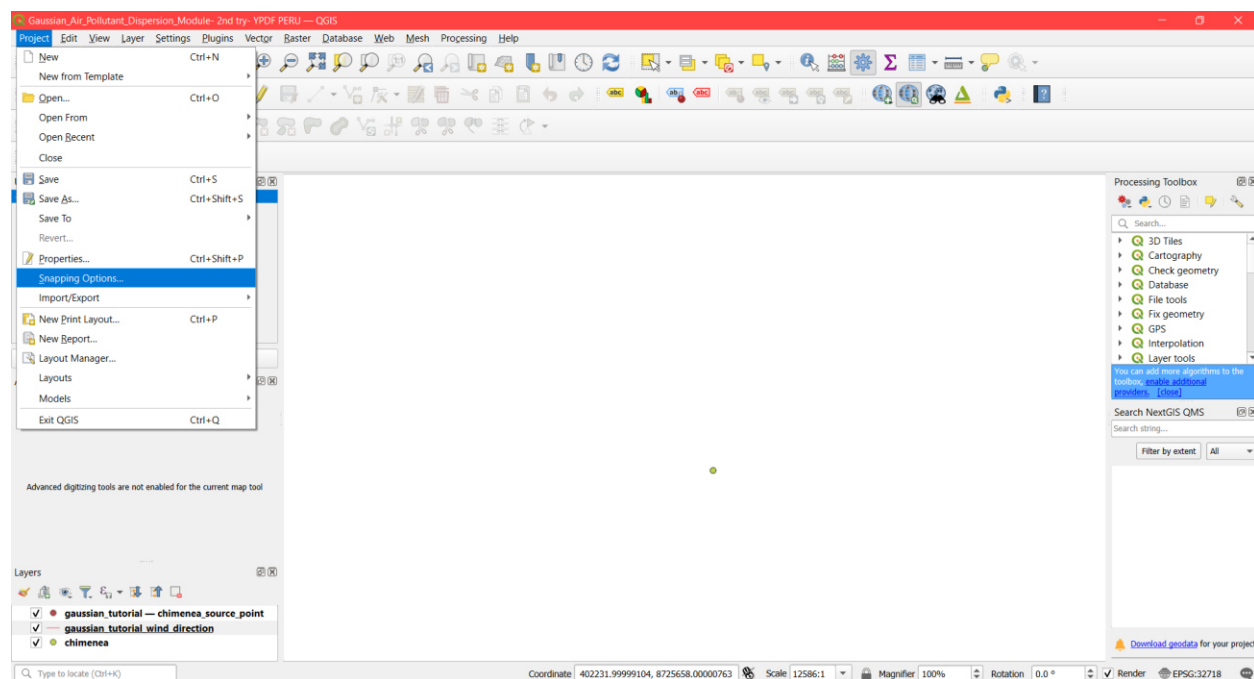
Se guardo la línea creada pero la misma, luego de esto desaparecía



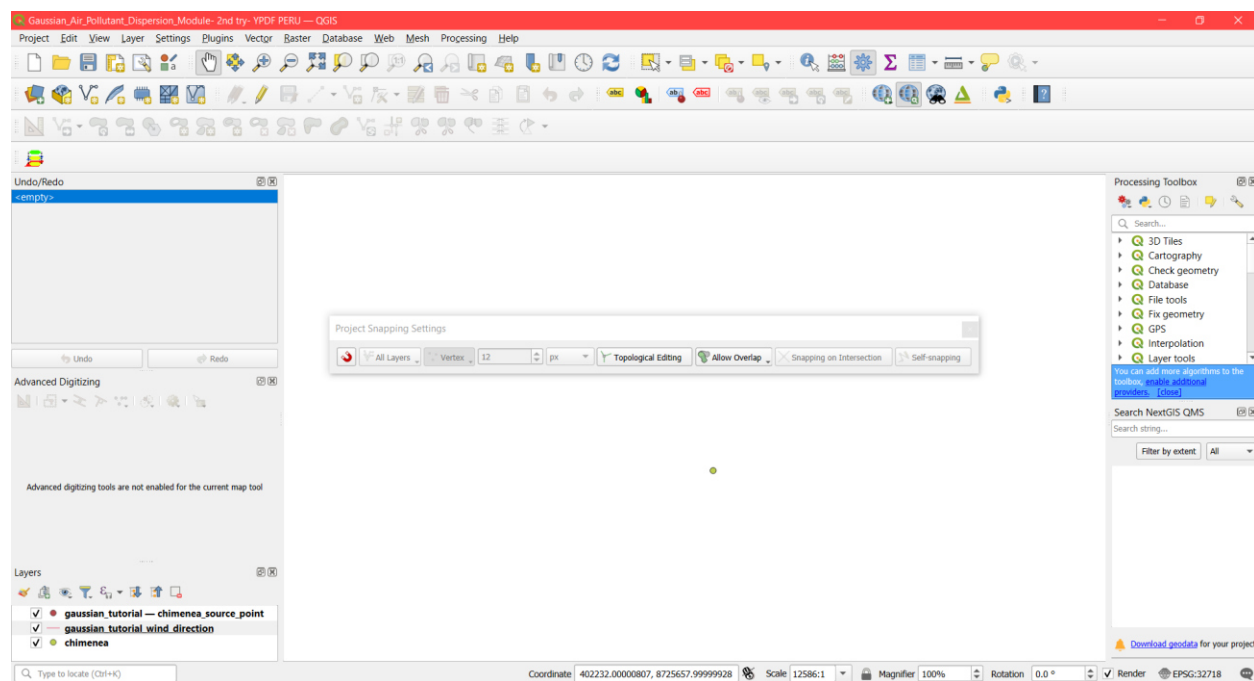
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 38

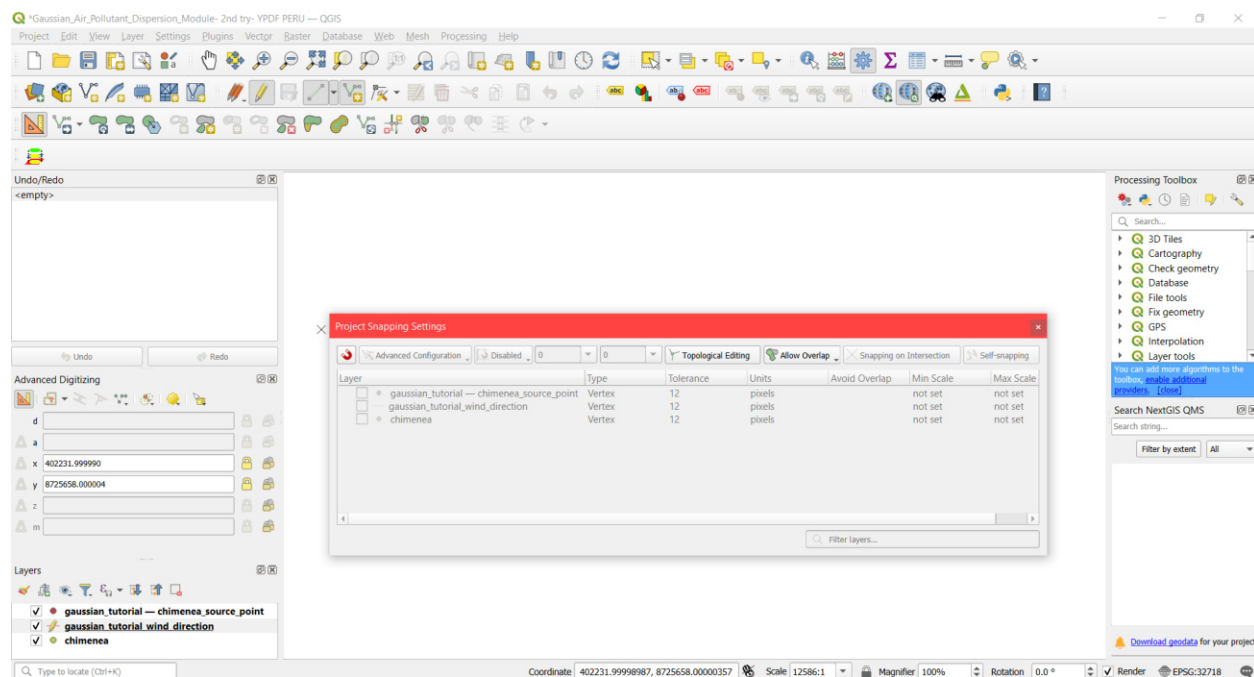
Se intento inhabilitar las “Snapping Options, pero no funciona



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 39*Continuación del Proceso anterior*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

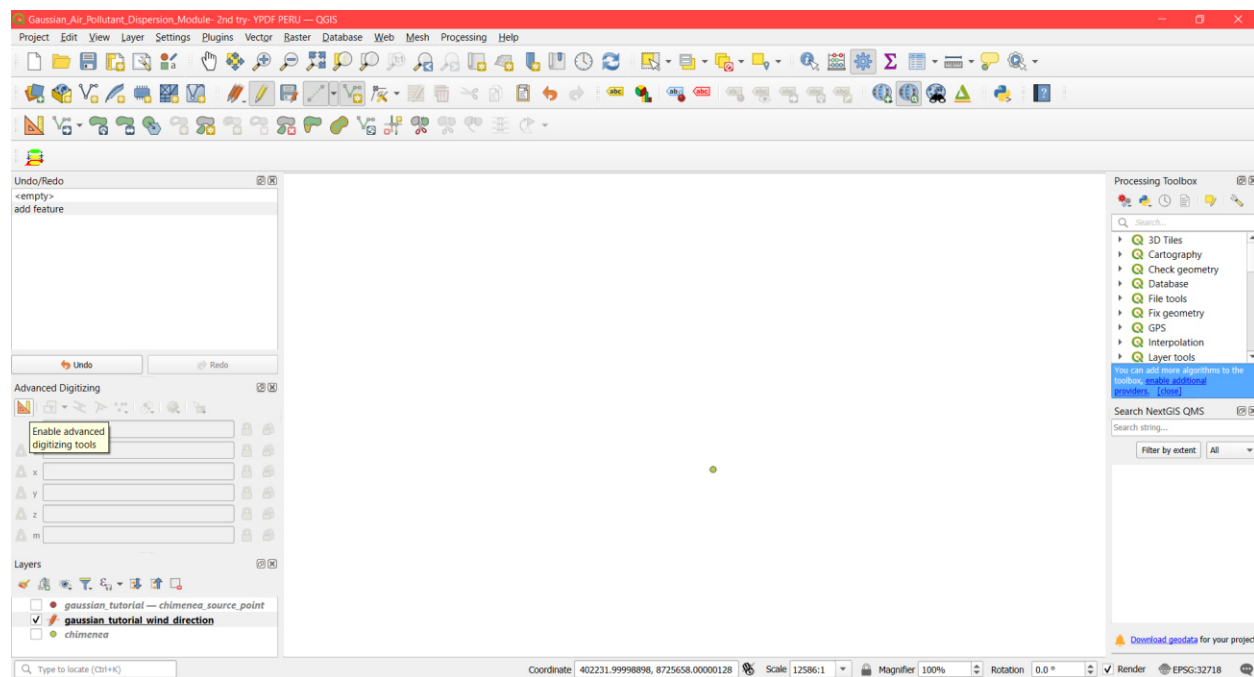
Figura 40*Continuación del Proceso anterior*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 41

Se realizó todos los pasos para la creación de la línea, pero la misma no se guardaba, se menciona que es un problema del panel “Advance Digitizing” (un problema con su estado). Se recomienda dejar de forzar esta manera para el procedimiento y recurrir a una manera más estable para el procedimiento. Se procedió a deshabilitar el panel “Advance Digitizing” y realizar un procedimiento más estable para completar esta parte del Paso2.

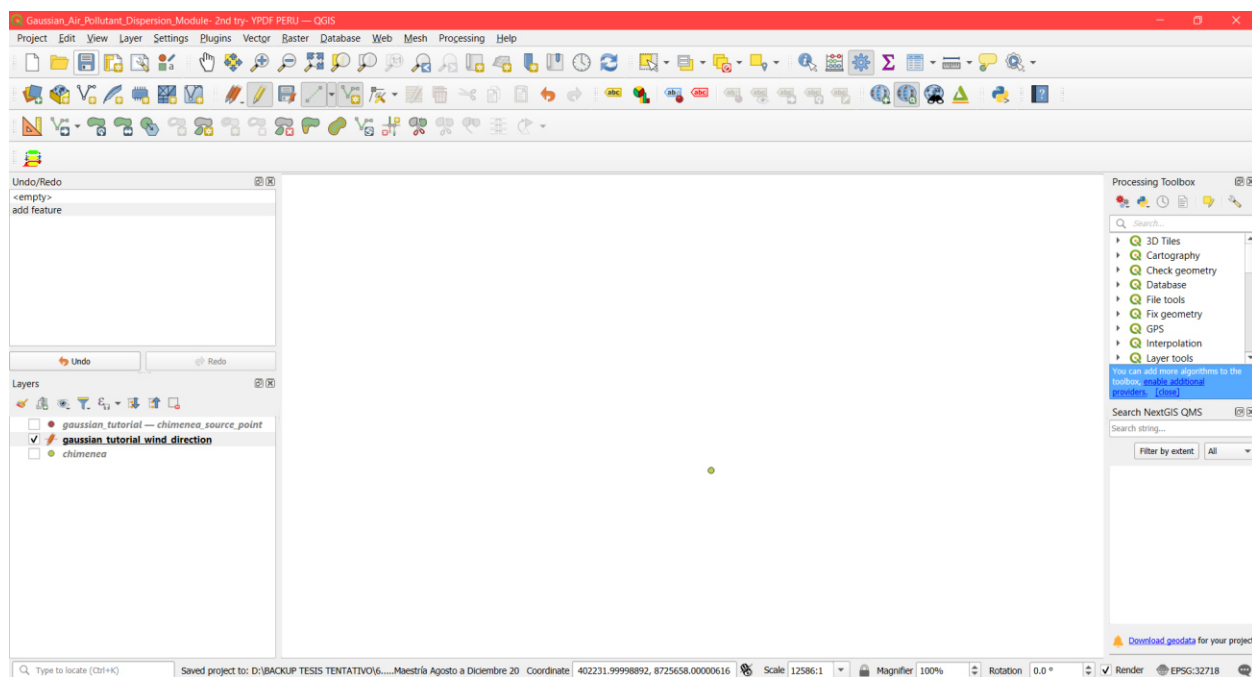
Método más estable - Crear la línea por expresión. Para proceder, primero se deshabilitó el panel “Advance Digitizing”.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solithurn” (2026).

Figura 42

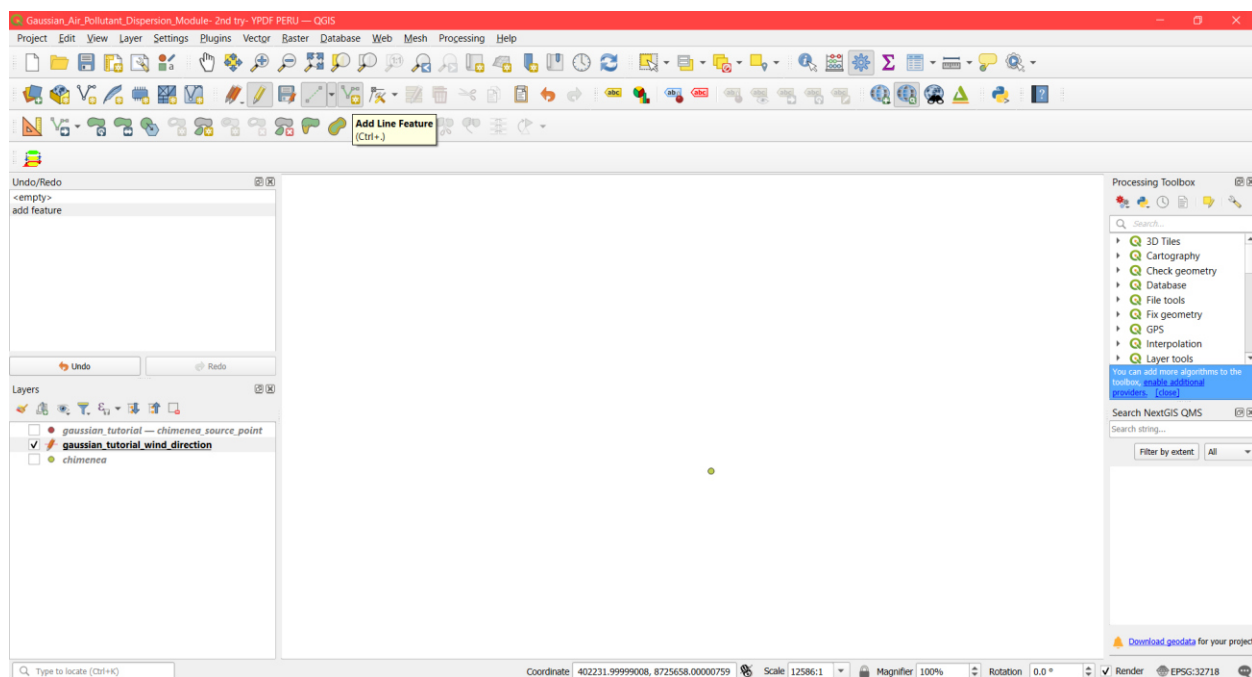
Continuación- visualización del Programa con la acción anterior ejecutada (Panel Cerrado)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 43

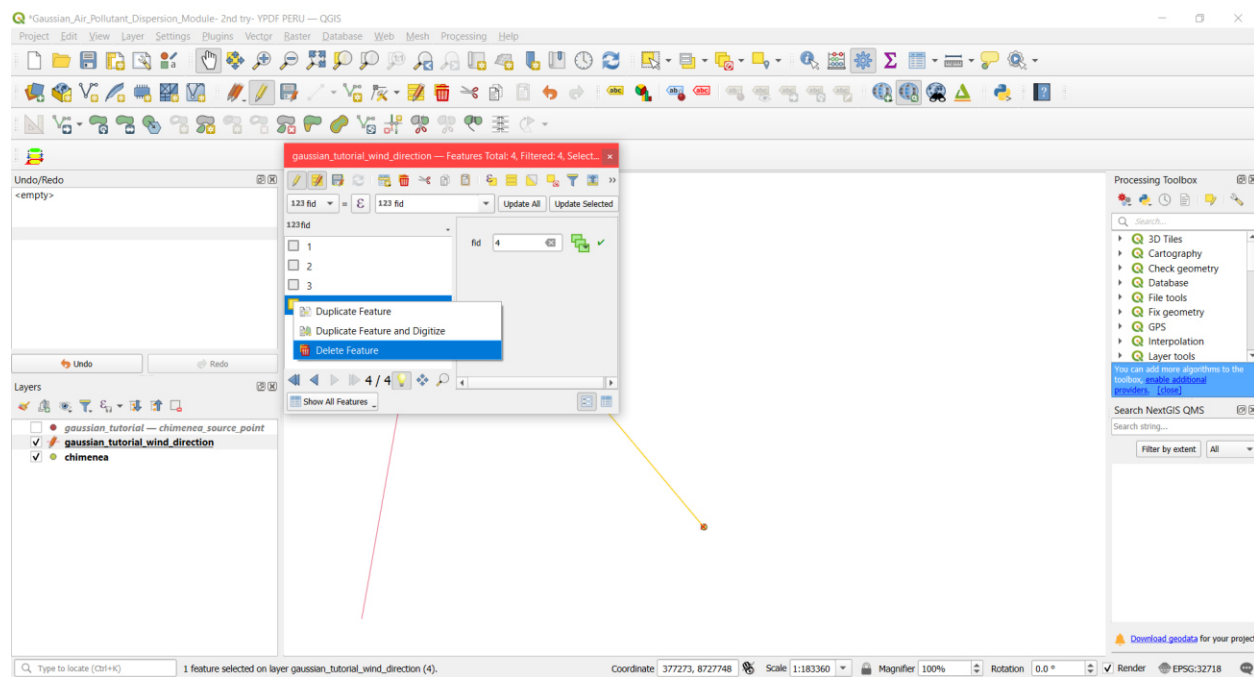
Para comenzar a dibujar en el canvas, nos aseguramos de que las siguientes opciones estuvieran marcadas: “wind_direction, pencil”, y “add line feature”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 44

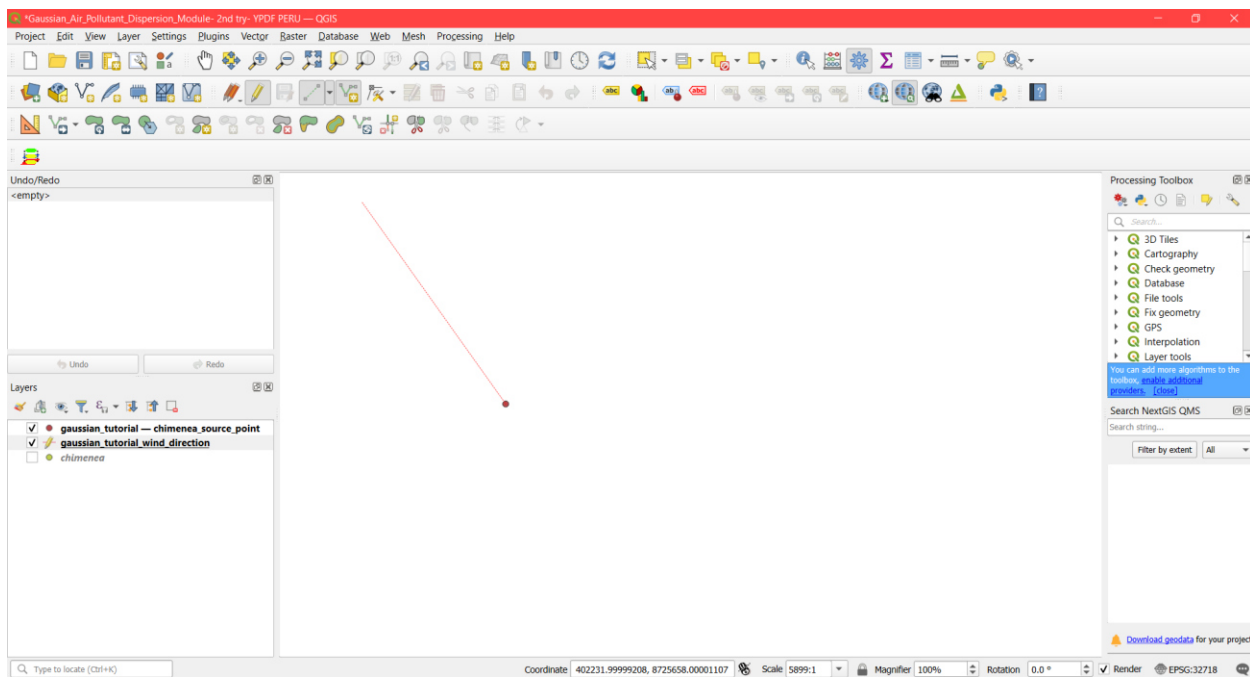
(Antes de continuar se realizó una pausa para borrar unas líneas que en pasados intentos se guardaron y no son necesarias)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 45

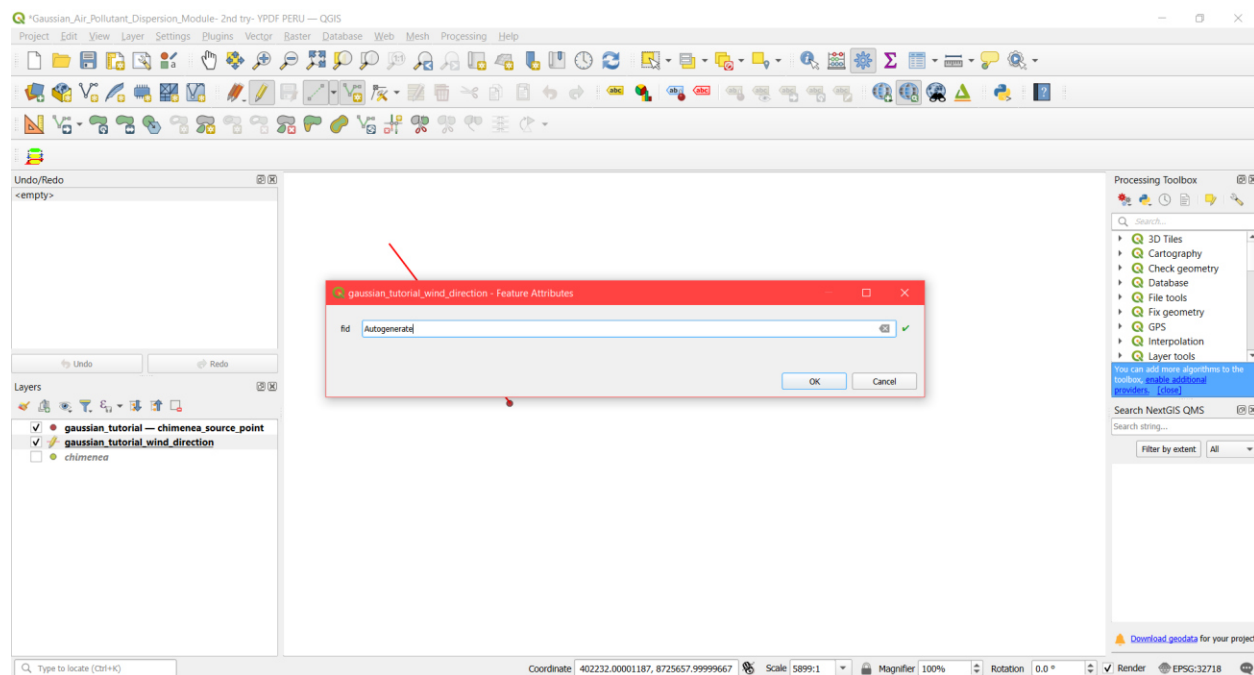
Continuación: De forma manual se dibujará una línea simple en dirección noroeste (Comandos: específicos para “Draw a Simple Line Manually” (Paso 3 de este procedimiento alterno))



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 46

Al Proceder a guardar la línea, la misma, no lo permitió; esto comprueba que es un problema en el proyecto. Por tanto, antes de continuar se procedió con otra acción.

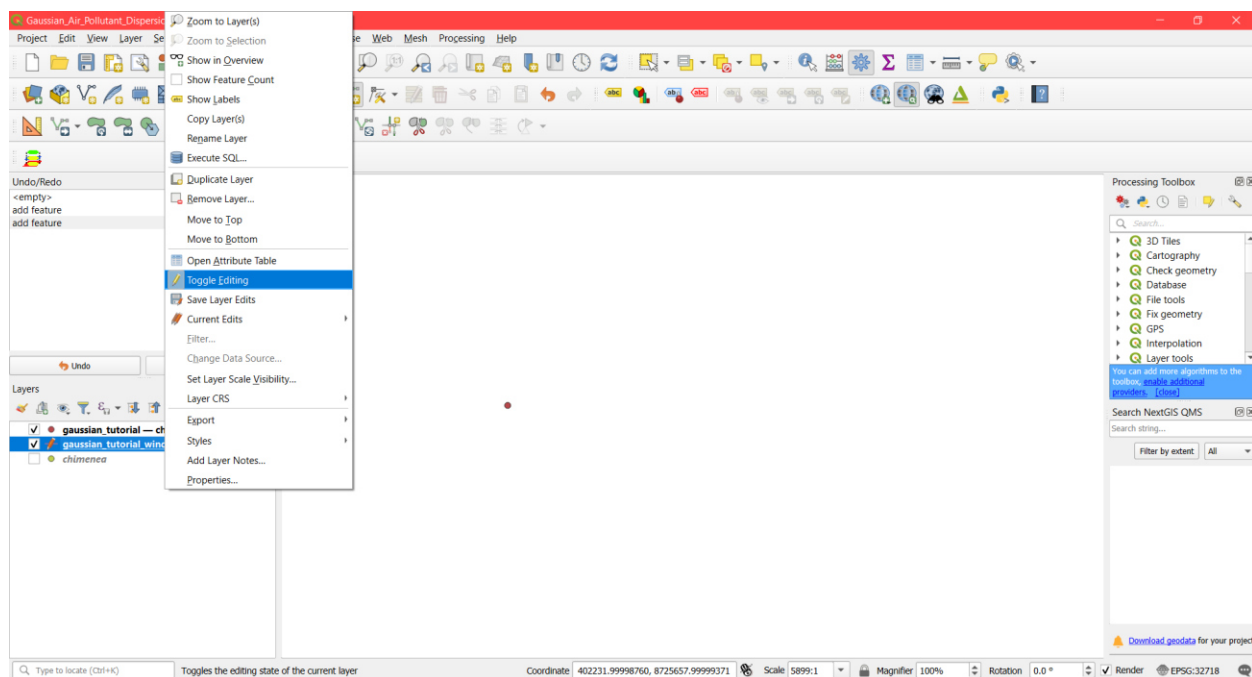


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Hasta el momento lo que puede significar, en cuanto a lo anterior, es lo siguiente. La sección para editar no se comprometió con los atributos de la capa (“feature to the layer”). Se procedió a realizar un diagnóstico para corregirlo.

Figura 48

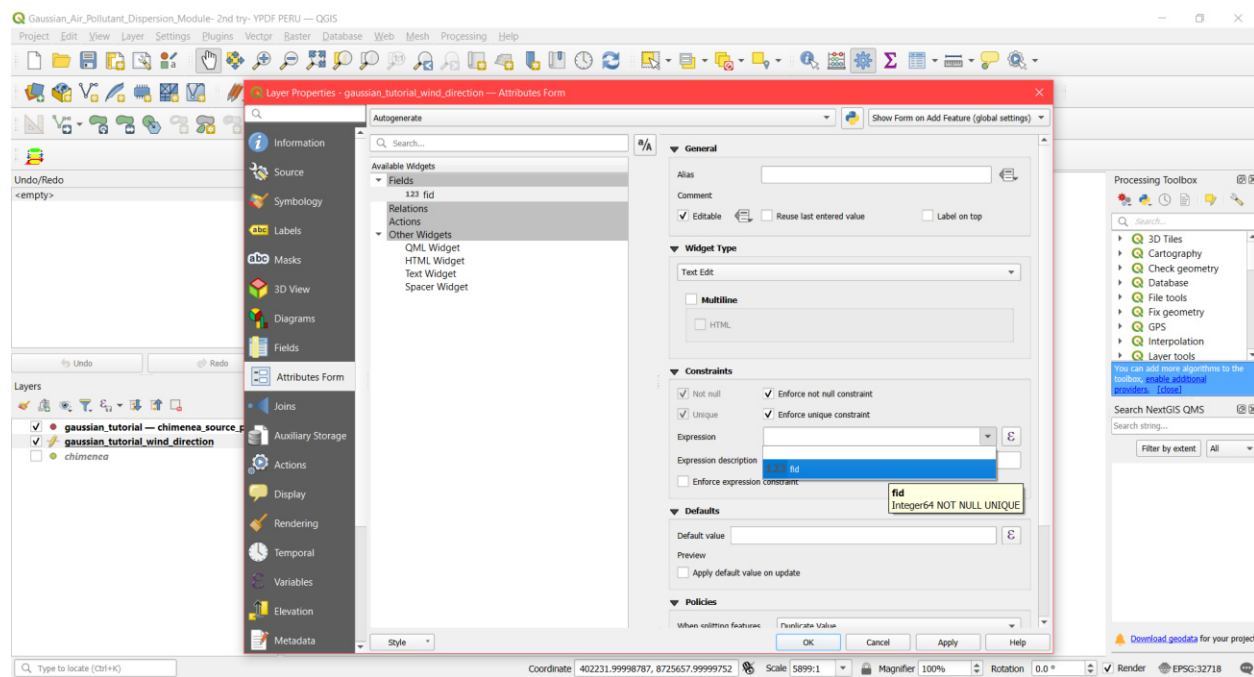
Verificación de que el “layer” se pueda editar. Esta correcto y en orden



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 49

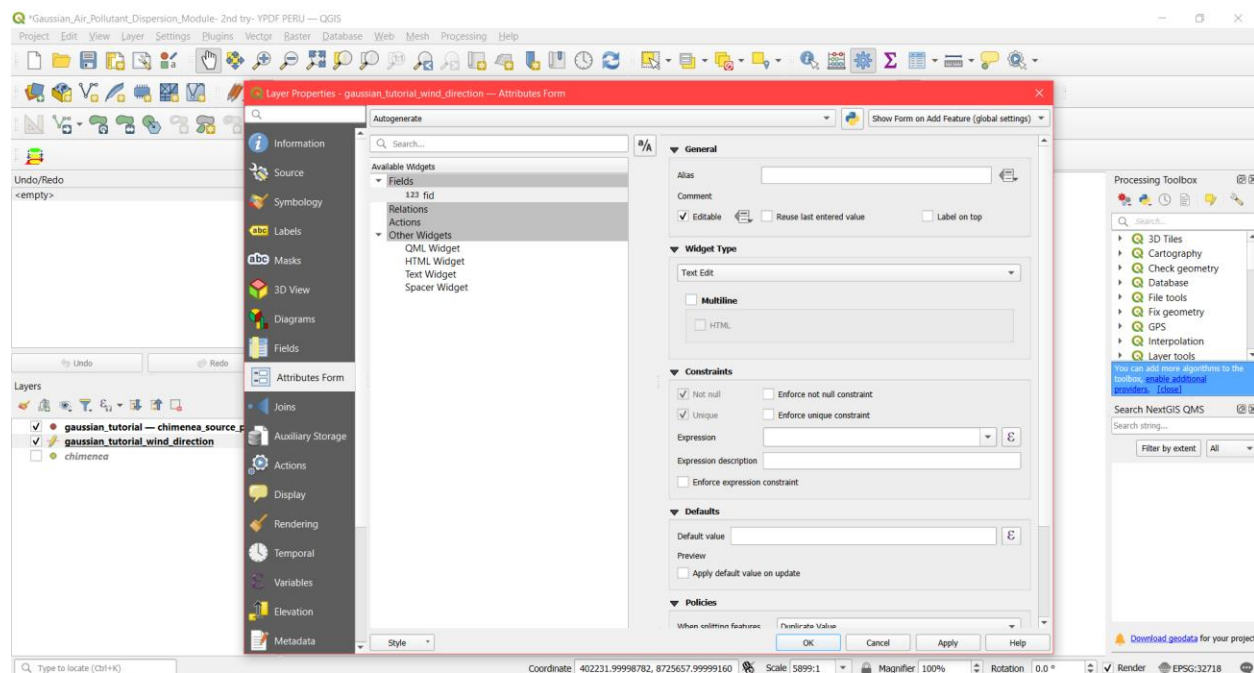
Se encontró una manera de solucionar el problema presentado, inhabilitando los siguientes campos



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 50

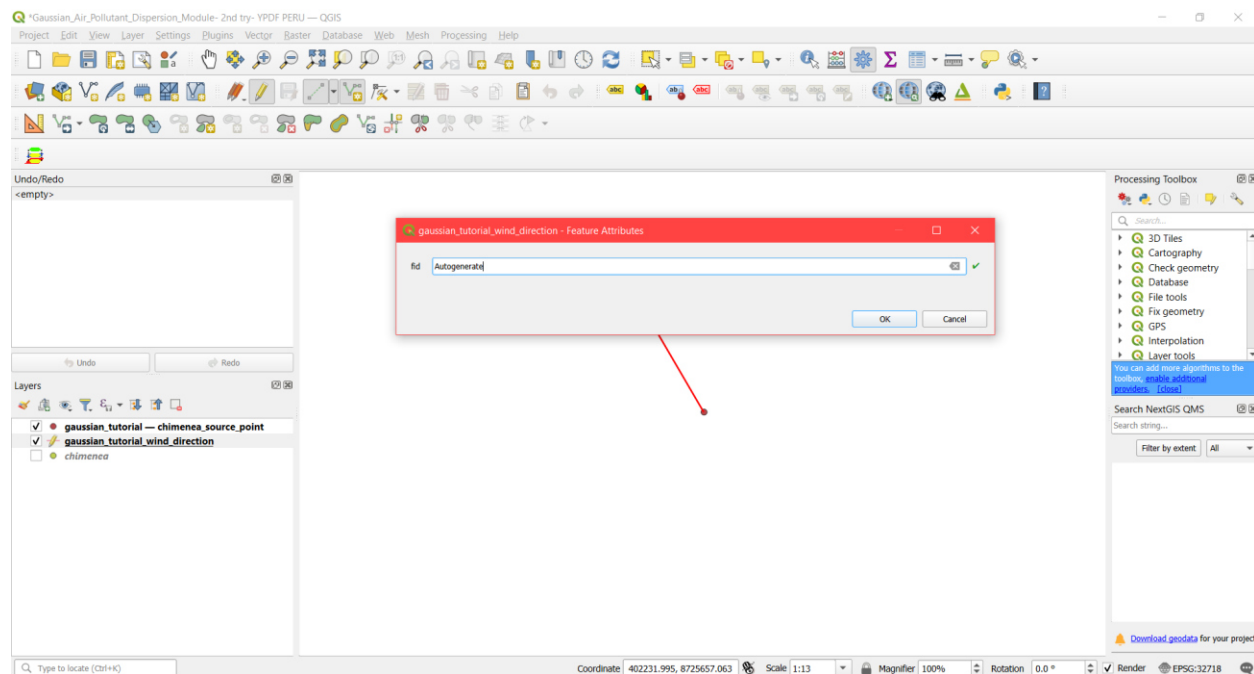
Visualización de los cambios realizados



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 51

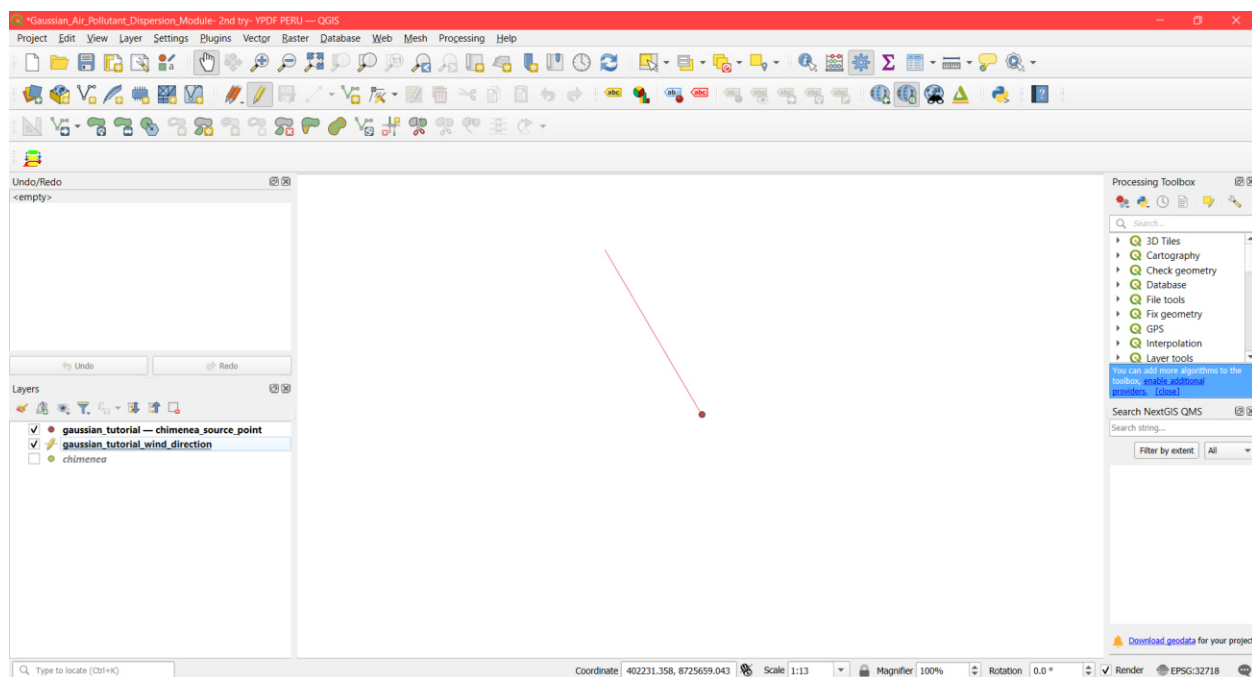
Se realizaron todos los pasos para dibujar la línea, con la opción de “Save Layer Edits” habilitada. Un paso extra tomado a la hora de salvar la línea fue teclear “yes”, aunque no apareciera escrito (ya que parece que la aplicación inhabilito la parte para poder editar lo salvado) y al oprimir “OK”, la línea se guardó.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 52

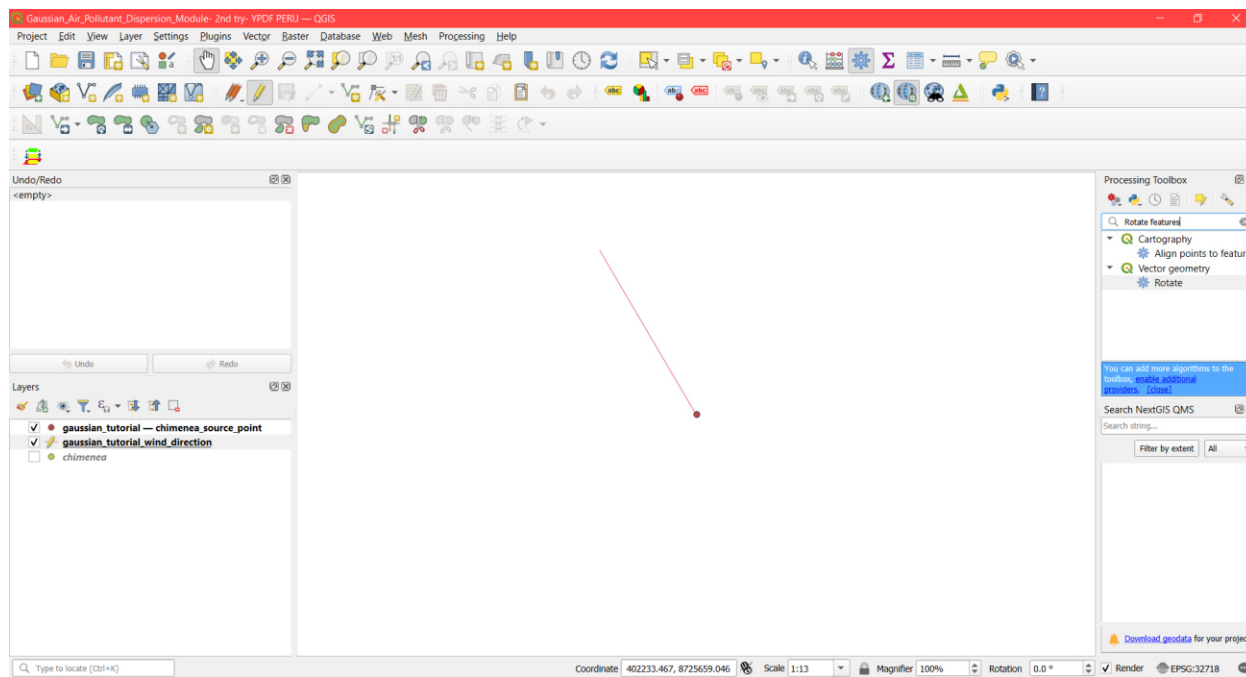
Visualización de la línea de la dirección del viento



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 53

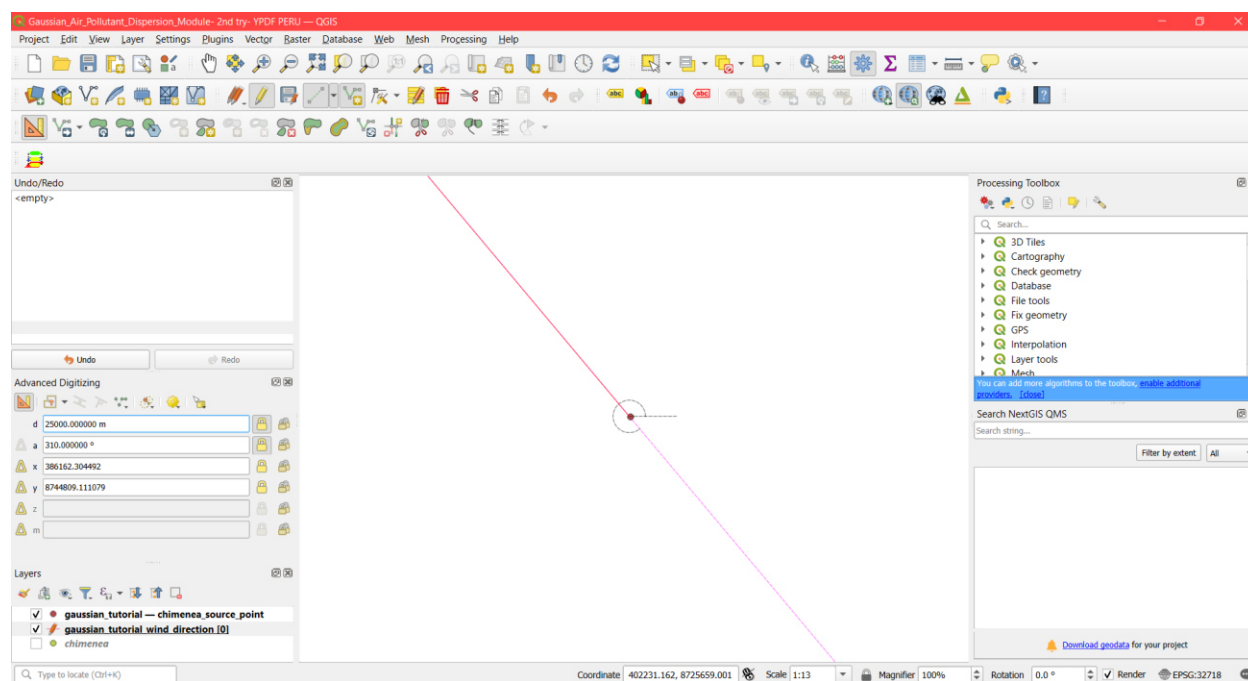
Se procedió a añadir el ángulo para la línea de la dirección del viento. Buscando las opciones de “rotate”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 54

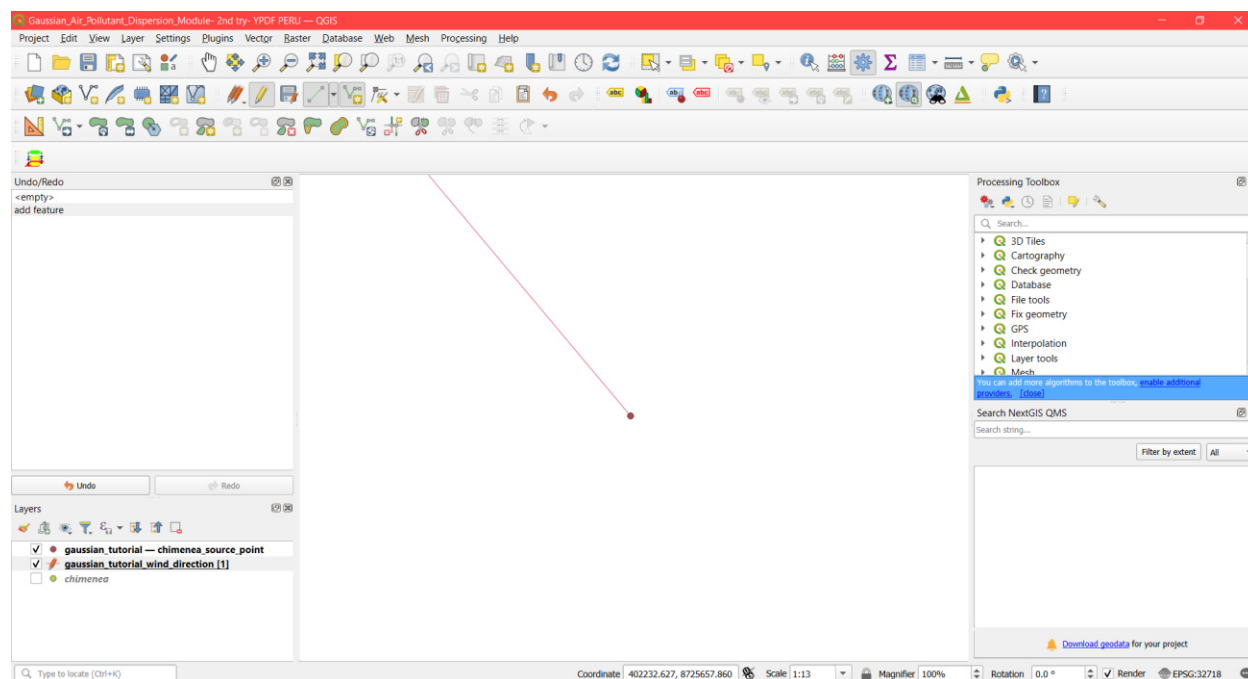
Antes de proseguir con la búsqueda para colocar el ángulo, se analizó lo siguiente. Si se logró que la aplicación guardará los nuevos cambios de los “layers”, eso significa que permitirá la utilización de “Advance Digitizing”, para evitar una mayor cantidad de pasos a ejecutar al momento. De esto, resultó que, dicho procedimiento anterior mencionado, se logró ejecutar y ya la línea del viento esta realizada en base a un ángulo de 310 grados y una distancia de 25km o 25,000metros



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 55

Siendo así, se completó el Paso2. Visualización de la línea de dirección del viento



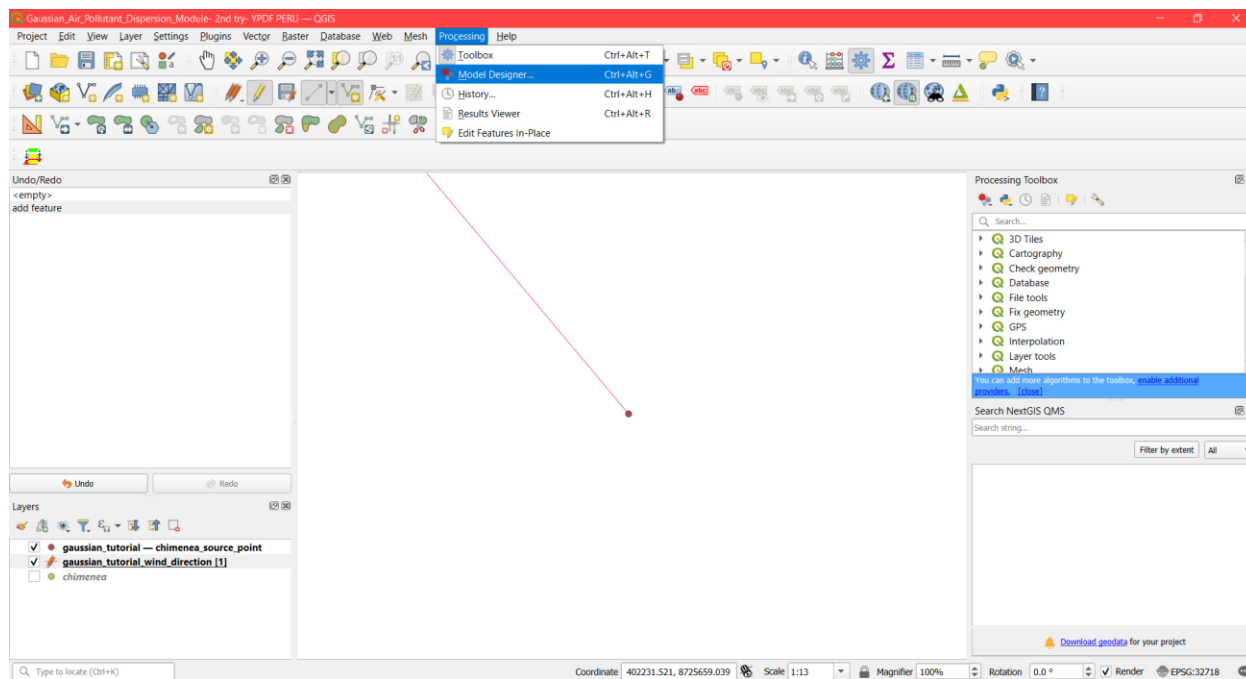
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Paso3 “Build Distance Rasters”

Al comenzar este paso hay que clarificar lo siguiente. En esta parte se debe crear básicamente 2 “mapas de distancia” (“rasters”), que le digan a QGIS: ¿Que tan lejos hacia delante de la línea del viento esta cada pixel (distancia en x)? y ¿Que tan lejos hacia los lados de la línea del viento esta cada pixel (distancia en y)? Para esto, pensamos en la línea del viento como en una flecha de humo dispersándose en el aire. Por tanto, necesitamos que QGIS construya una cuadrícula donde, cada celda sepa cuán lejos esta del viento y que tan lejos esta de la línea del viento. Lo cual resultaría en 2 mapas. A continuación, el procedimiento.

Figura 56

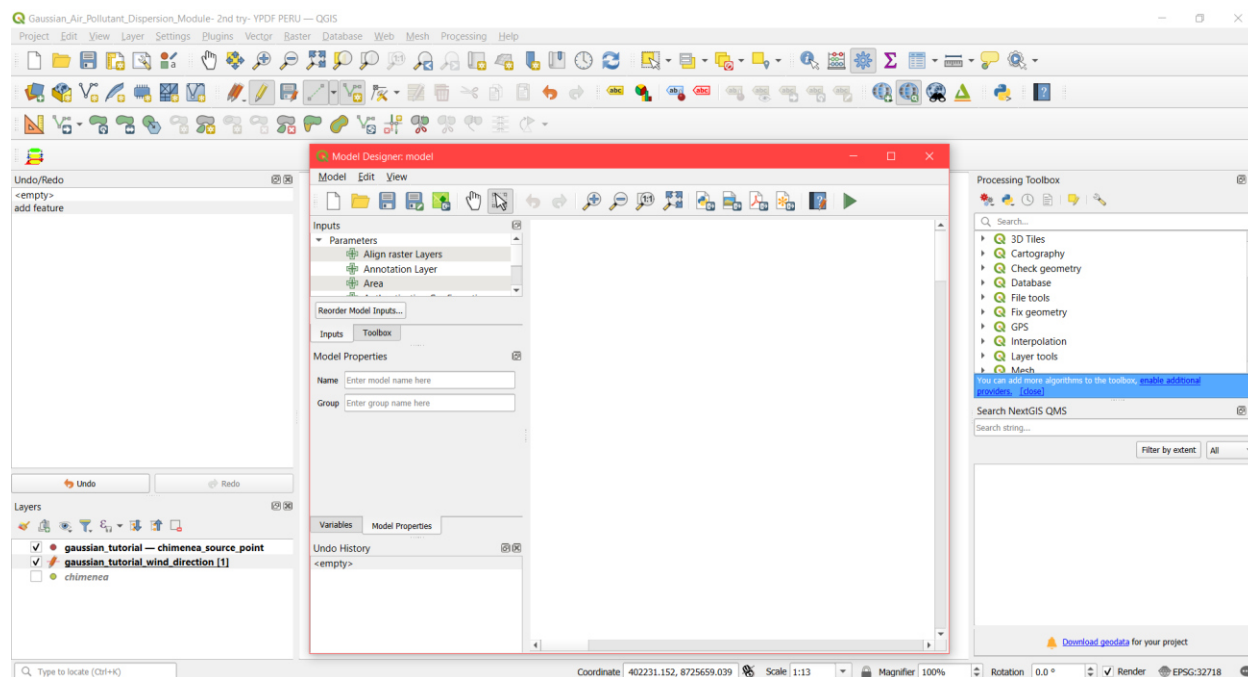
Primero se procedió a abrir el “Model Builder”. Y nombrarlo y salvarlo como “Gaussian Step 3”



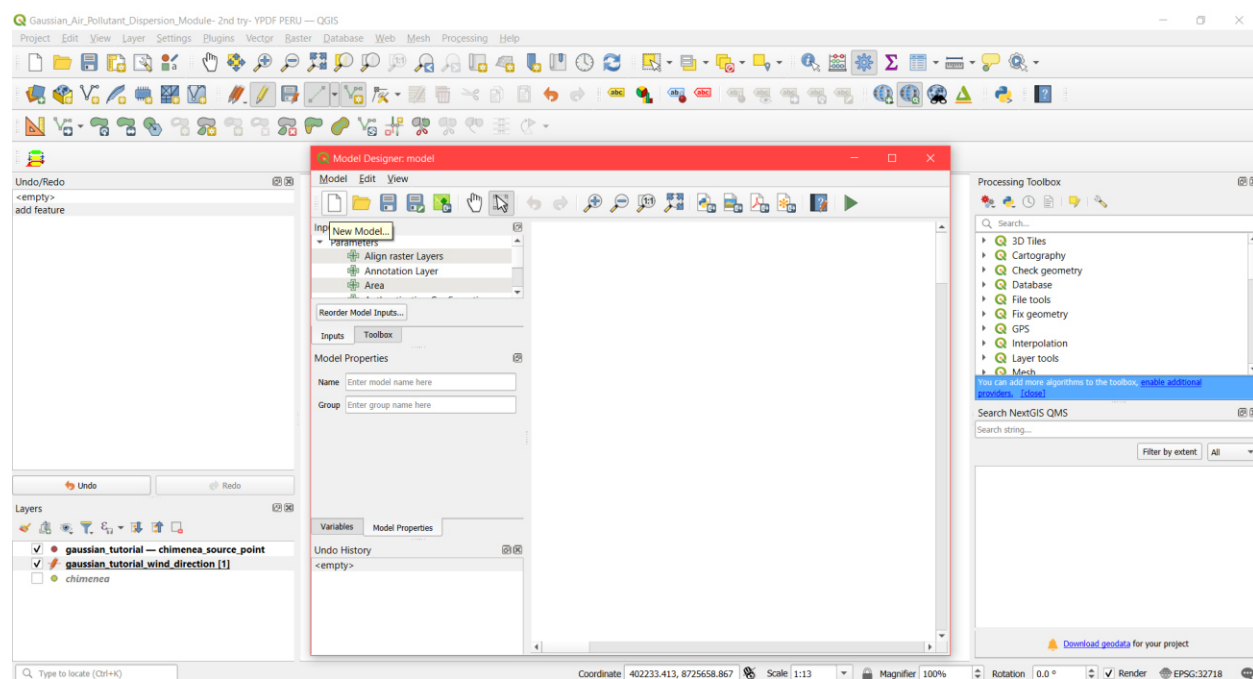
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 57

Visualización de la pantalla abierta para el proceso descrito anteriormente



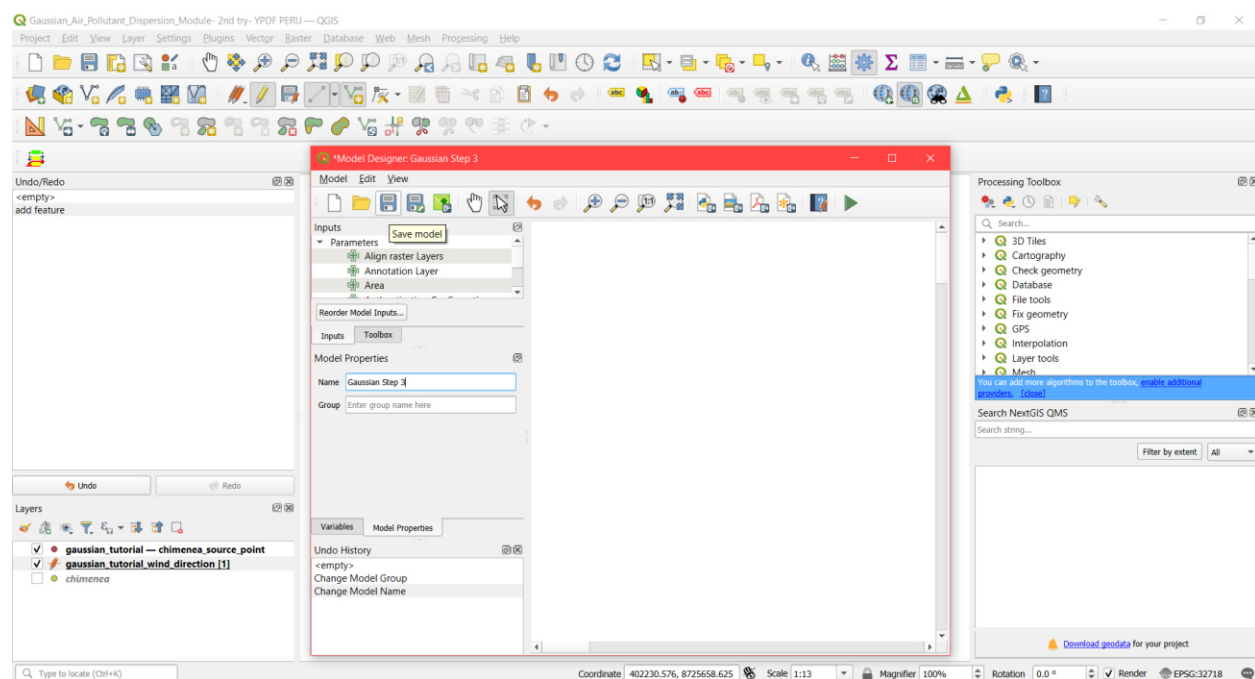
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 58*Creación de un nuevo modelo*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 59

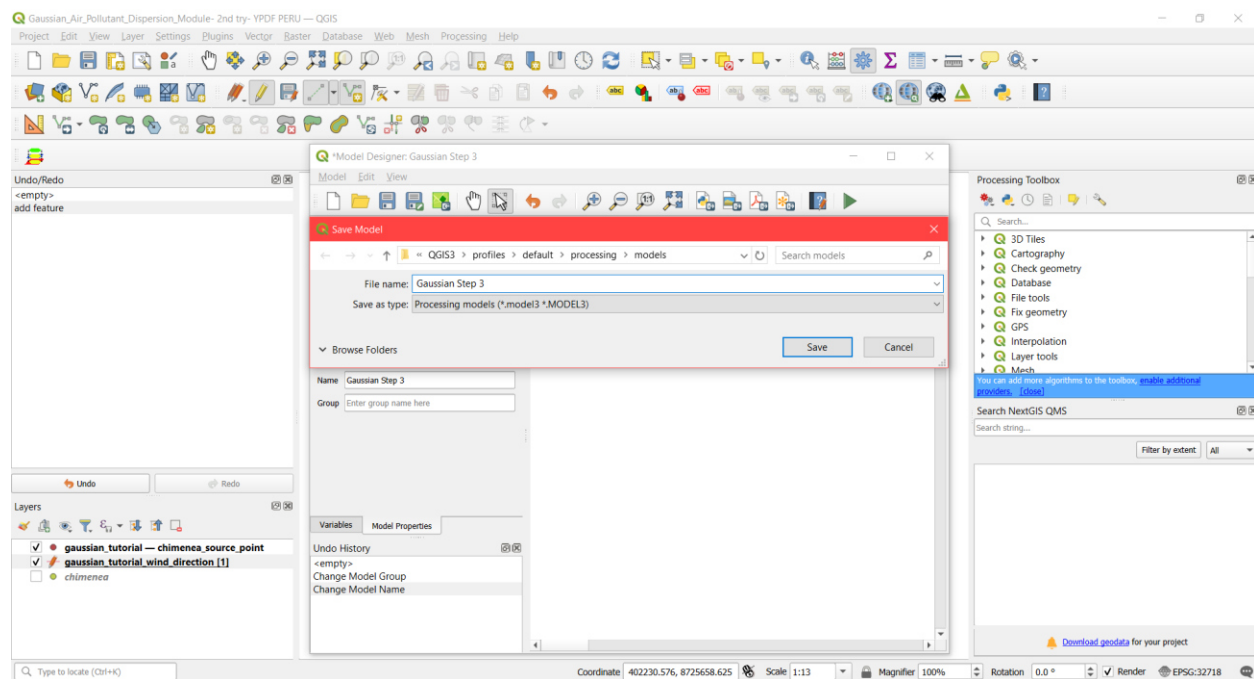
Nombrando el modelo: “Gaussian Step 3”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 60

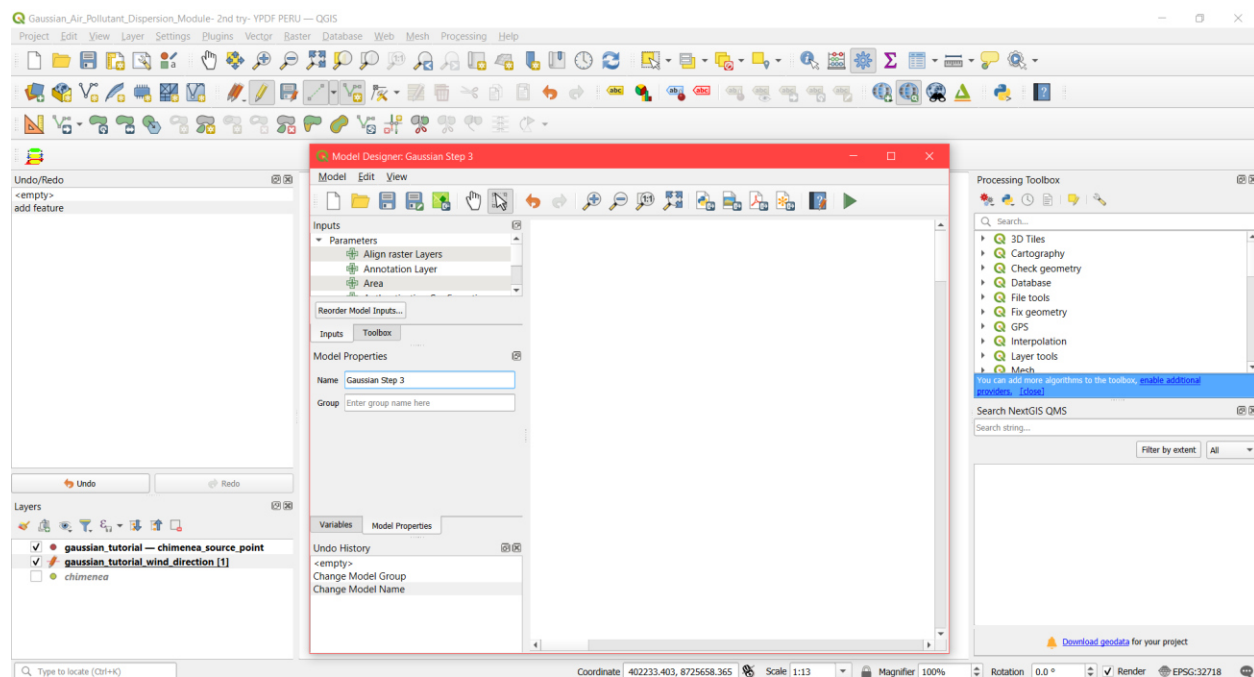
Visualización en la parte de salvar el modelo



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 61

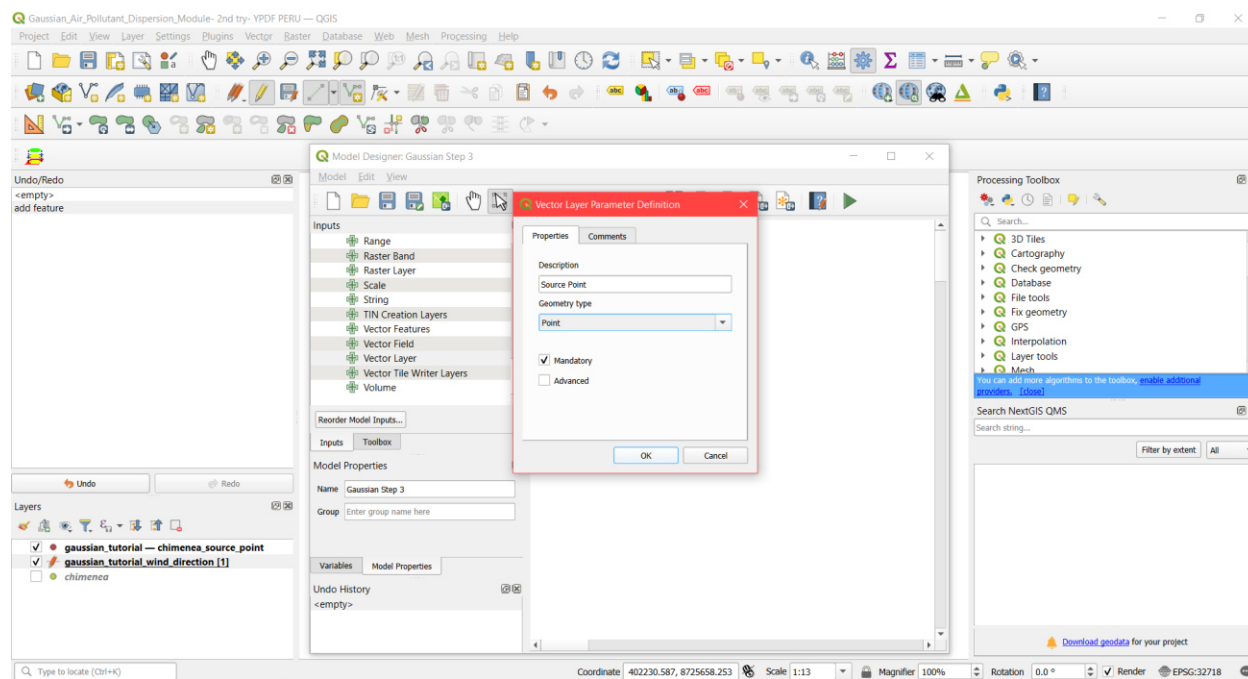
Visualización de todos los cambios guardados



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 62

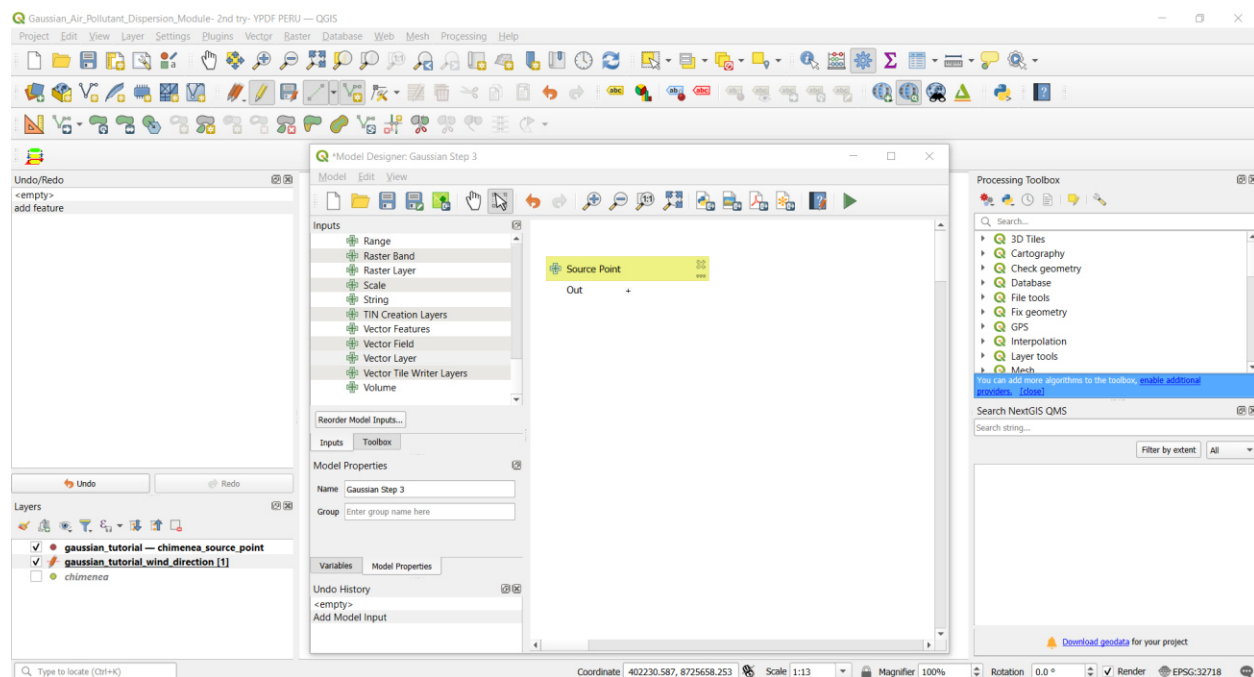
Luego se procedió a añadir los “Inputs”, para “Source Point” y “Wind Line”. A continuación, se muestra el de “Source Point”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 63

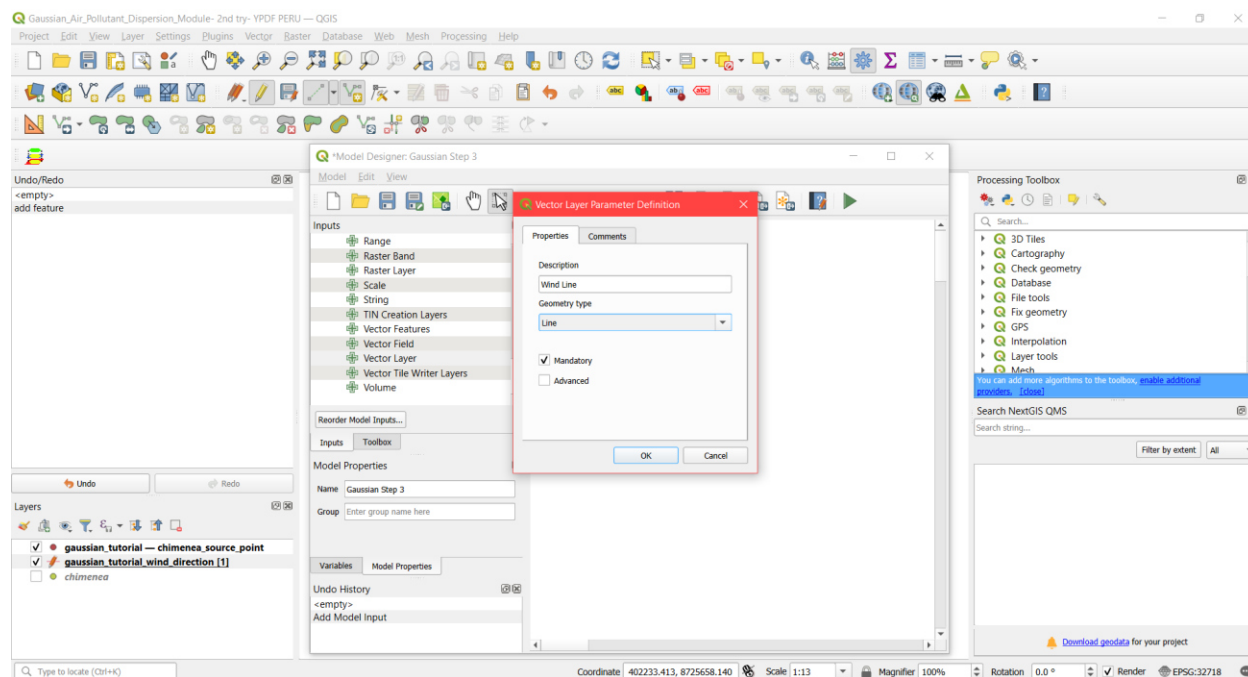
Visualización del “Source Point” añadido previamente



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 64

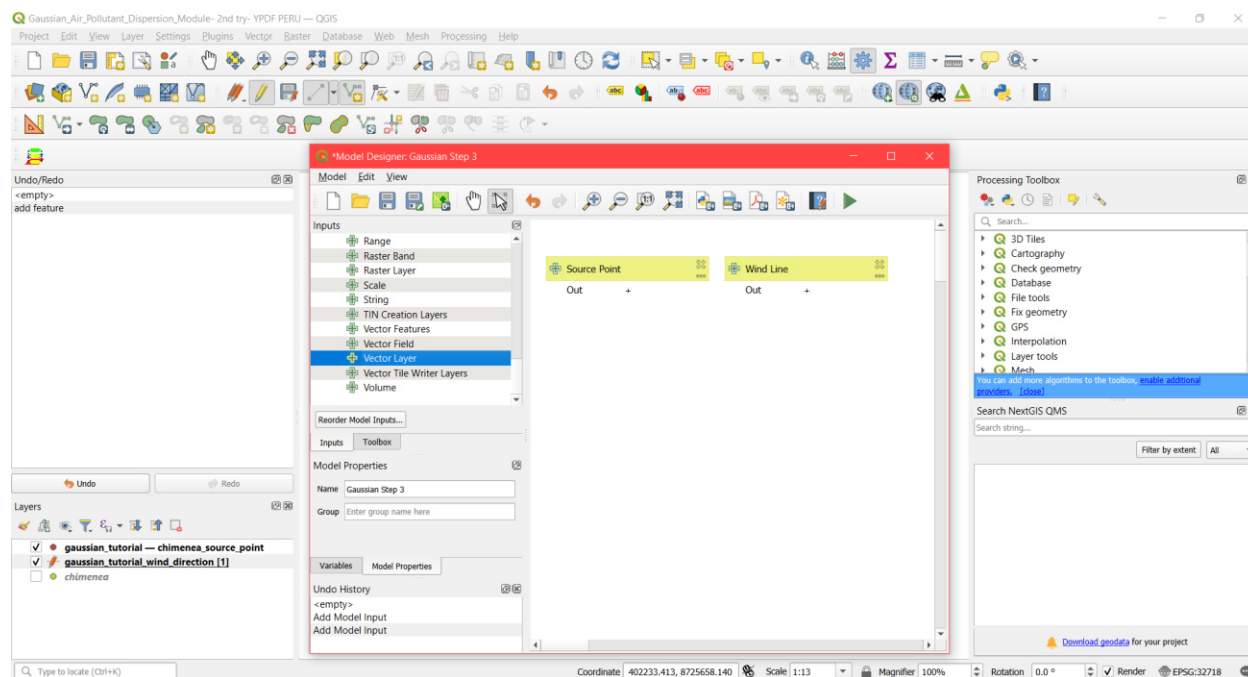
A continuación, se muestra como de manera similar se realizó el de “Wind Line”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 65

Visualización del “Wind Line” añadido previamente

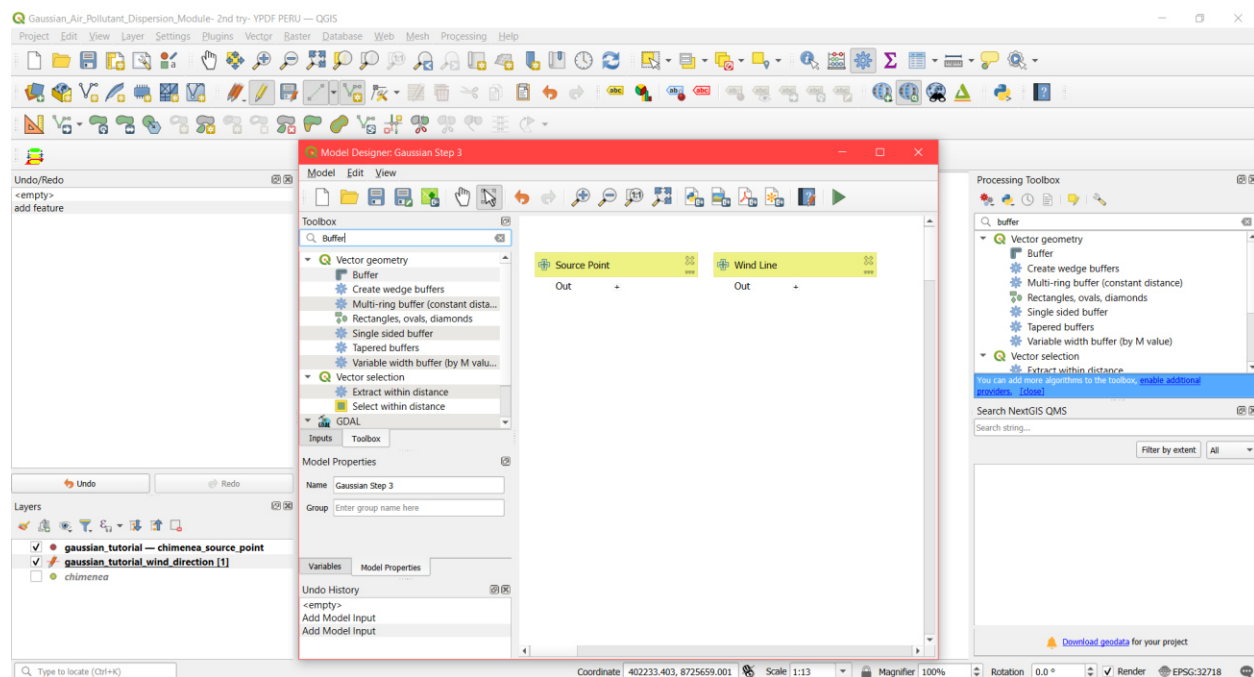


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Una vez culminado esto, se procedió a crear el “Área de Estudio” (mediante la herramienta de QGIS llamada “Buffer”). En esta parte se procedió a definir, cuan grande, el área de análisis es.

Figura 66

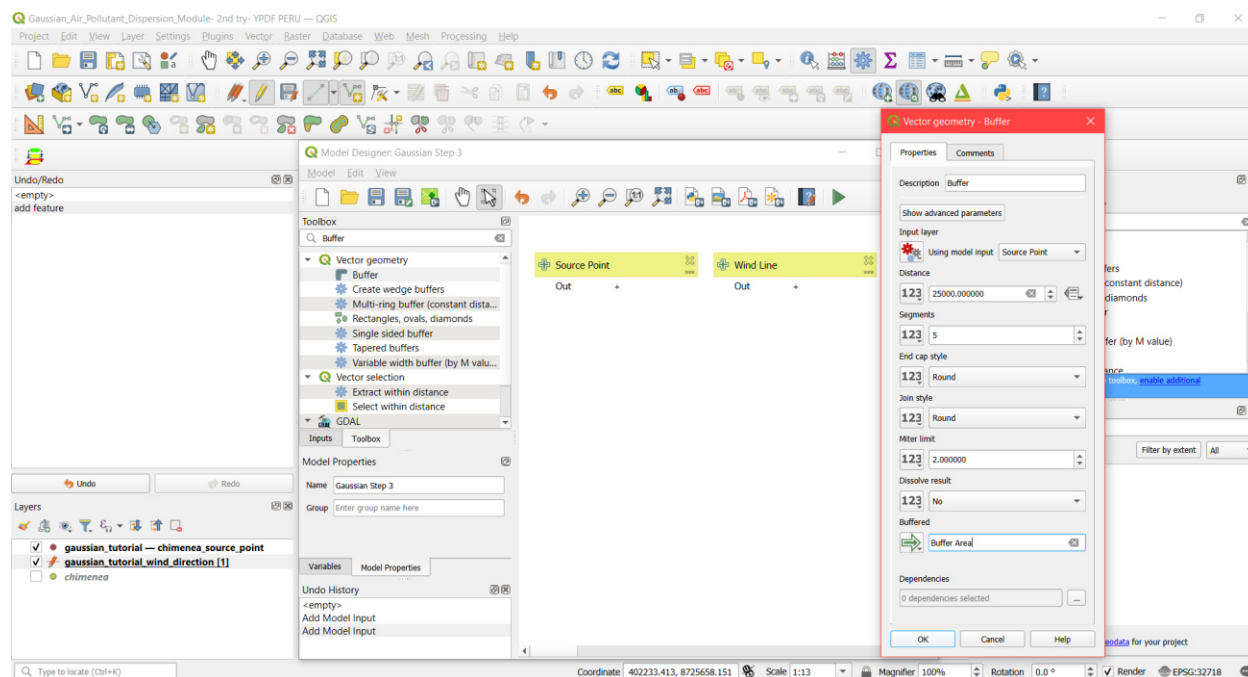
Proceso para añadir el área de estudio mediante la herramienta de QGIS llamada “buffer”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 67

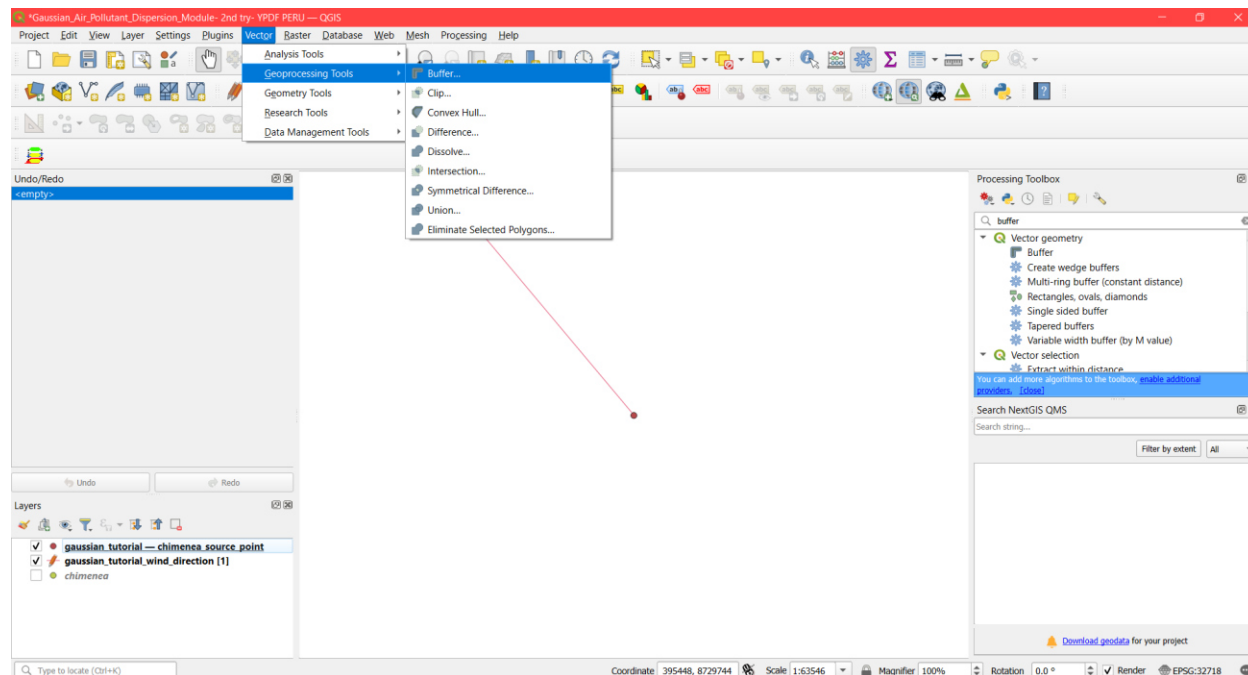
Información colocada para añadir el área de estudio



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 69

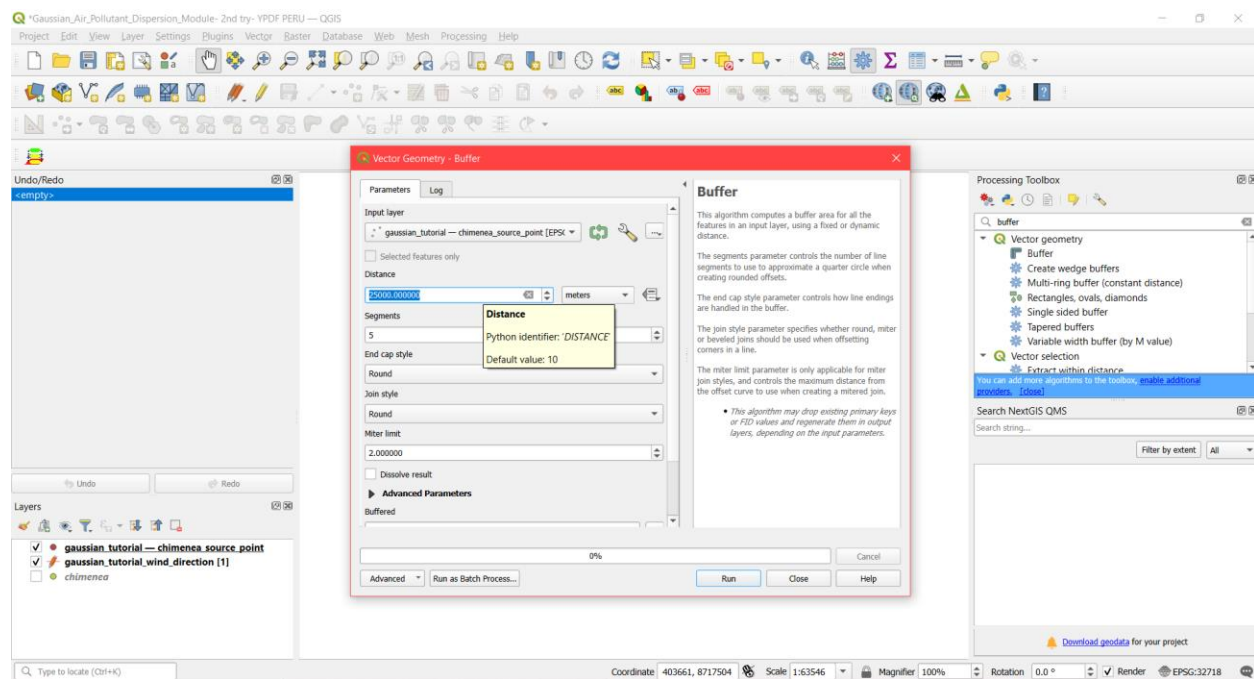
Luego de realizar los cambios anteriores, se esperaba ver la creación de un círculo alrededor de la chimenea, lo cual mostrara el área de estudio. Se procedió con los pasos para lograr la visualización



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 70

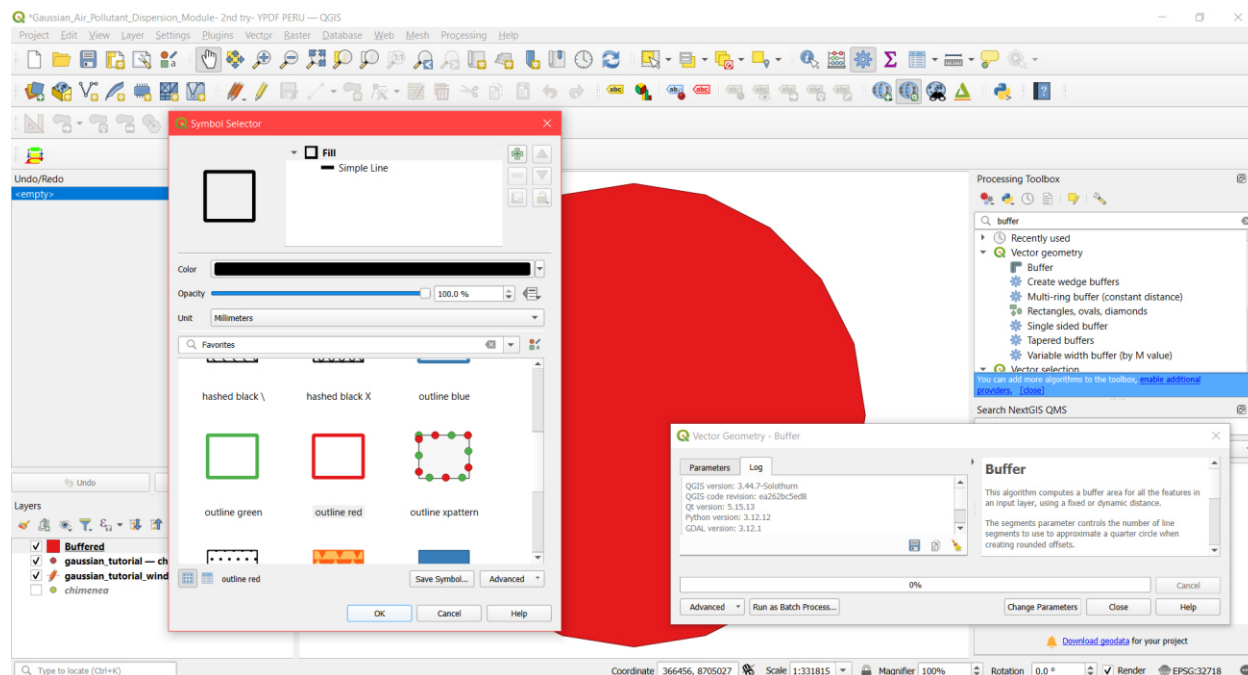
Se verificó que el “Input layer” sea el del “Source Point” y que la distancia sea de 25000 metros, para proceder a correr el modelo y “zoom to layers”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 71

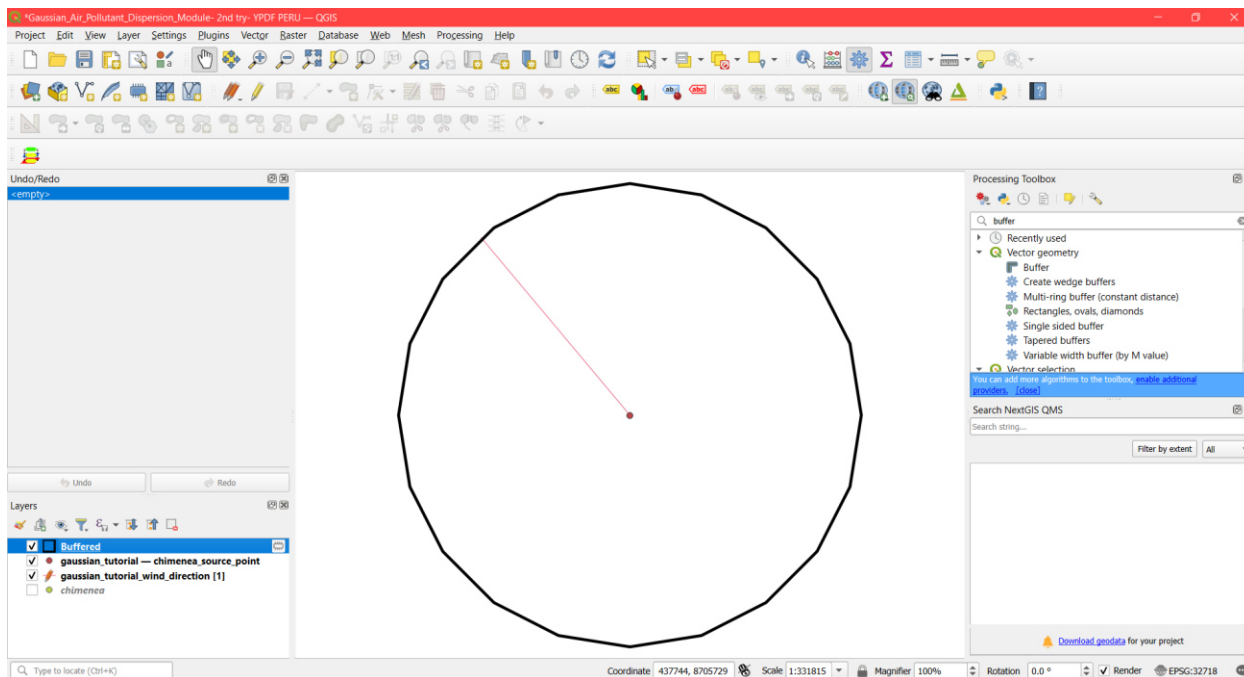
Una vez el círculo aparece, se comprueba que fue un problema en el sistema de referencias de coordenadas (CRS), por tanto, se verifico en el modelo de forma general y en el “Project > Properties” que el CRS y los metros, estuvieran en orden



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 72

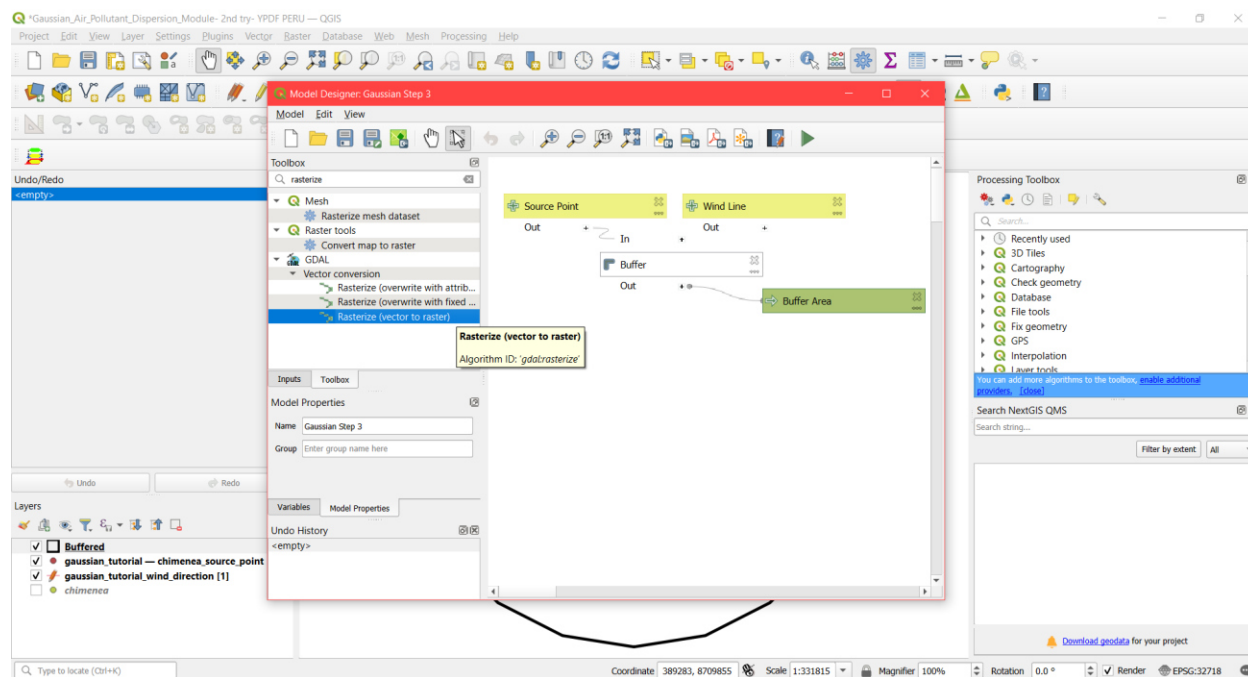
Se realizo un procedimiento alterno (cambiar el estilo o “Symbol Sector”) para remover el color sombreado interno (“fill”) del círculo del área de estudio. A continuación, visualización de los cambios realizados



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 73

Se procedió a convertir el vector a “Raster” (es convertir las imágenes de los vectores a pixeles)

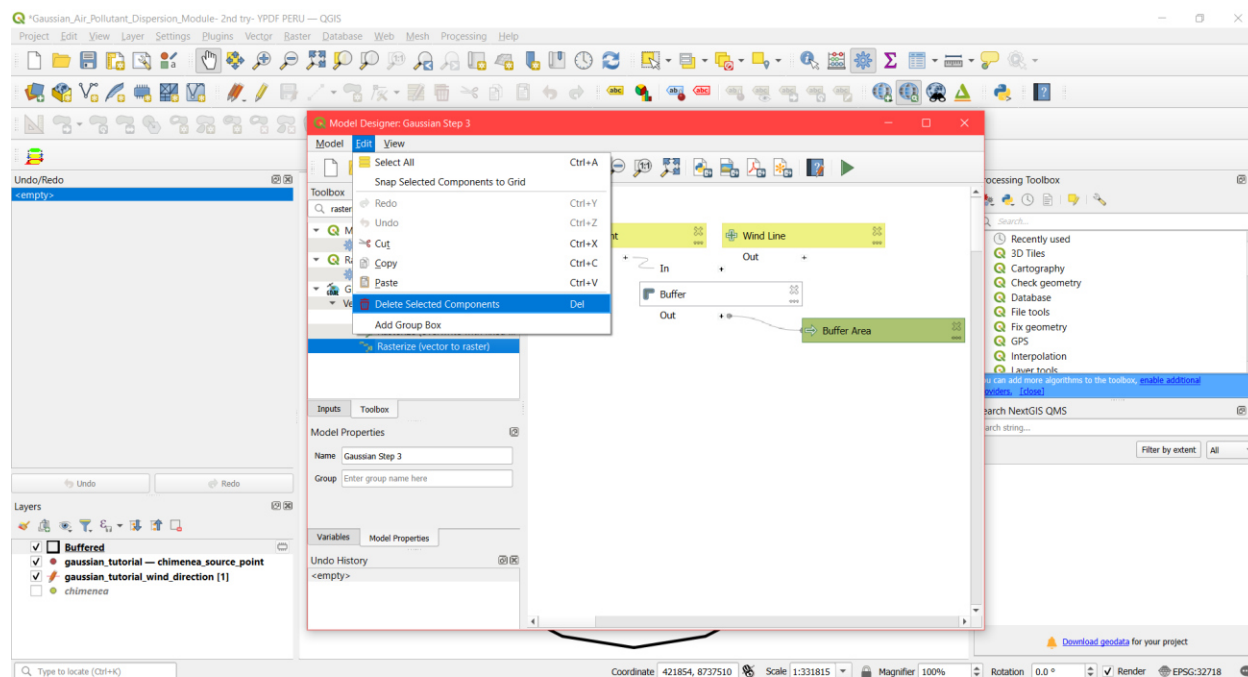


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Al parecer QGIS no reconoció el “Buffer output” como un “output” valido para el modelo y por esto “Rasterize” no lo ve. Para resolver esto, se procedió a borrar la herramienta de “Rasterize” temporalmente y arreglar el “Buffer output”. Luego de 3 métodos diferentes intentados para encontrar la manera de borrar el mismo, Resulta que QGIS tiene un “bug” que según la información investigada, es muy común, por lo cual se buscó añadir una nueva herramienta de “Rasterize”. (A continuación, se demuestra que no será necesario seguir con la ejecución de esta parte).

Figura 74

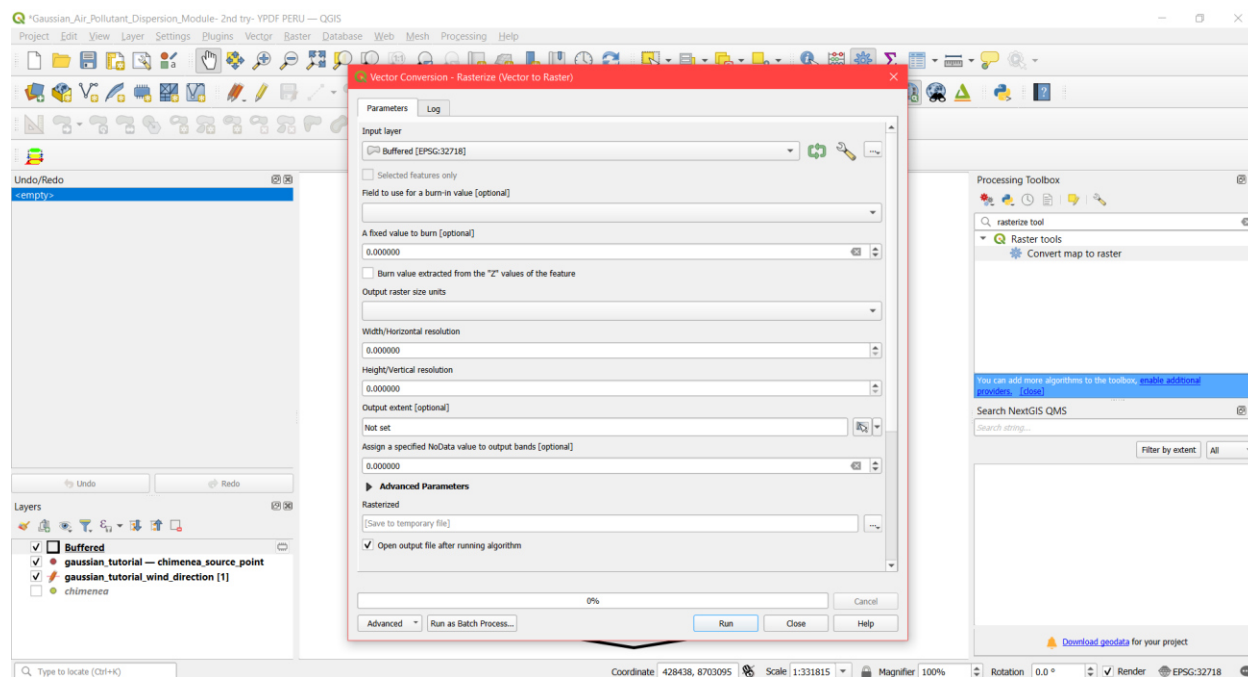
Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 75

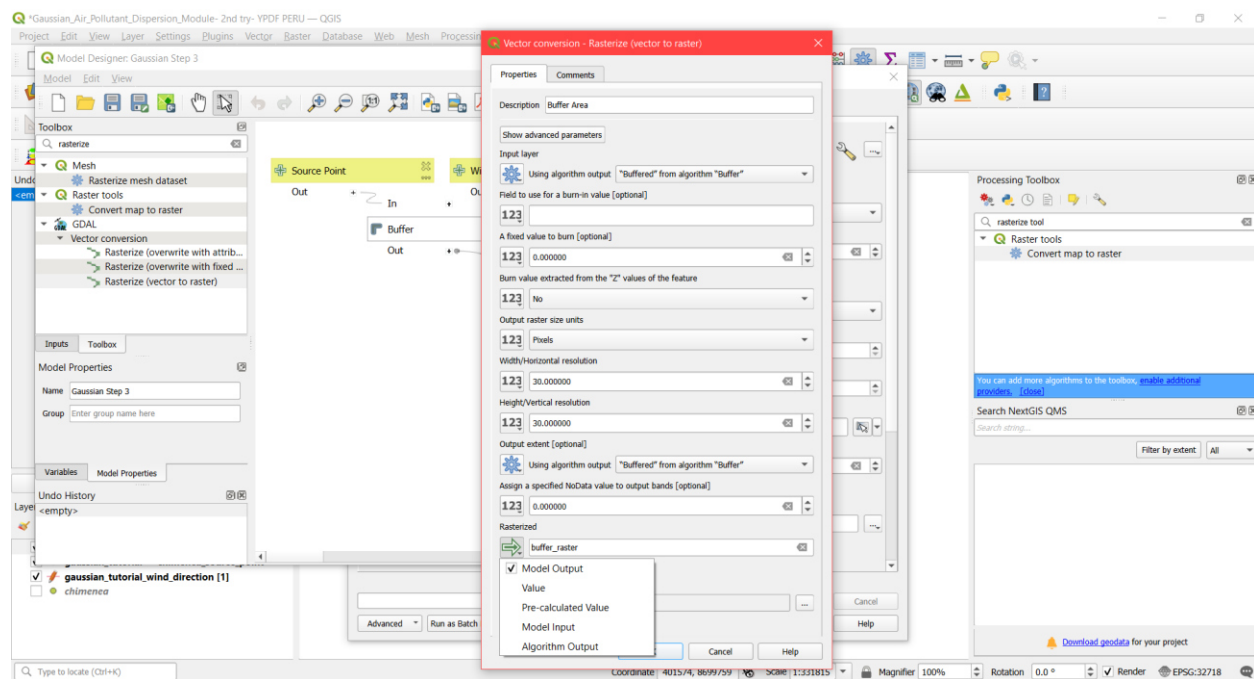
Investigación alterna dentro de QGIS. (Evidencia de que en alguna parte de QGIS se esta permitiendo el “Buffer” como un “Input”)



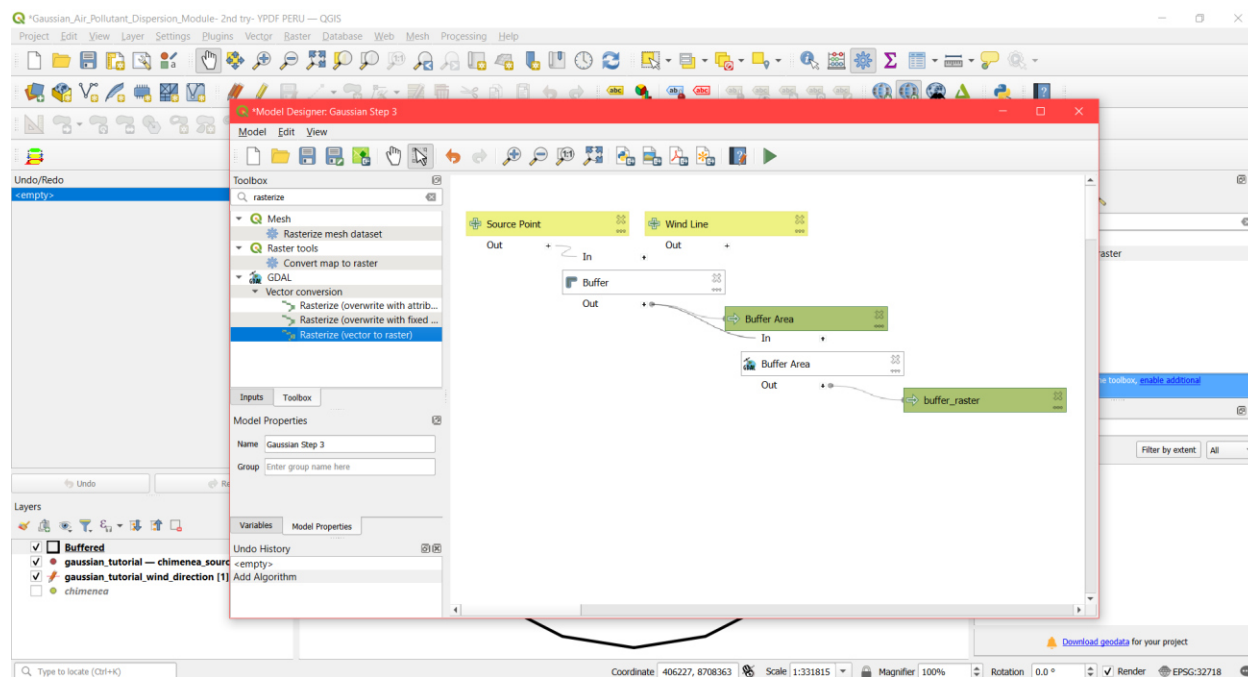
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Resulta que para las opciones del “input”, se debía realizar un cambio en la selección para el mismo. A continuación, se muestra la selección y los campos que deben ser llenados para parte de la creación del “raster”. Es importante recordar comandos específicos que deben ser llenados o seleccionados para: “Description, Input layer, Output rasters size units, resolutions (considerado el valor de 30 para que se parezca al tutorial), Output extent [optional], and Rasterized (Model Output) (este último se llena para que no sea un “file” temporal)”.

Figura 76

Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

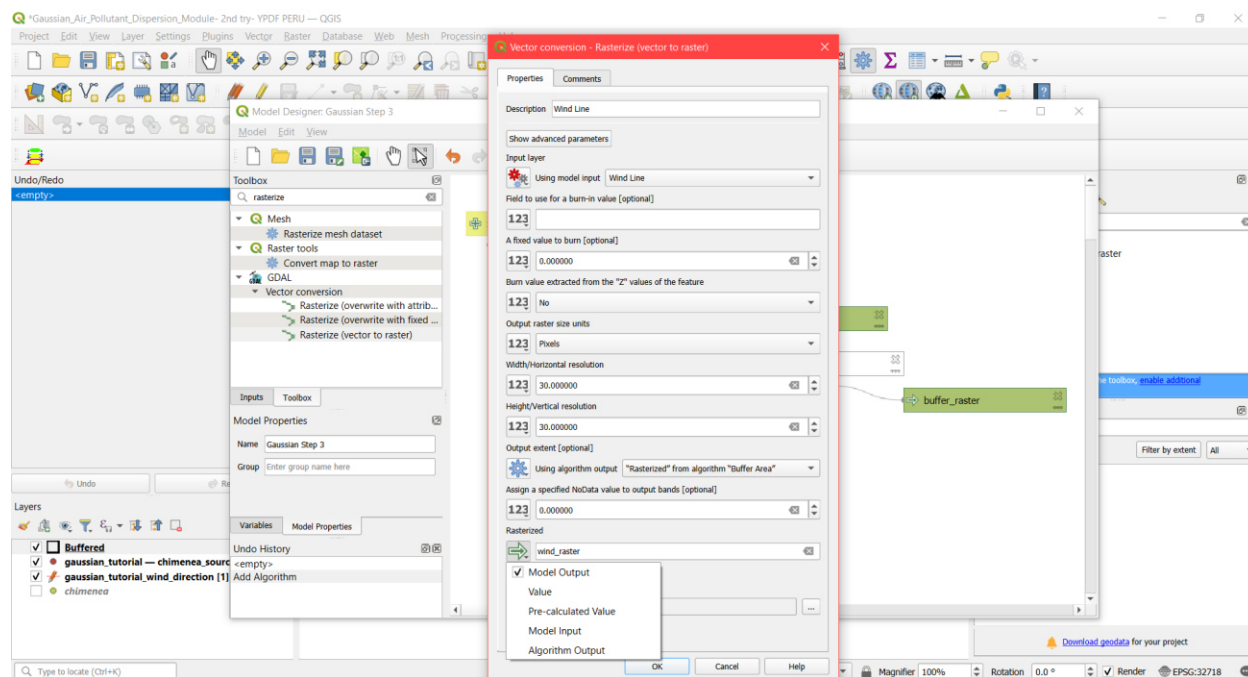
Figura 77*Visualización de cambios hasta el momento*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Luego se realiza un procedimiento similar para “Rasterize the Wind Line” (justo como se “Rasterized the Buffer” anteriormente. A continuación, una visualización de los comandos específicos que deben ser llenados o seleccionados (justo como se describió anteriormente, pero con leves cambios).

Figura 78

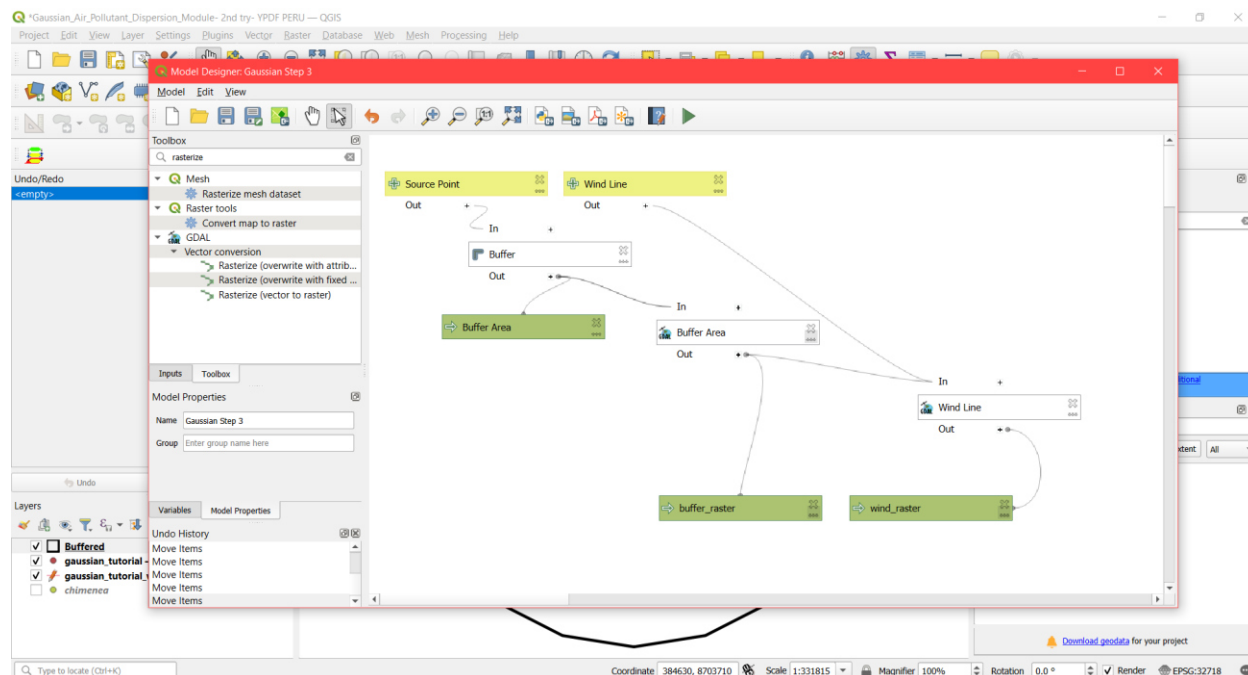
Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 79

Visualización de los cambios realizados. Se puede observar que se crearon dos encasillados para “Buffer Area”, de los cuales el de GDAL, no es necesario. Se procedió a realizar una búsqueda y pasos adicionales para solucionar la presencia del “buffer” extra



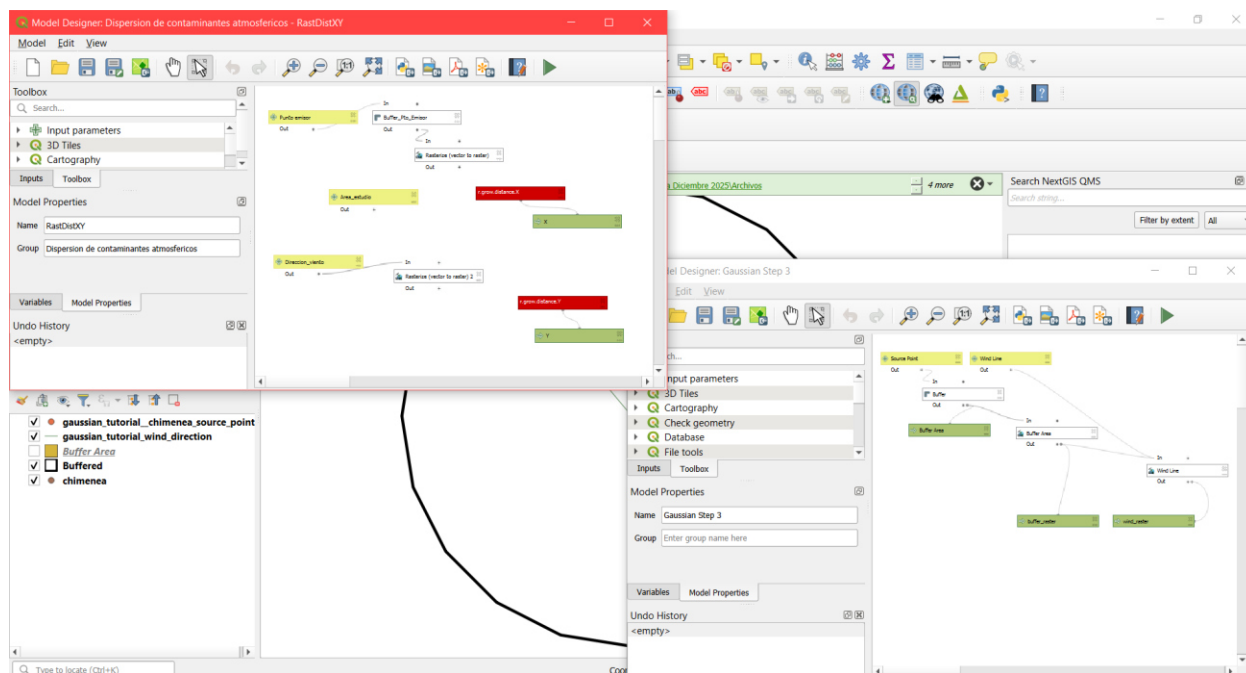
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Se aclaró mediante la mentoría del Profesor Miguel Rodríguez Montalvo que la presencia del “Buffer” extra que aparece, es requerida, ya que, no es ignorada por la aplicación de QGIS (como se mencionaba en una búsqueda realizada); si no, que la misma sirve como una caja de cálculos para QGIS, en la cual se dan los comandos para los cálculos que deben ser realizados. Aunque, visualmente cree un poco de confusión, es necesario que sea de esta manera para que la aplicación realice exactamente lo que debe.

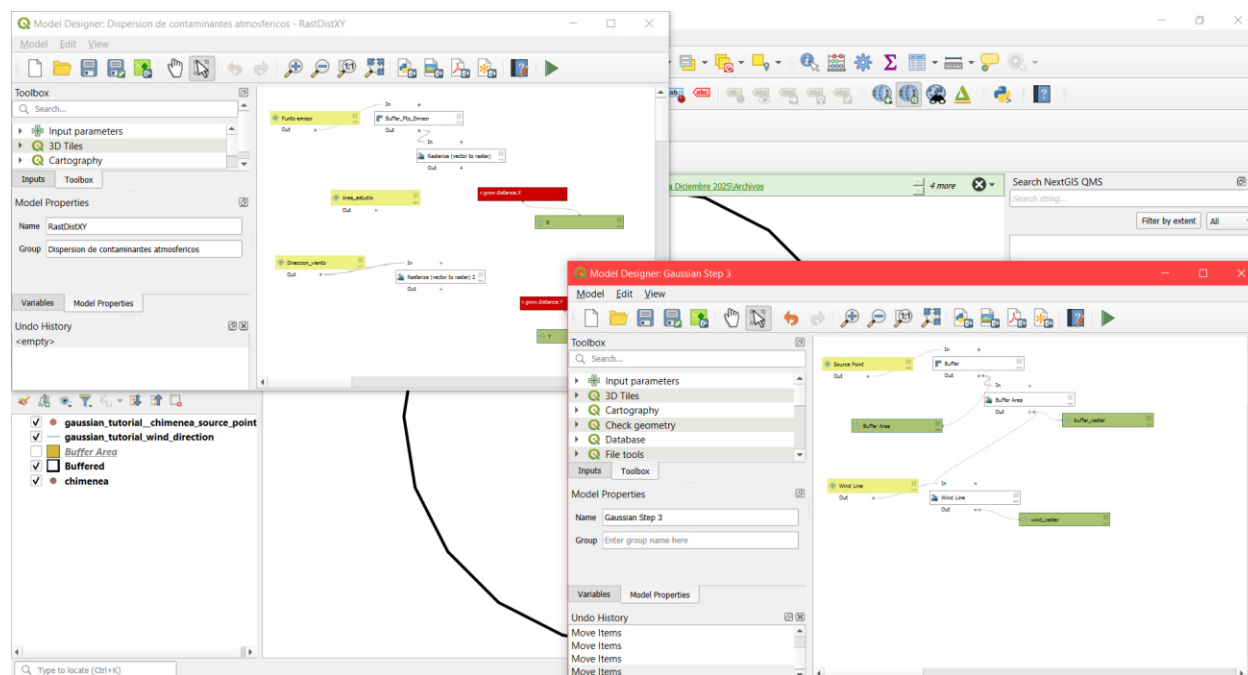
Figura 80

Visualización para comparar el modelo del tutorial con el que he realizado hasta el momento. Se procedió a mover las cajas para que ambos modelos tengan un parecido y no haya confusiones.

(Izquierda→ modelo del tutorial, Derecha→ modelo realizado)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 81*Visualización de los cambios realizados*

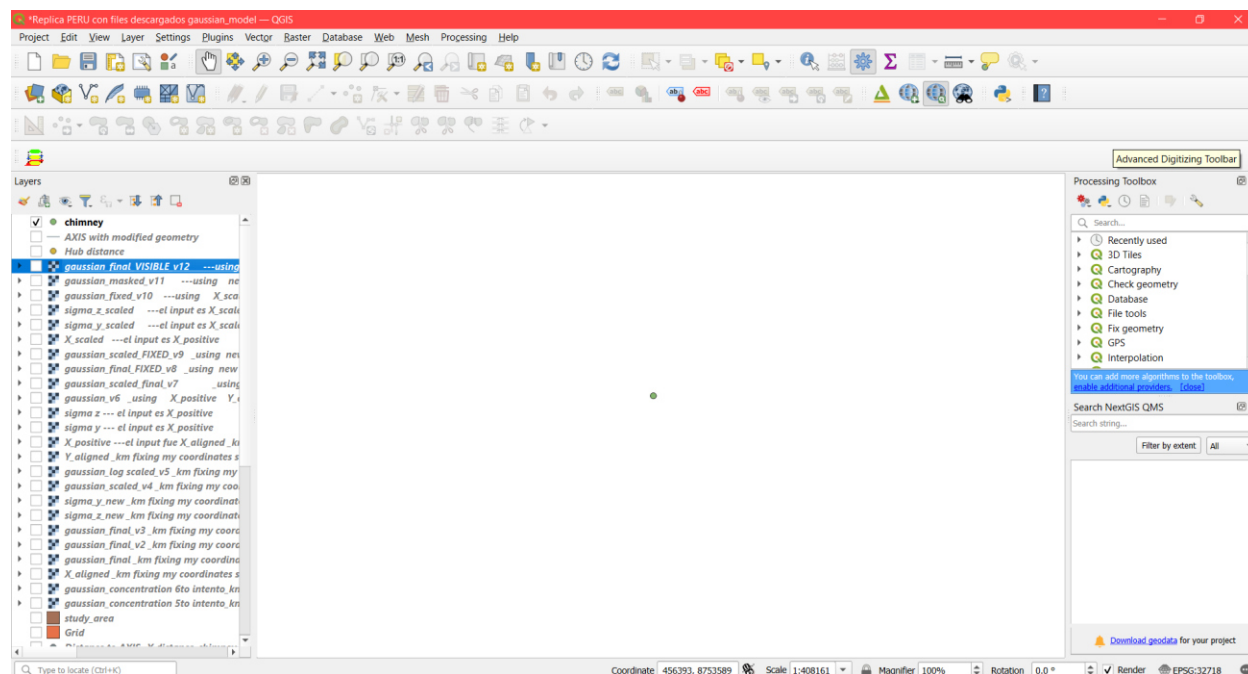
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Es importante aclarar que, se intentó realizar la corrida con los pasos ejecutados anteriormente (hasta la ejecución que se muestra anteriormente), pero la misma no fue exitosa. Por tanto, a partir de este punto se realizó una nueva búsqueda en cuanto a una manera alterna para realizar el procedimiento a partir de los archivos originales descargados (búsqueda que resultó, en realizar el procedimiento no desde el “model designer”, si no que desde la calculadora normal de QGIS). Por lo cual, el procedimiento se comenzó nuevamente, esta nueva manera de realizar el procedimiento condujo de igual manera, a la solución de detalles, que antes no se habían presentado.

A modo general se trabajó con los siguientes pasos generales: añadir las capas en los canvas de QGIS (CSV para añadir el punto de la localización de la chimenea, línea de la dirección del viento y el área de estudio (mediante la herramienta de QGIS llamada “buffer”); crear los “rasters” de distancia (X y Y); crear los coeficientes de dispersión (sigma Y y Z); y ejecutar el “raster” de la concentración final gaussiana. Pero a continuación, se describirán estos pasos con sus subdivisiones, mediante las figuras del procedimiento realizado.

Figura 82

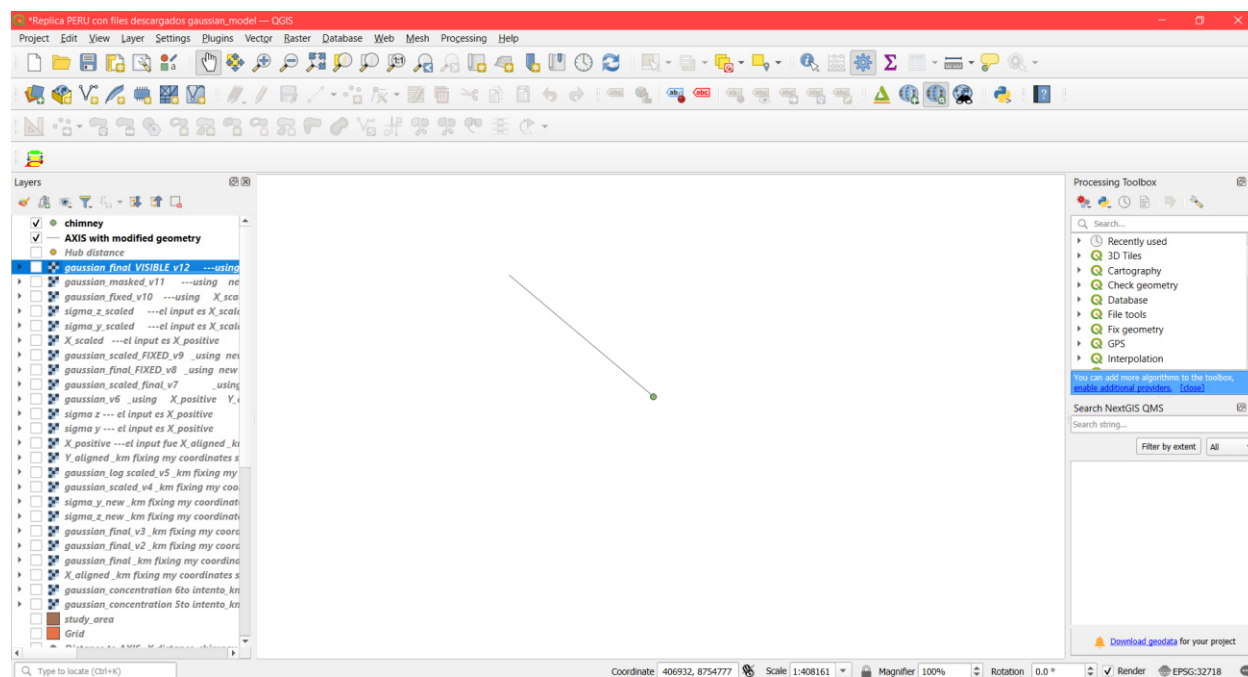
Paso 0 al 1: Preparar QGIS, guardar el proyecto, añadir el punto de la chimenea (CSV)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 83

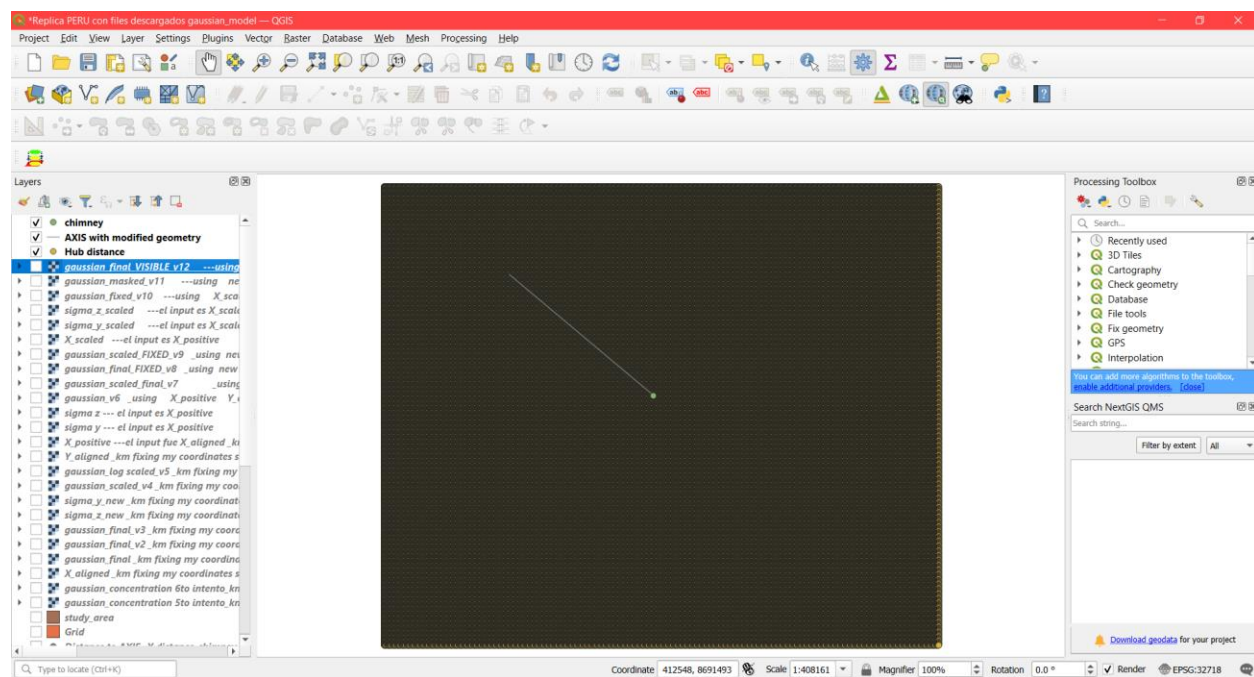
Paso 2: Crear la línea de dirección del viento (AXIS)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 84

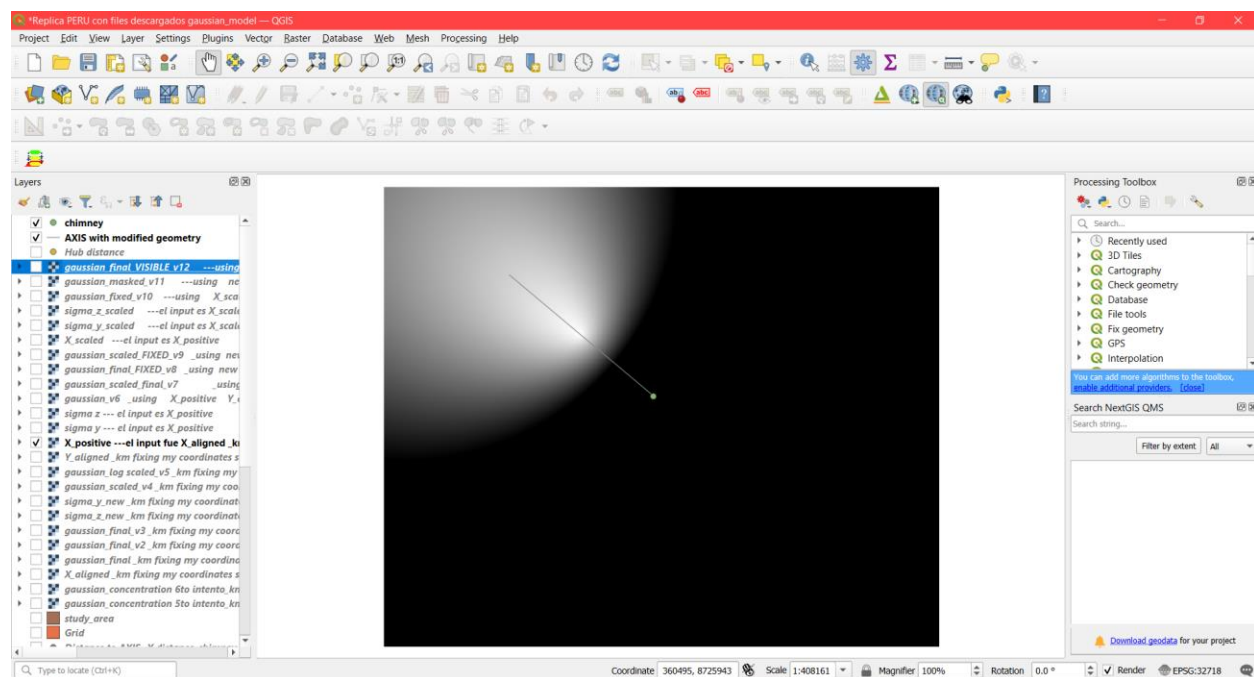
Paso 3: Crear el polígono del área de estudio



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

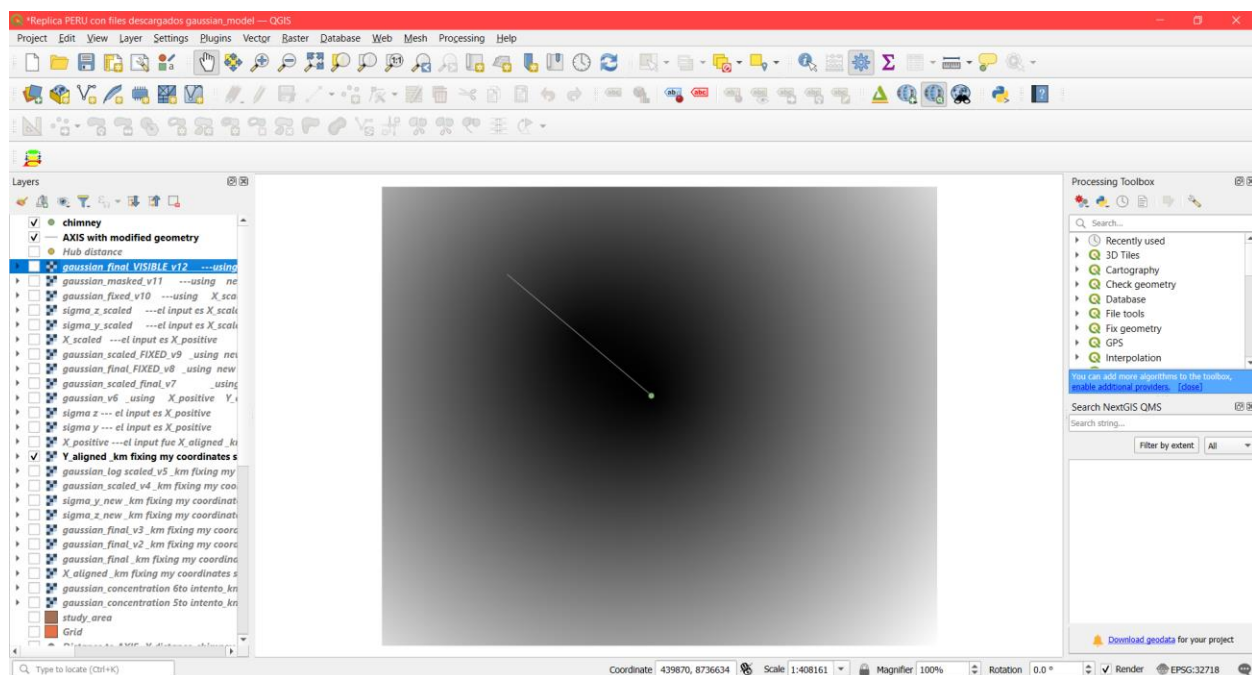
Figura 85

Paso 4: Crear el “raster” de distancia (X y Y)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 86

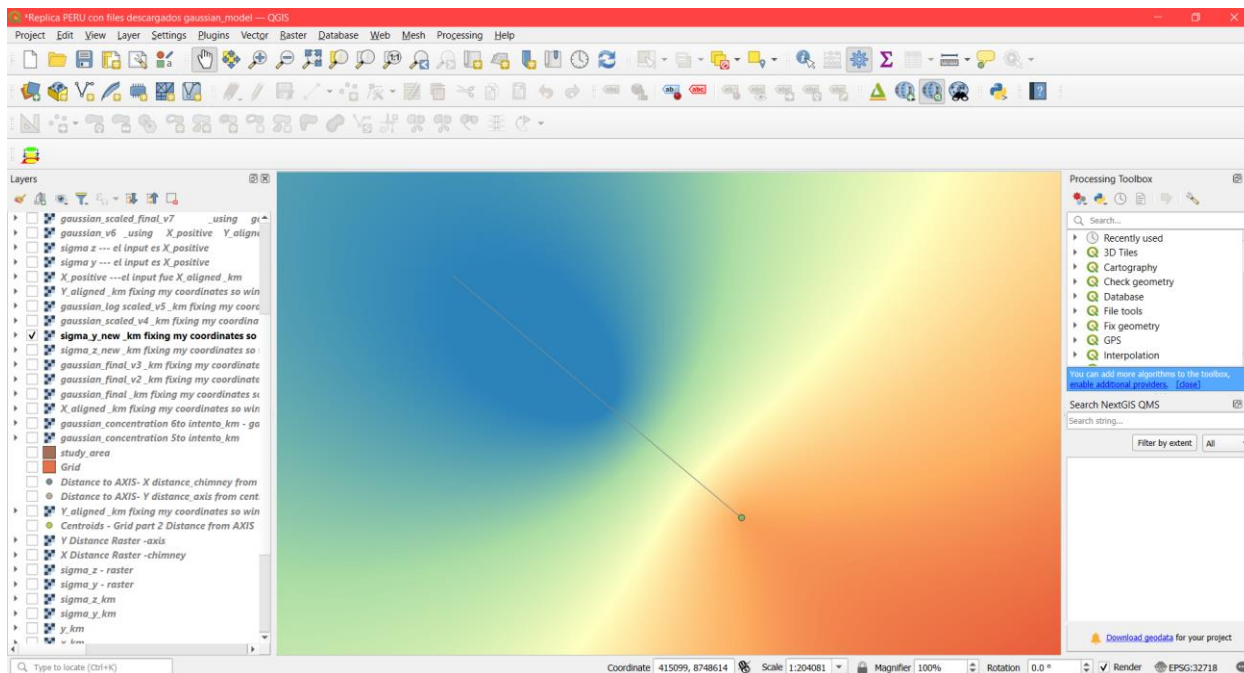
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 87

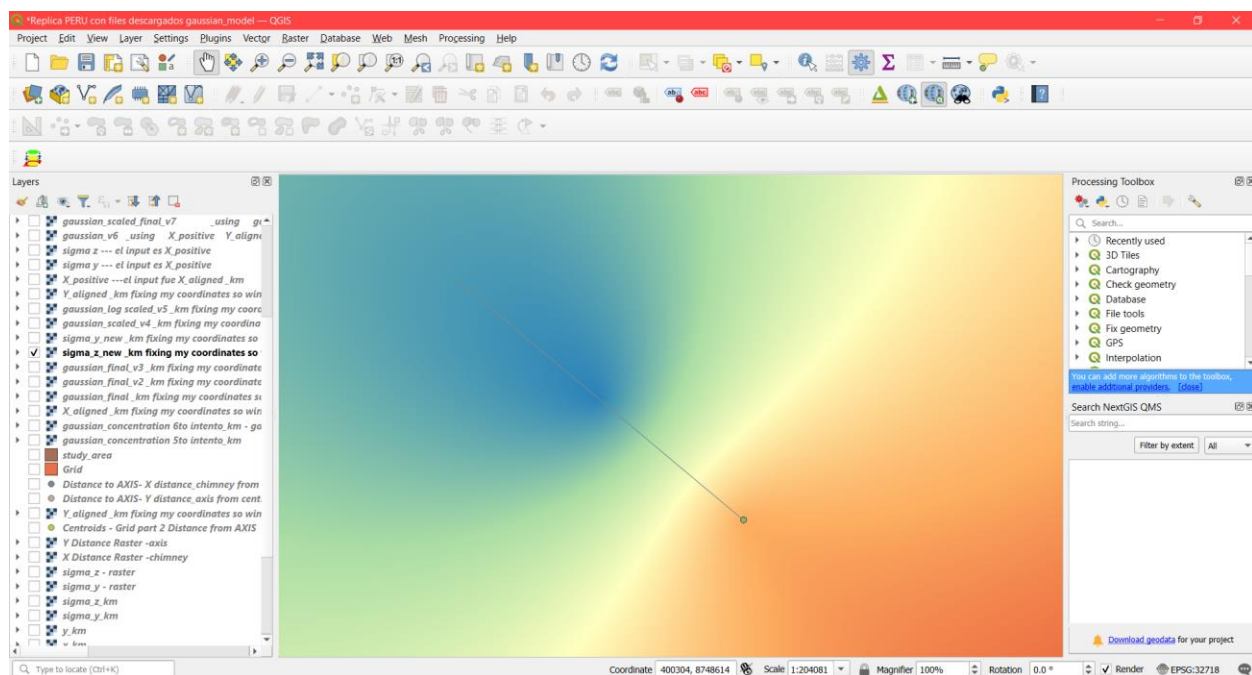
Paso 5: Crear los coeficientes de dispersión (sigma Y y Z).

Sigma Y y Z, con el cambio a km para lograr la visualización apropiada de acuerdo a los “píxeles”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

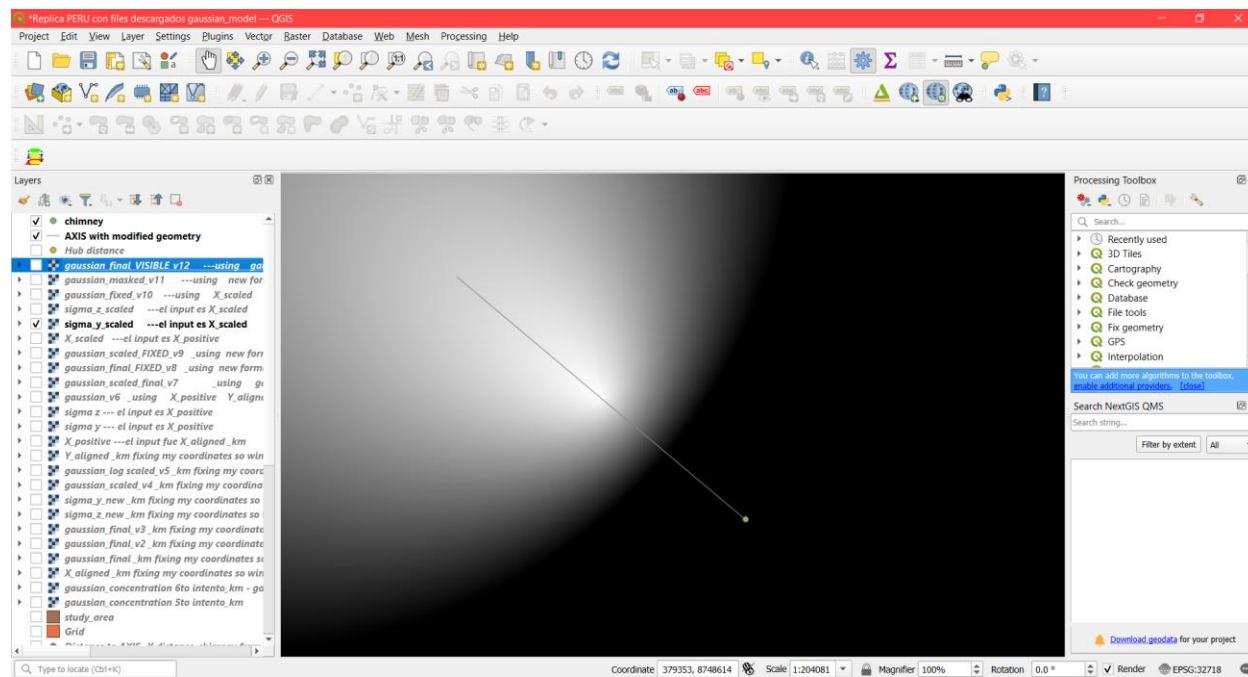
Figura 88

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

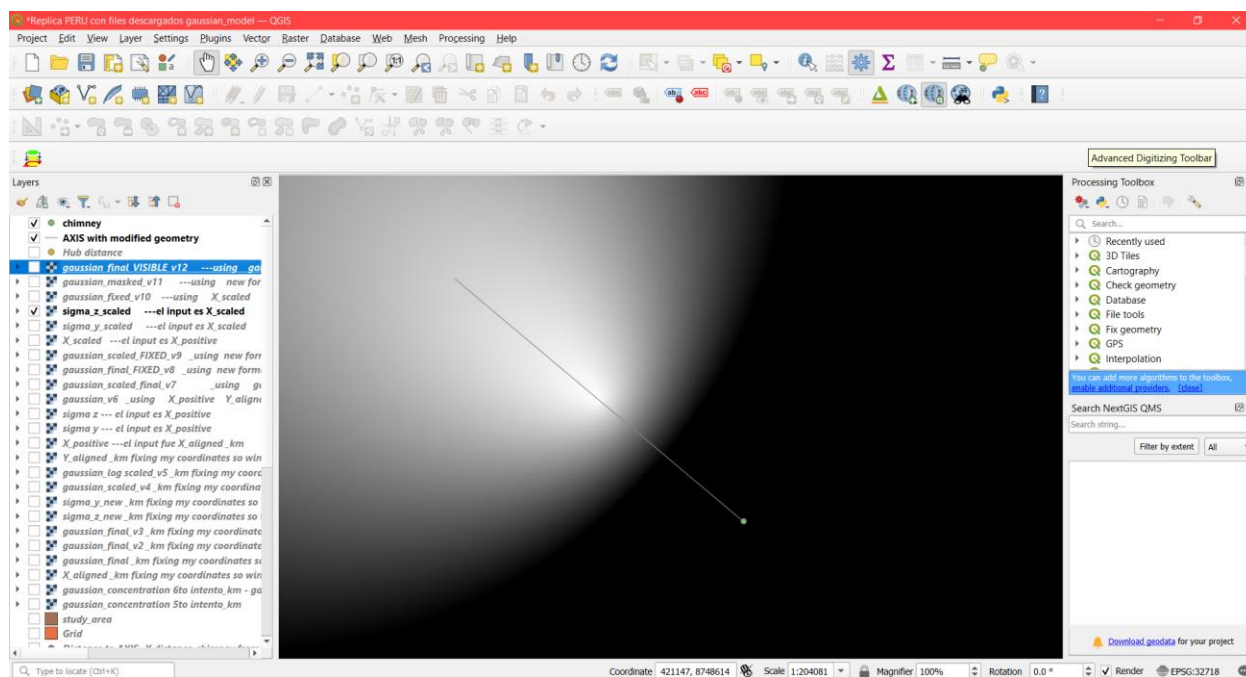
Figura 89

Sigma Y y Z, con el cambio (scaled) para lograr la visualización apropiada de acuerdo a los “píxeles”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 90

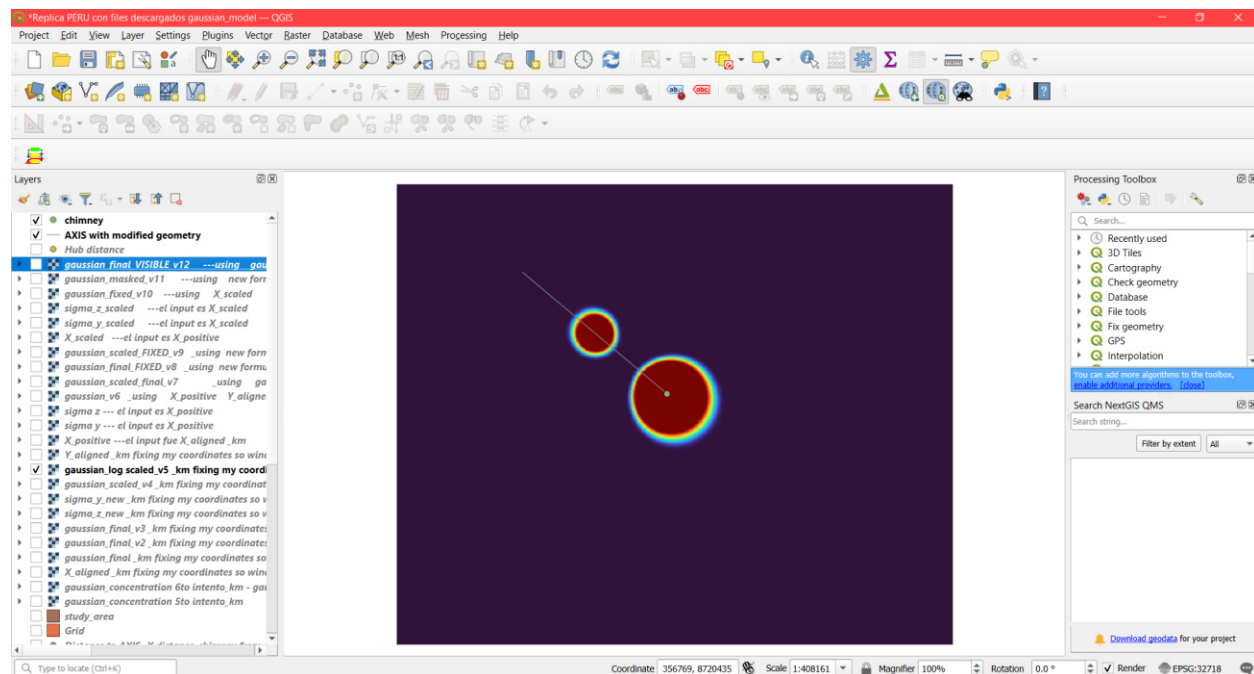
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 91

Paso 6: Crear el “Centerline Concentration” (concentración central).

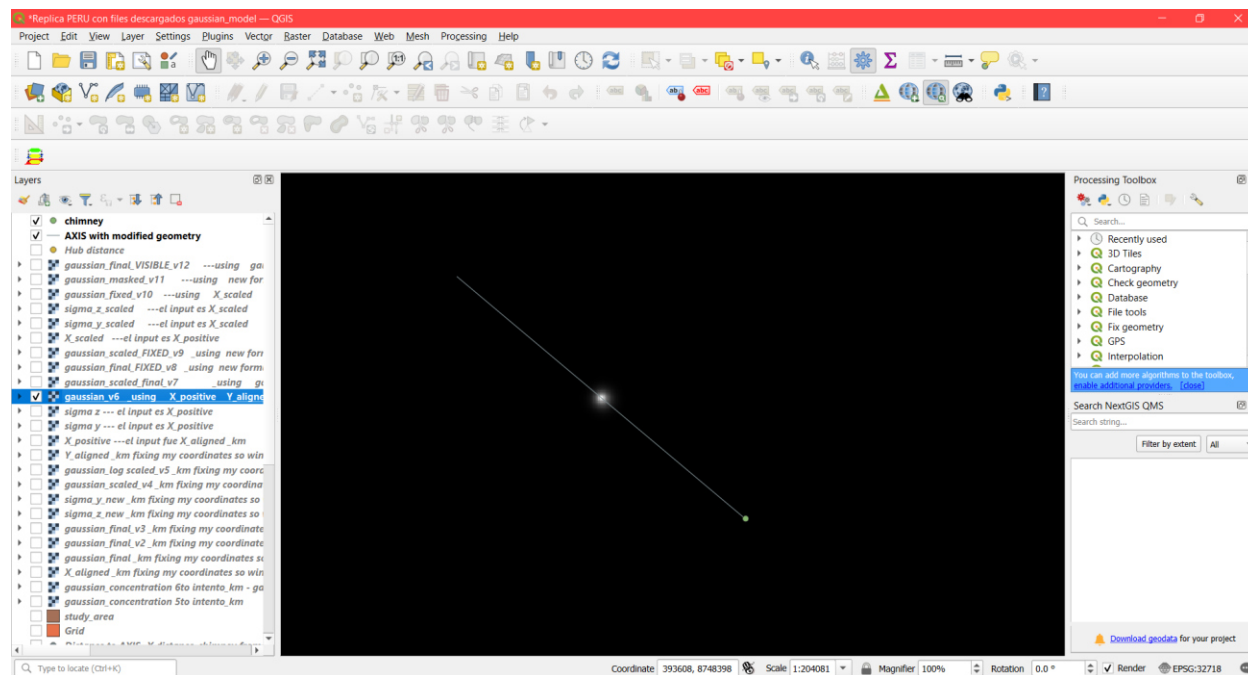
Concentración con el cambio (log scaled) para lograr la visualización apropiada de acuerdo a los “píxeles”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 92

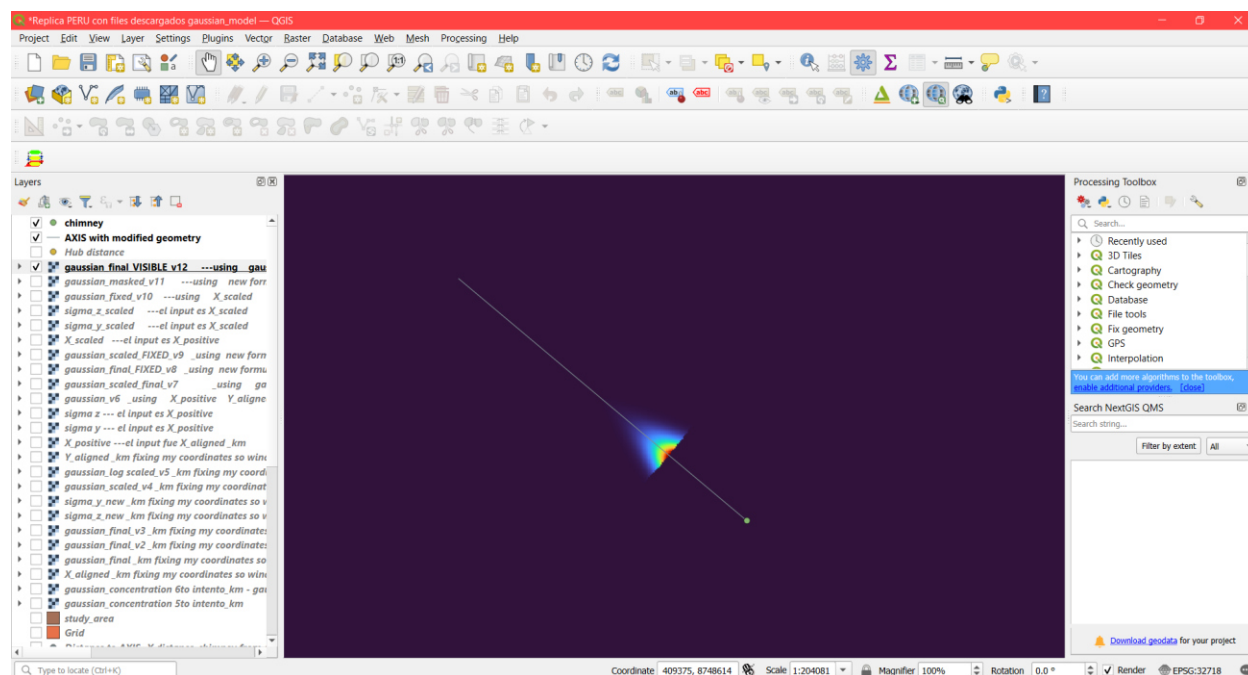
Concentración con el cambio (en X y Y) para lograr la visualización apropiada de acuerdo a los “píxeles”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 93

Paso 7 al 8: Modelo Gaussiano Final y Visualizar resultados a partir del “raster” (adición de rampa de colores). De acuerdo con los cambios realizados de metros a km, los “píxeles”, el posible cambio de rotación en el canvas de QGIS por parte de la autora del procedimiento para Perú, y en consideración a que el procedimiento alterno fue un poco diferente, los resultados no se visualizan exactamente al tutorial; pero muestran la dispersión



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

A considerar:

Se reconoció que modificaciones, cambios o actualizaciones en las capas fueron requeridas para la visualización de los resultados. Dentro del análisis realizado, se encontró que el tutorial obvia mucha información importante, entre estas: que probablemente las imágenes mostradas en la ejecución del procedimiento, puede que sean de pasos anteriores, antes de resolver el

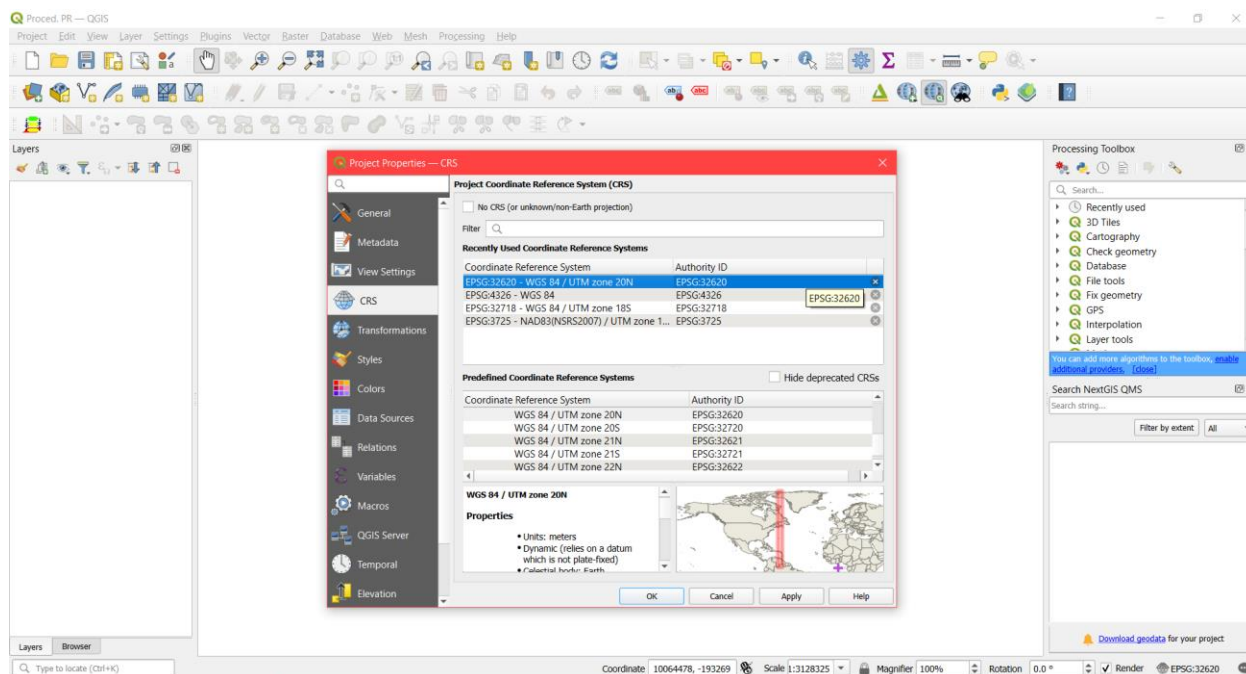
comportamiento radial de la dispersión; qué simplifica la fórmula gaussiana (o oculta las simplificaciones físicas realizadas); no explica el cambio de grados a metros en Sistema de Referencias de Coordenadas que debe realizarse antes de comenzar el modelo (porque sin este el modelo no se realiza, ya que las fórmulas gaussianas se trabajan en metros); no explica la rotación realizada (que se realiza siempre que sea necesario); asume que el terreno es plano (ya que la z utilizada no es igual a la de la fórmula); y que no tiene validación con data real. Por tanto, los datos reproducidos son totalmente cualitativos, lo que resulta en una modelación de baja precisión, o para fines demostrativos, hasta que se compare con data real. Se encontró que el tutorial obvia la física en X , que se debe incluir, porque los resultados que se presentan en el mismo, no se pudieron haber realizado sin la información de X , incluida en la fórmula. Lo que conlleva a que, la investigación que se está realizando sea matemáticamente válida, pero físicamente incompleta. Sin embargo, si se corrige para que X y Y incluyan los sistemas de coordenadas, entonces el penacho si comenzaría en el “source point”. Se observó que, dentro de la fórmula gaussiana, se utiliza para definir como componentes geométricos a X (“downwind”) y a Y (“crosswind”), por tanto, deben corregirse en conjunto, para que la definición del espacio del modelo se corrija primero (estos componentes determinan el comportamiento del penacho). No obstante, se debe aclarar que, para los fundamentos de la modelación gaussiana, y para artículos científicos generales en el tema, el obviar esta información es completamente normal, ya que, los expertos entre sí, entienden que es información, la cual se asume que se conozca. Sin embargo, ya logrado una modelación similar, a partir de este punto se procedió con el procedimiento de Puerto Rico.

7.8. Procedimiento de la Aplicación de QGIS en PR.

Se considerarán datos en base a Perú para el comienzo, ya que la dirección del viento de PR va de 270° a 310° aproximadamente, lo que es similar al valor de Perú. Para los demás datos en la fórmula gaussiana, se cambiarán a los datos reales de Puerto Rico, una vez la base del proyecto de QGIS para la dispersión este realizada. A continuación, se muestran los pasos para el procedimiento como se explicó anteriormente, pero para el Vertedero Proteco de Peñuelas, Puerto Rico.

Figura 94

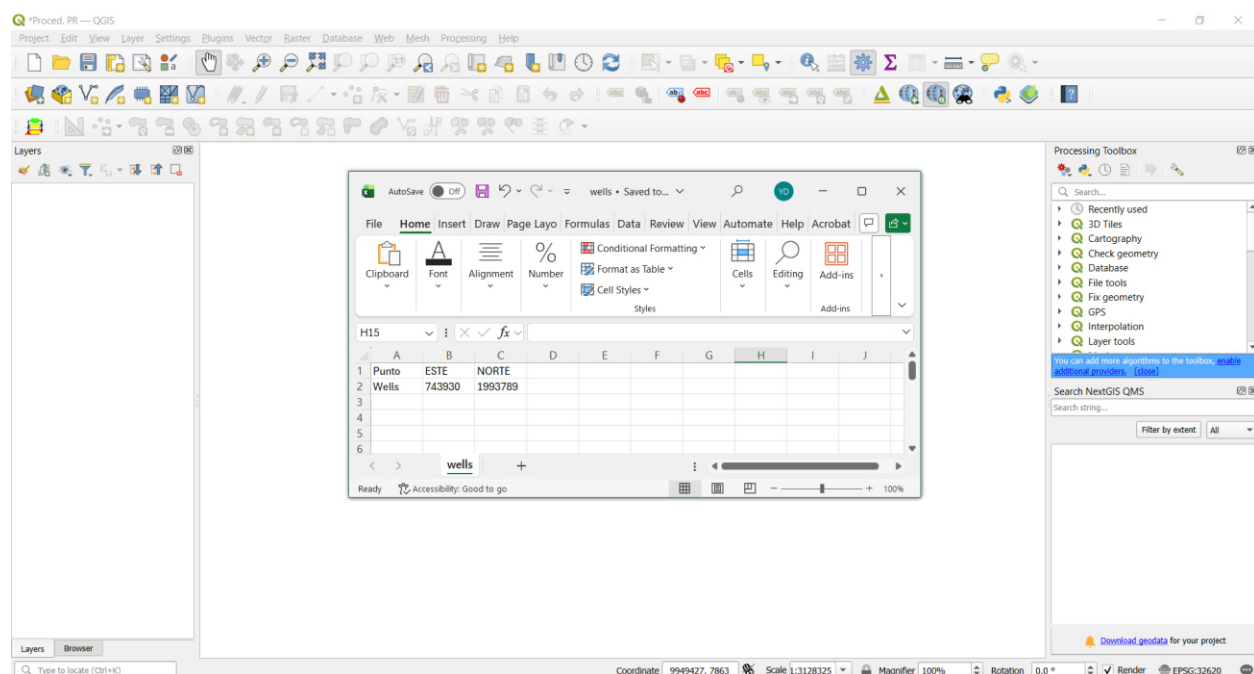
Paso 0. Añadir el CRS para PR y guardar proyecto



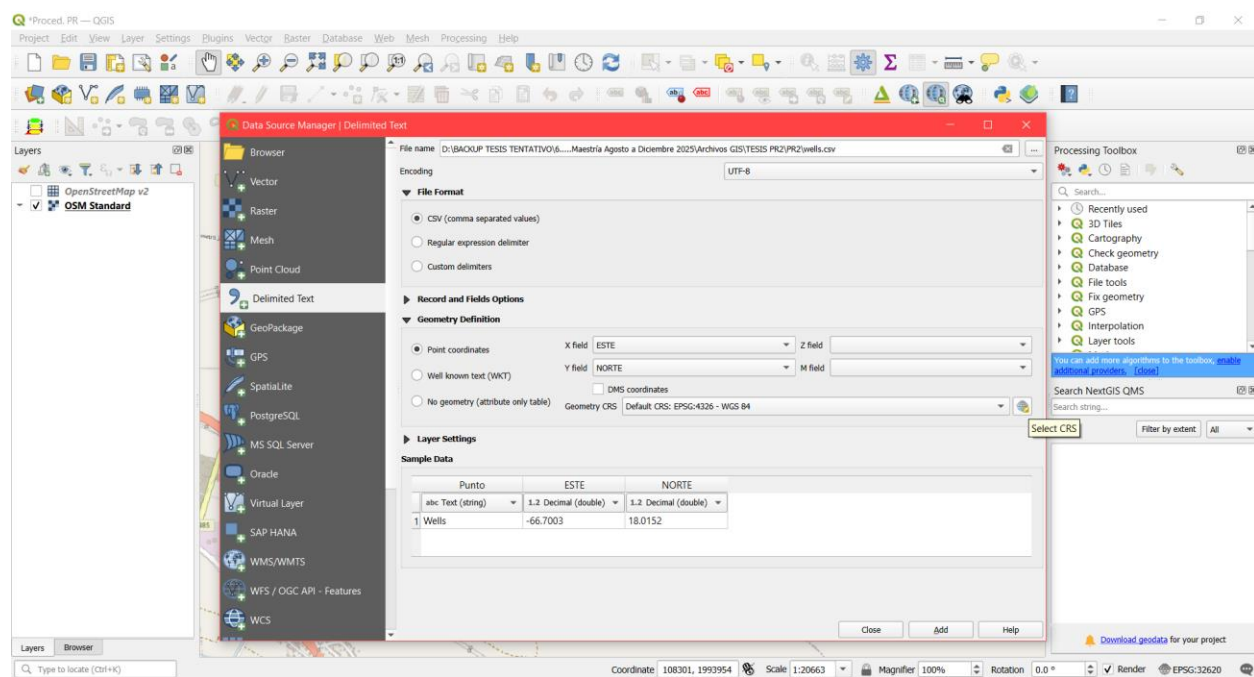
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 95

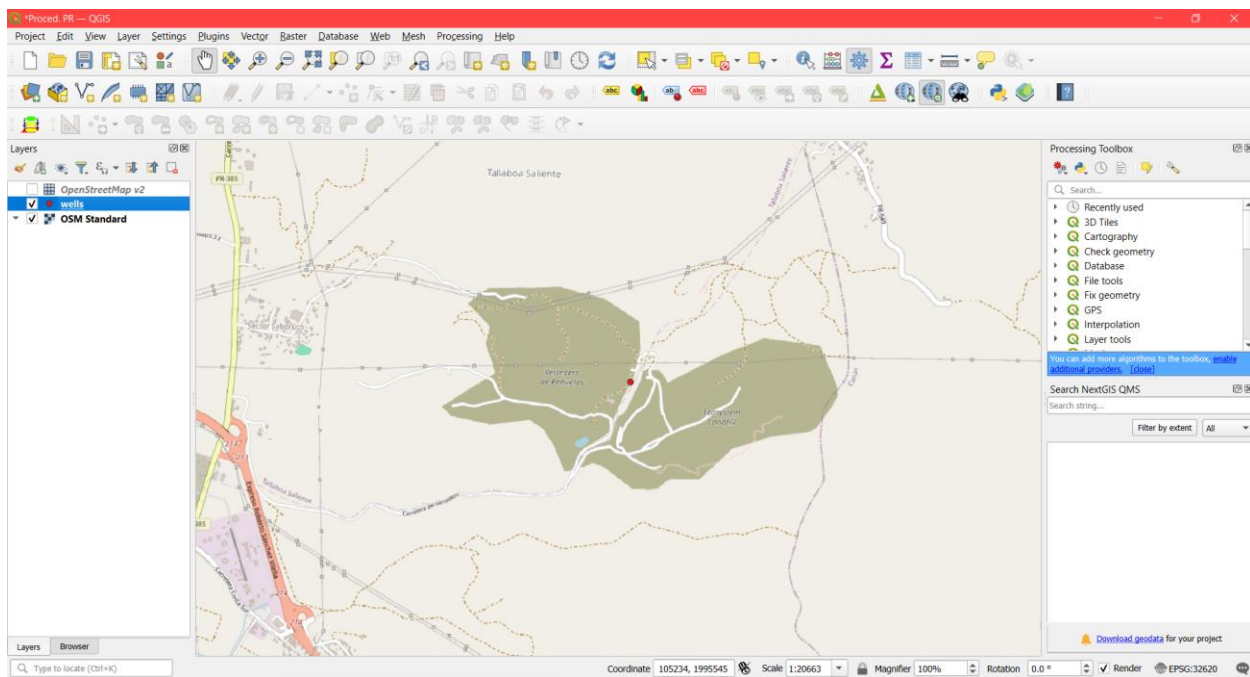
Paso 1. Cargar el punto de los pozos. Se procedió a añadir el CSV, y se verifico que las coordenadas estuvieran en decimales. Para esto se utilizó el EPSG:4326 (WGS84) primero. Para luego hacer la conversión de las coordenadas de decimales a metros (UTM). Ya que es necesario un sistema de coordenadas que no sea geométrico. El Sistema de coordenadas utilizado, fue EPSG: 32620 – WGS84 / UTM Zone 20N.



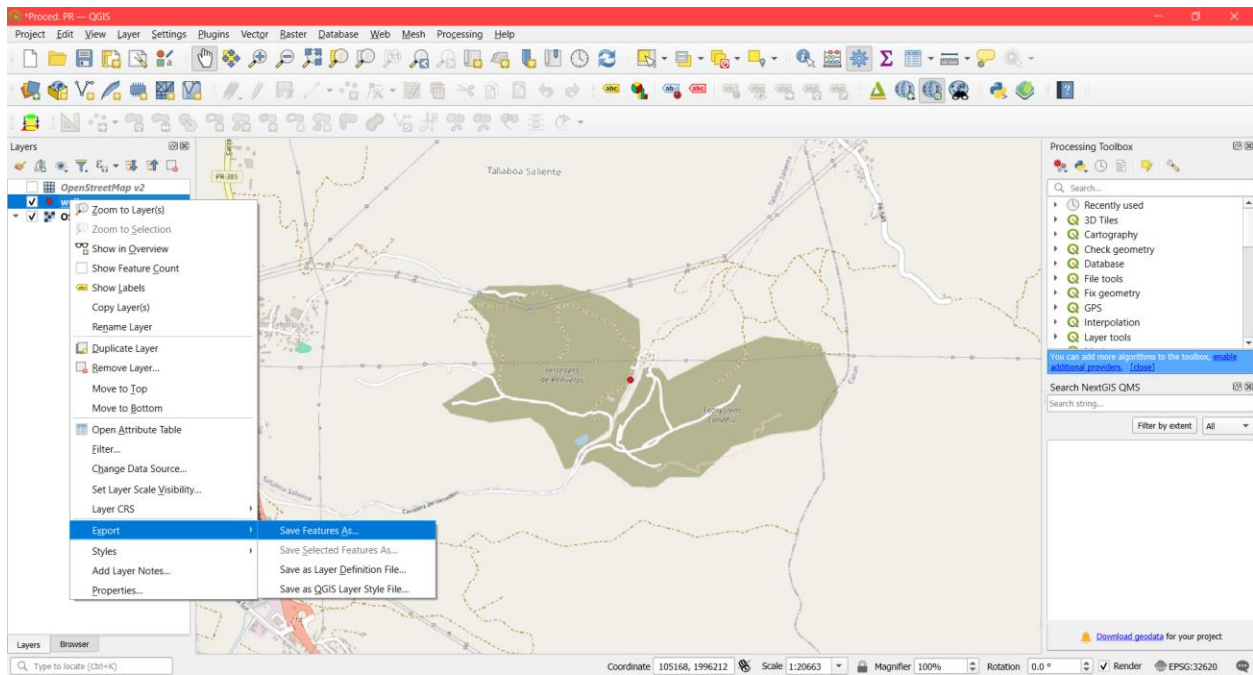
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 96*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 97*Continuación del Proceso*

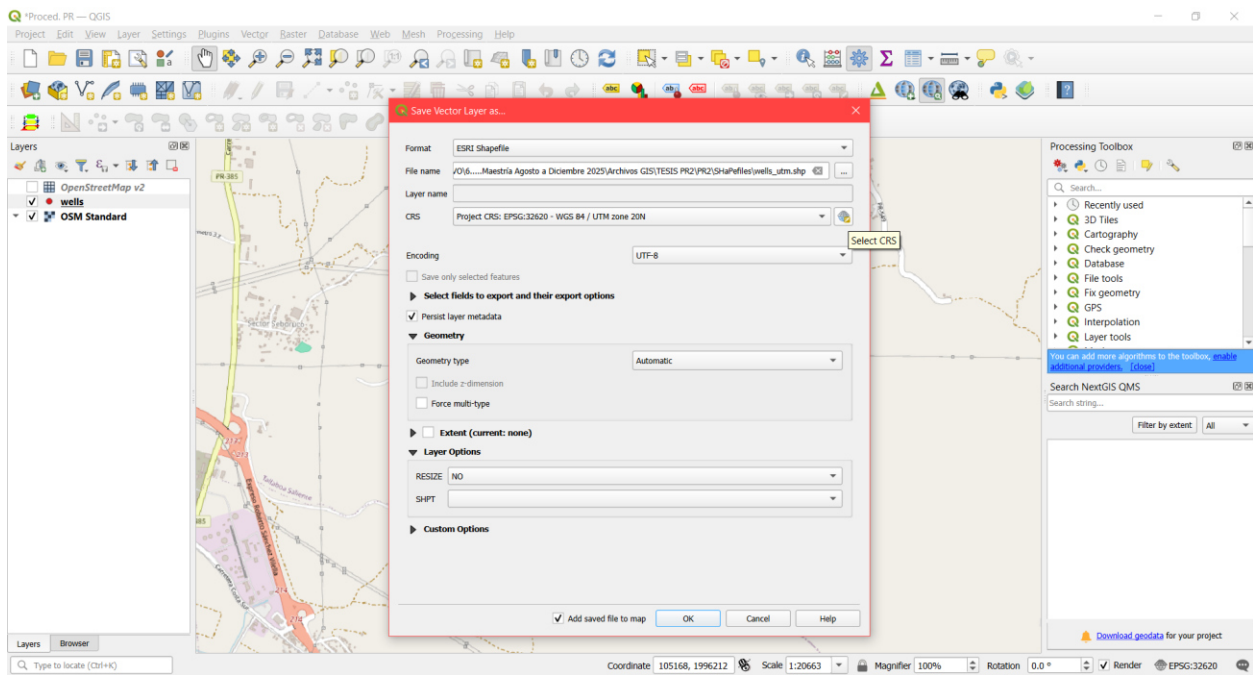
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 98*Continuación del Proceso*

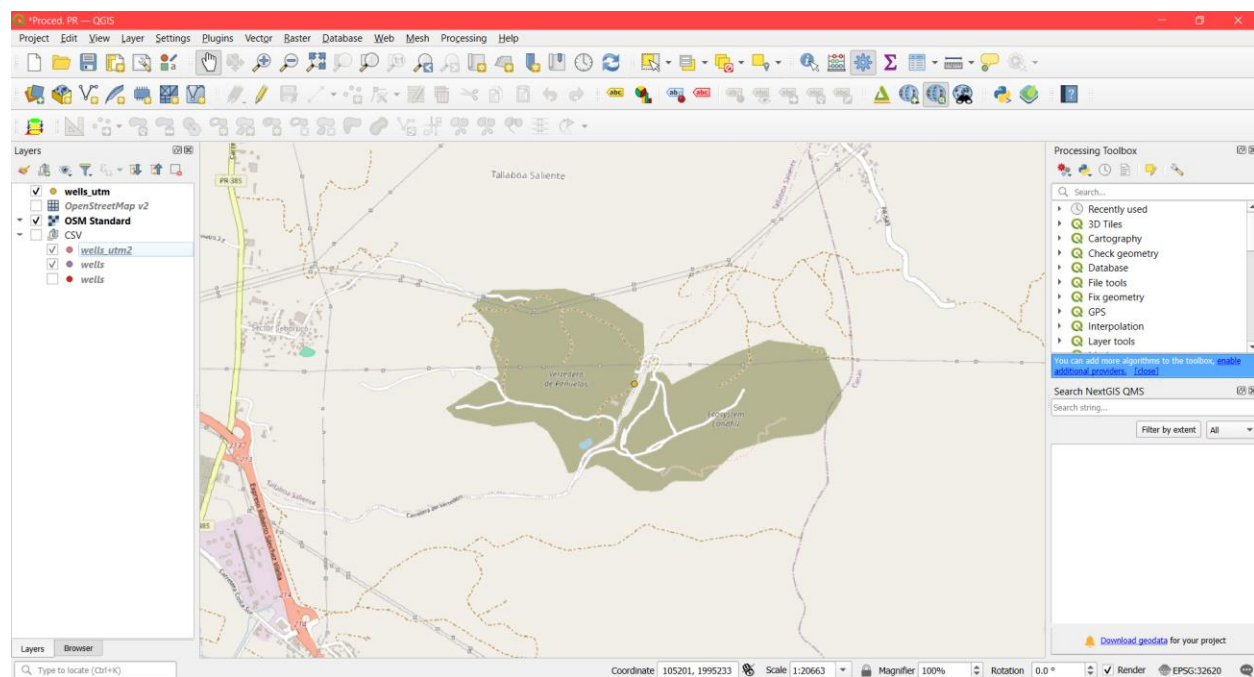
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 99

Continuación del Proceso



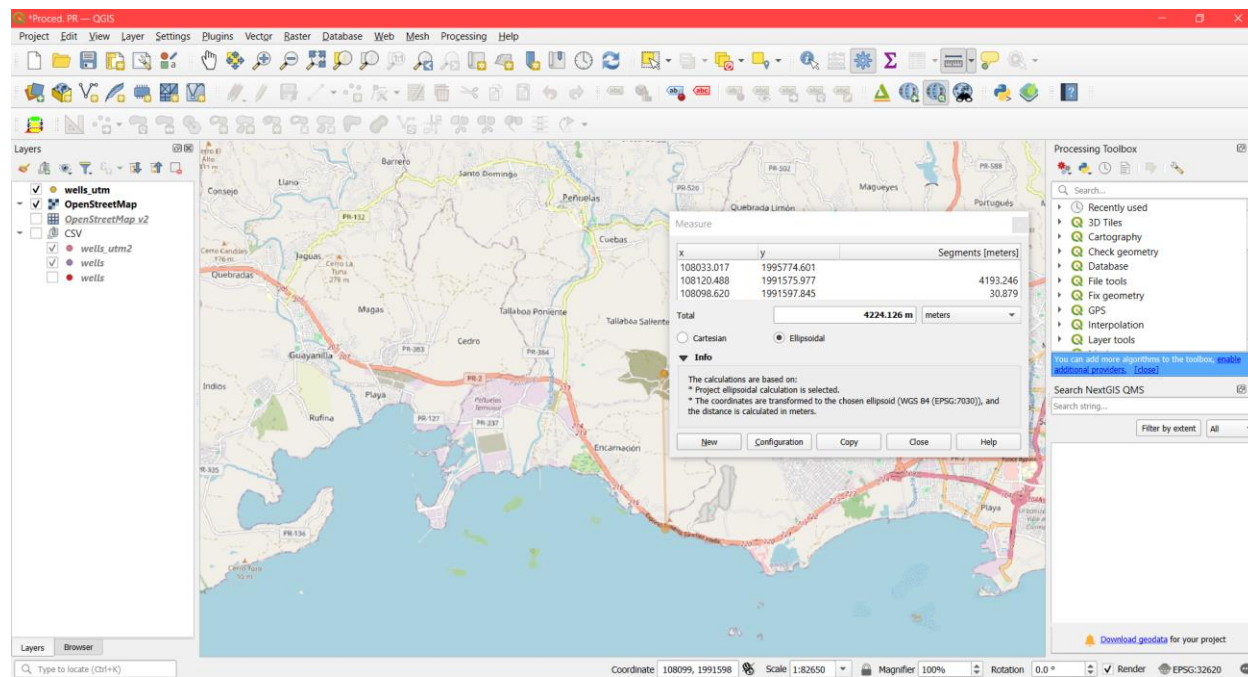
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 100*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 101

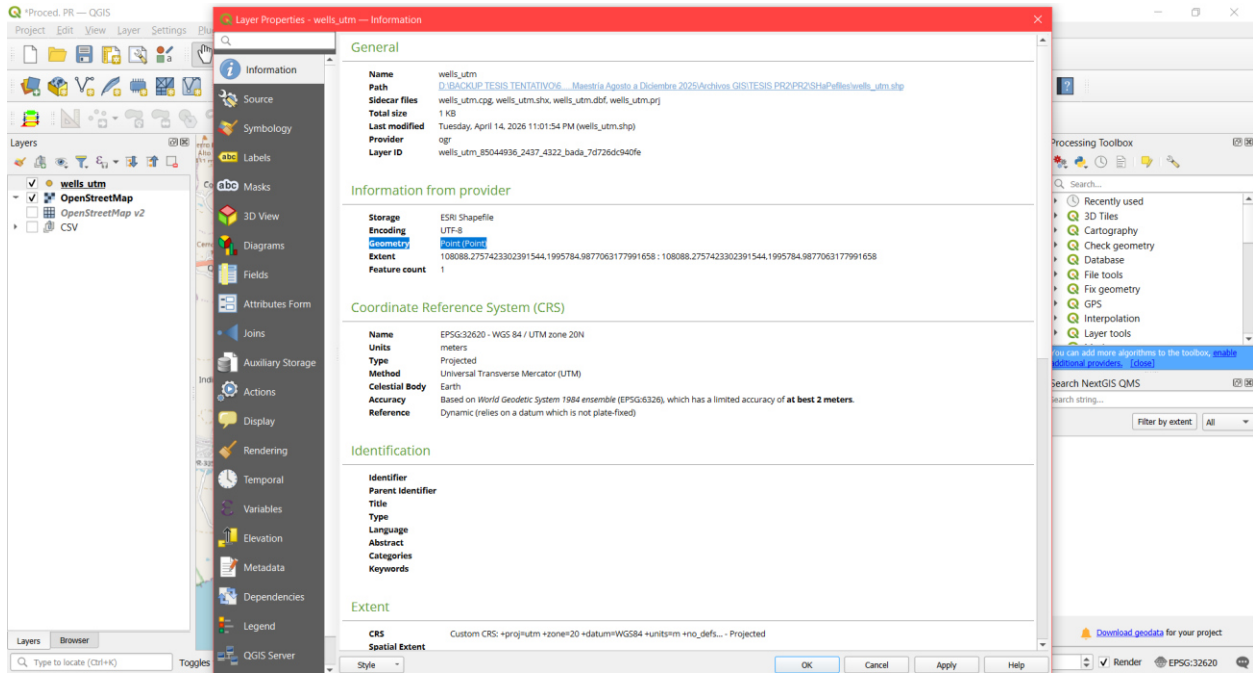
Validación final. Comprobación de que el CRS este en metros para proseguir (ya que, si no está en metros, se daña el trabajo, porque la fórmula gaussiana se trabaja en metros)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 102

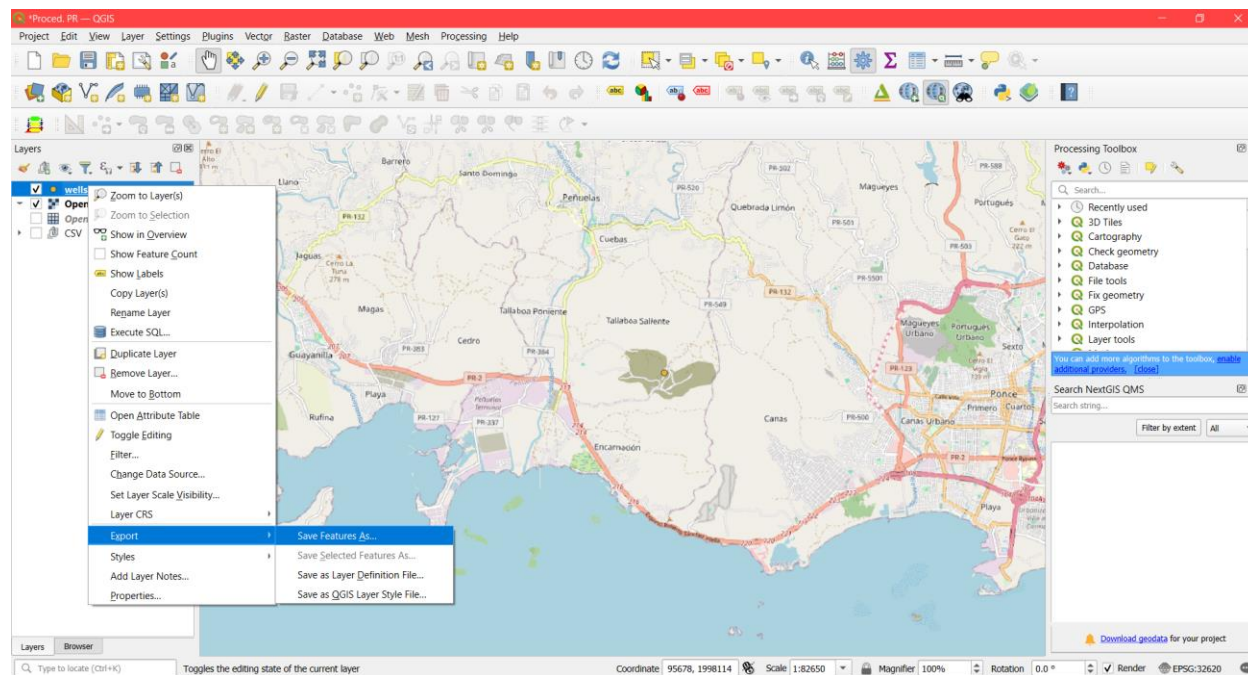
Paso 2. Crear un punto representativo para todos los pozos “source point”. Se verificó que en efecto la geometría sea de punto.



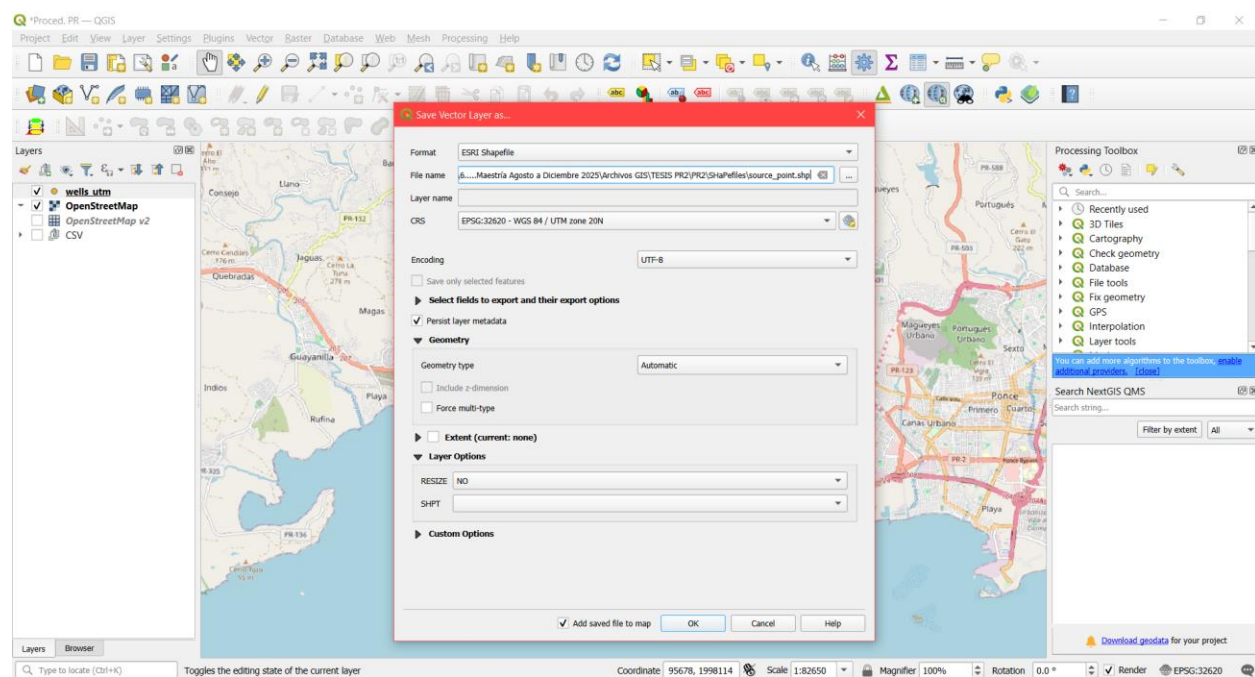
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 103

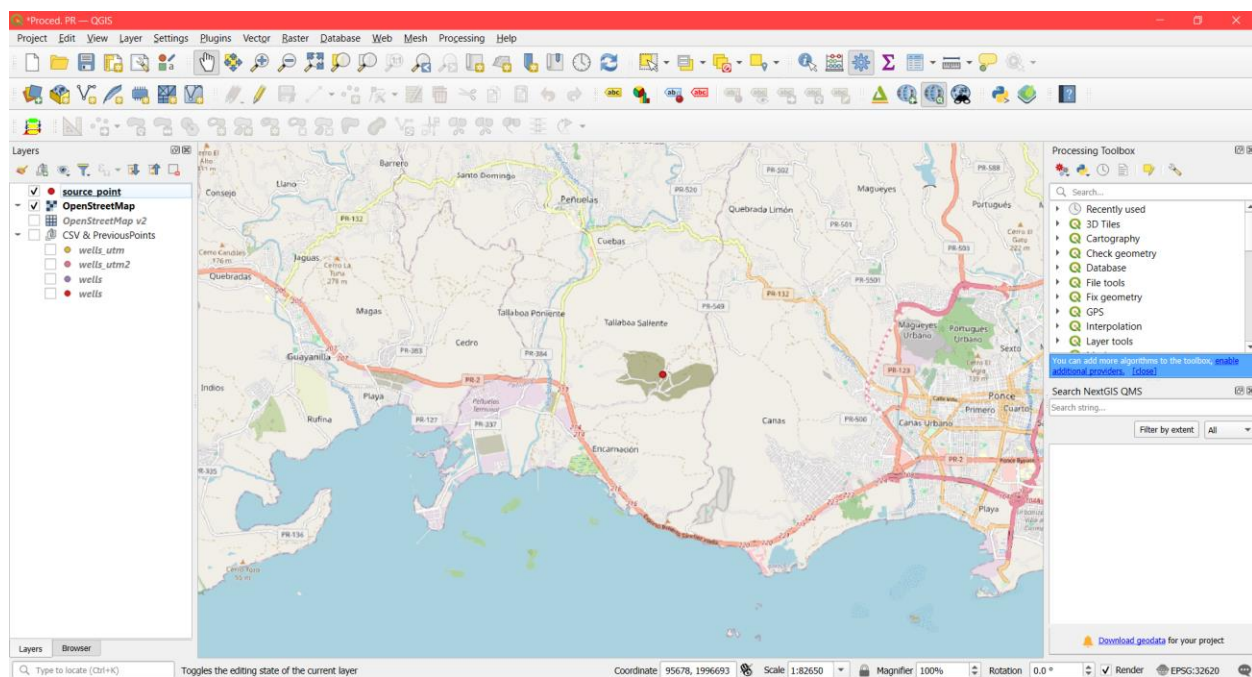
Se procedió a guardar el punto de localización de “Wells” como “source point”, ya verificado lo anterior



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026). Explicación: esta sería la localización de la fuente (o origen de la emisión, que el equivalente de la chimenea en el tutorial, pero en este caso es el punto representativo para los pozos), de donde saldrá el Q (tasa de emisión).

Figura 104*Continuación del Proceso*

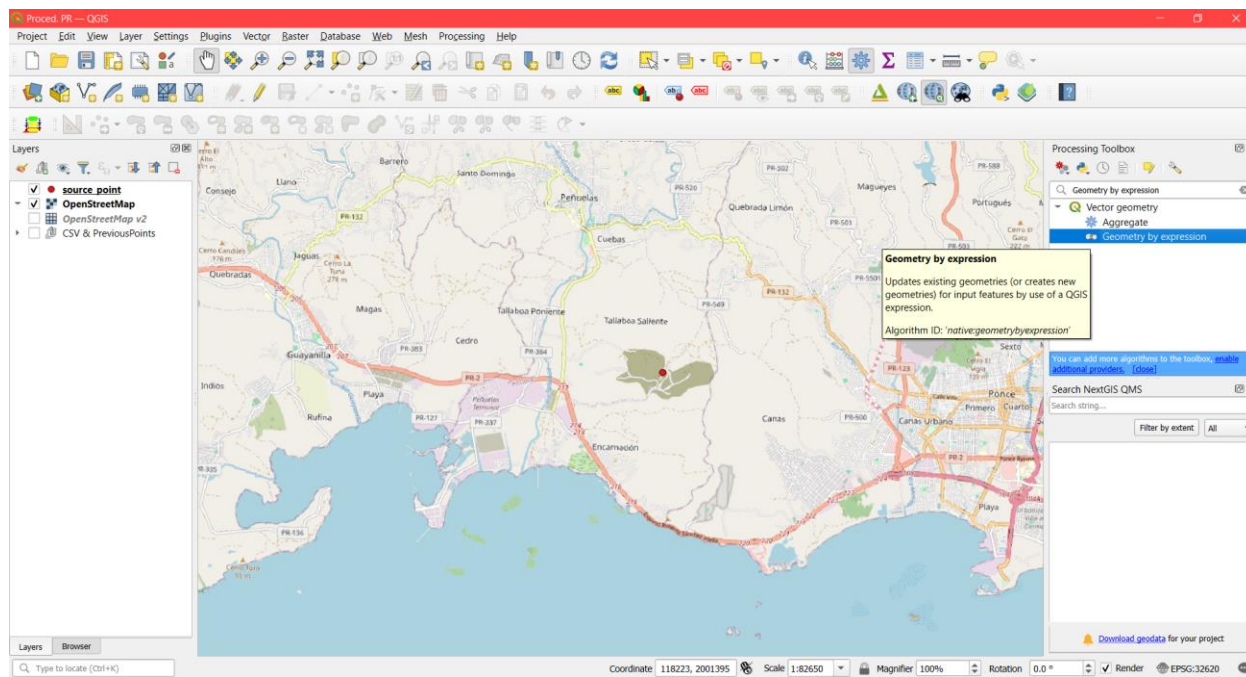
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 105*Continuación del Proceso*

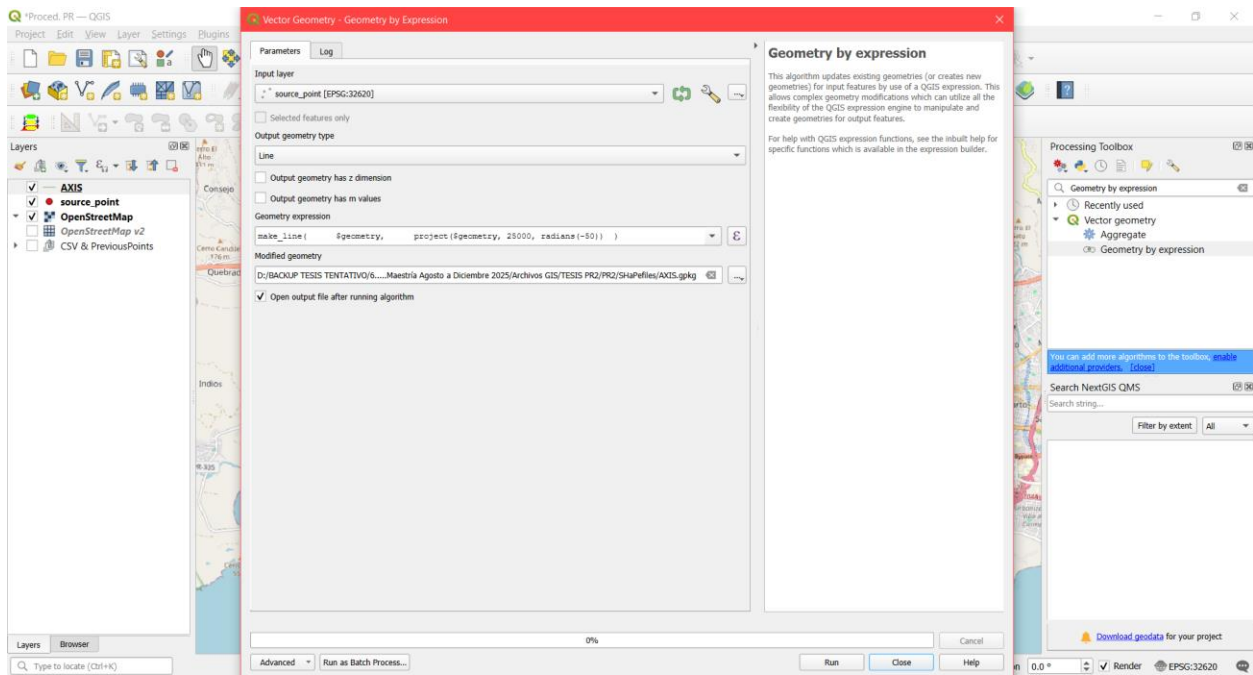
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 106

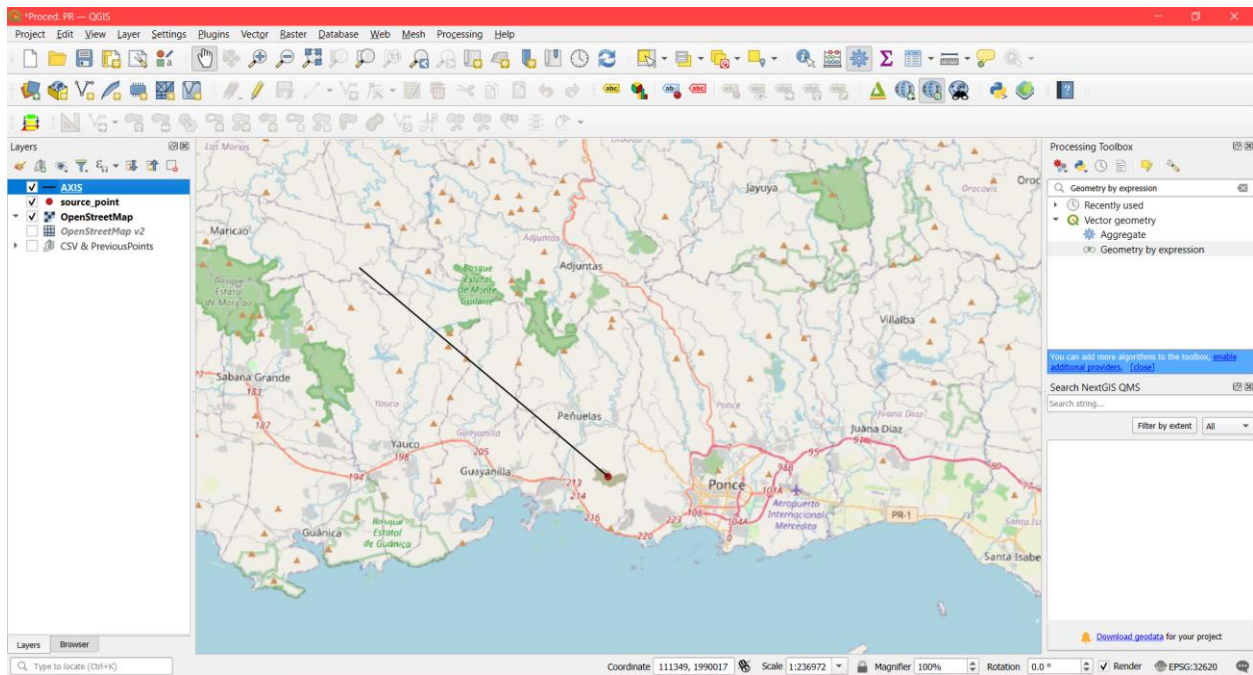
Paso 3. Crear el “AXIS” (dirección del viento).



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 107*Continuación del Proceso*

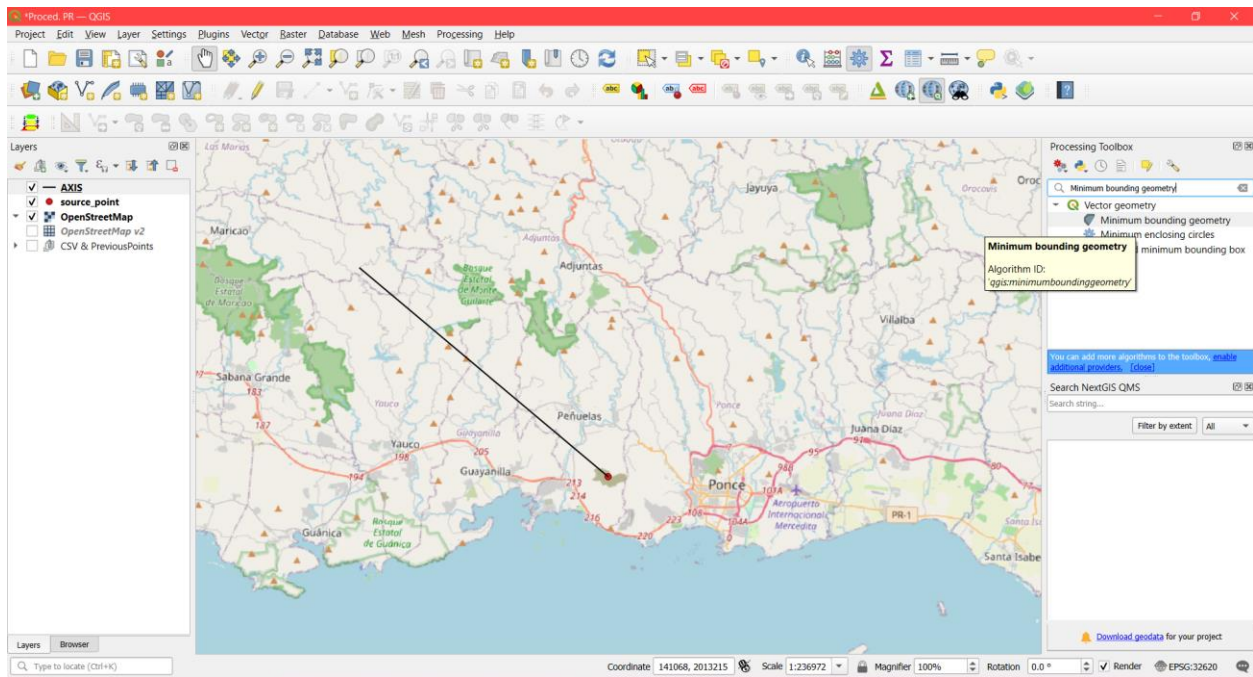
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 108*Continuación del Proceso*

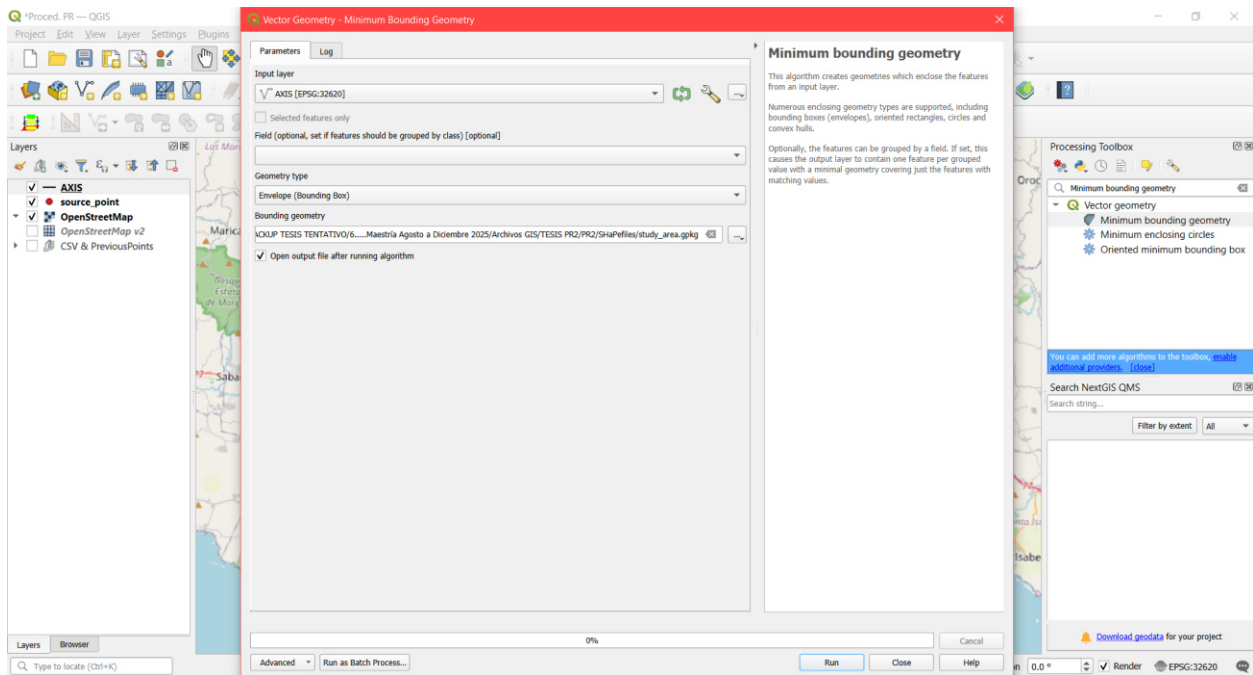
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 109

Paso 4. Crear el Area de Estudio.



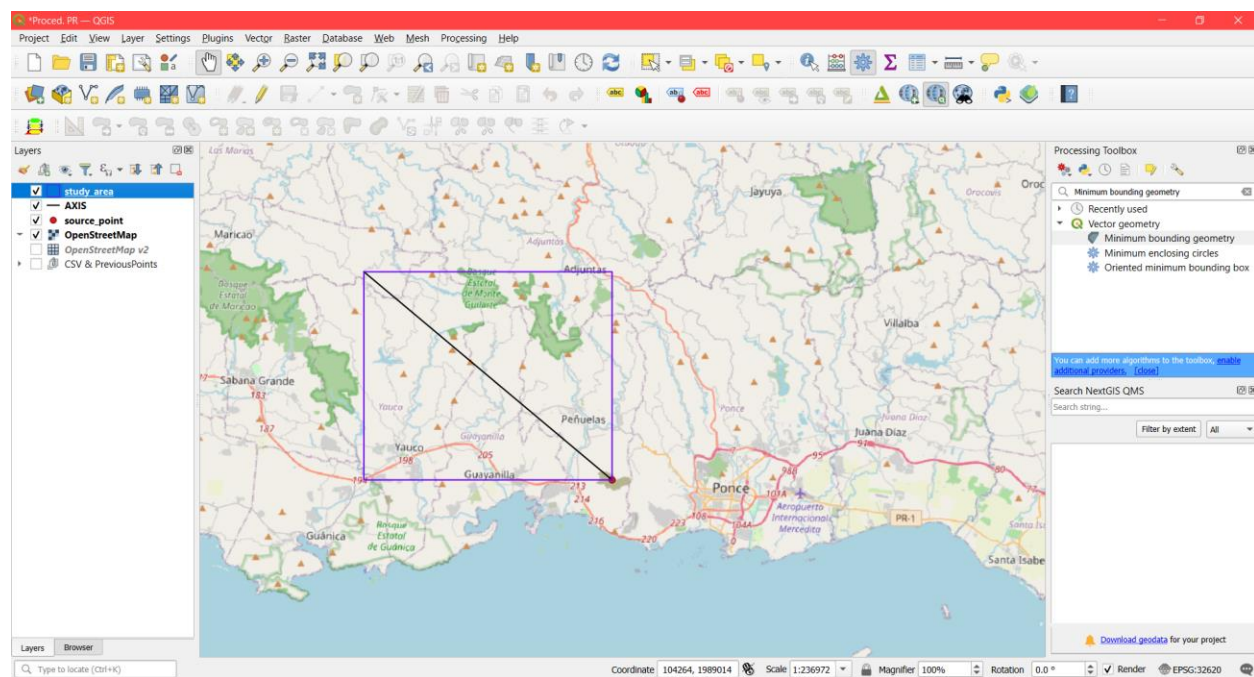
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 110*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 111

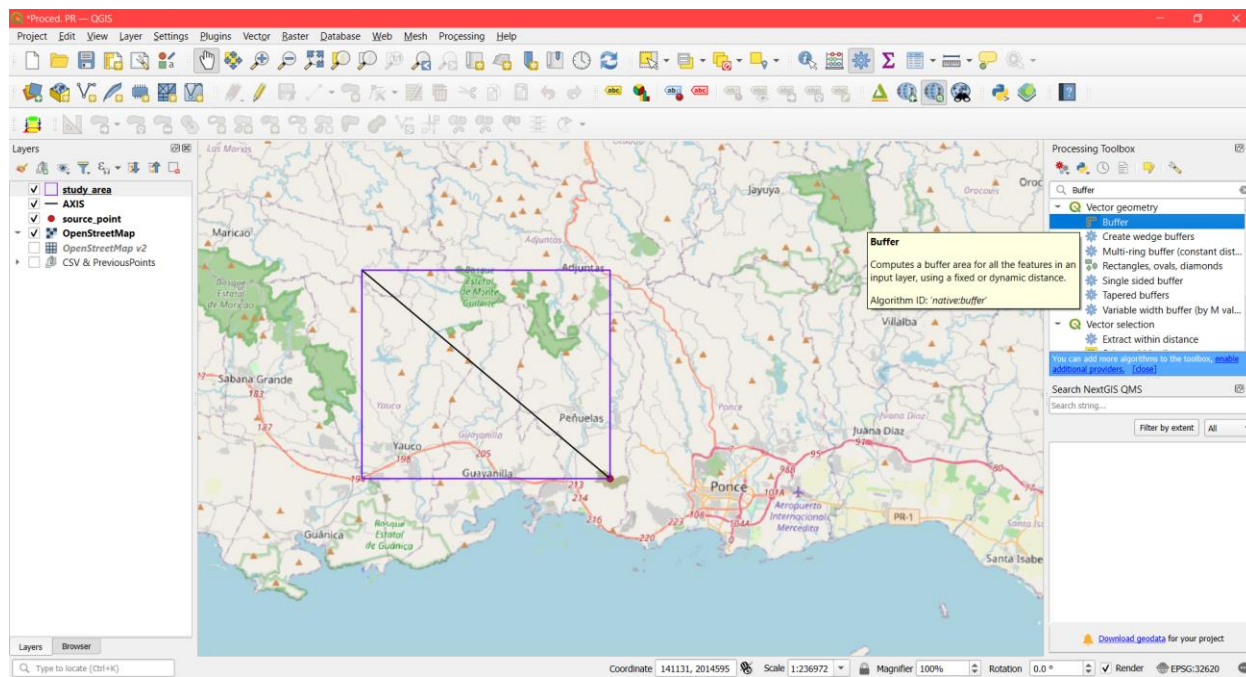
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

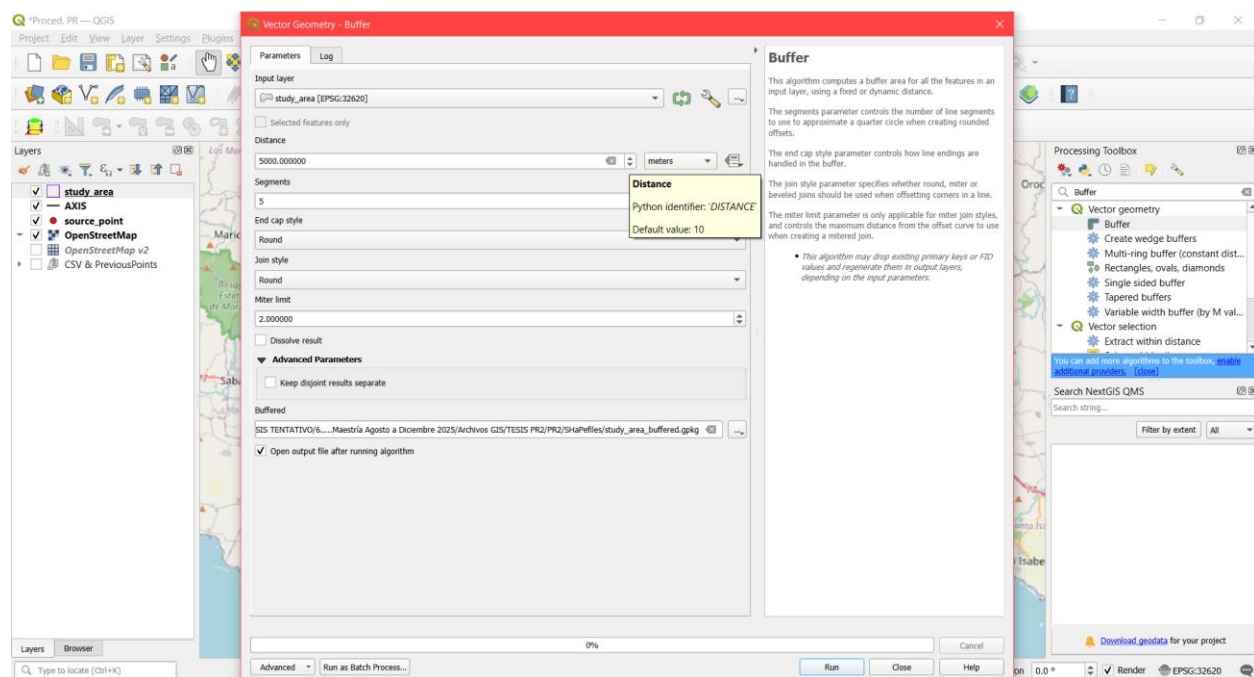
Figura 112

Para expandir el área de estudio (se utilizó la herramienta de QGIS llamada “buffer”) y brindar más espacio al modelo se añade una distancia de 5000 metros (5km de espacio extra)



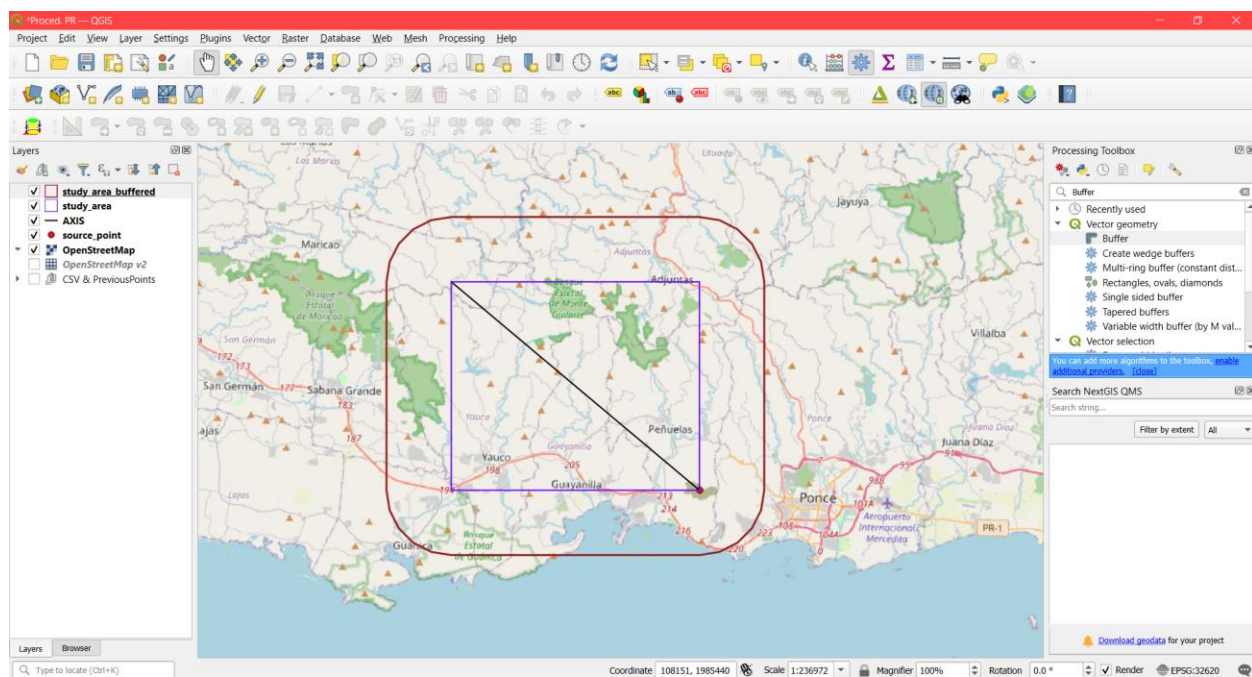
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 113

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

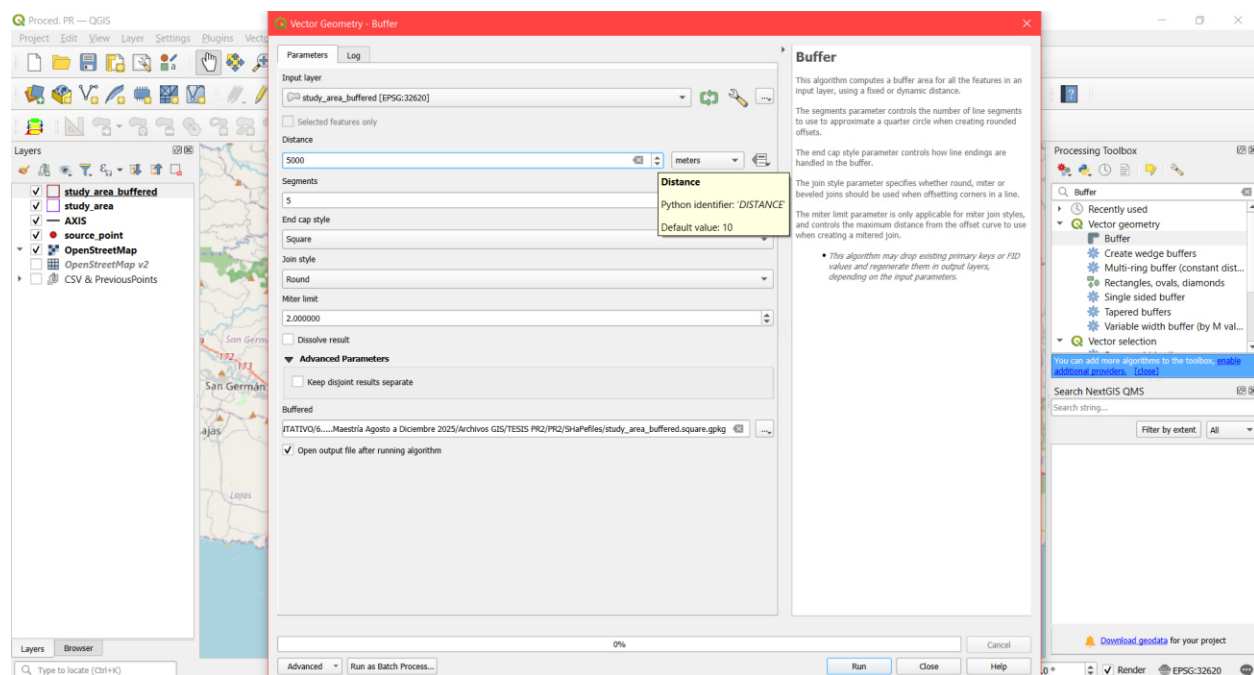
Figura 114

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

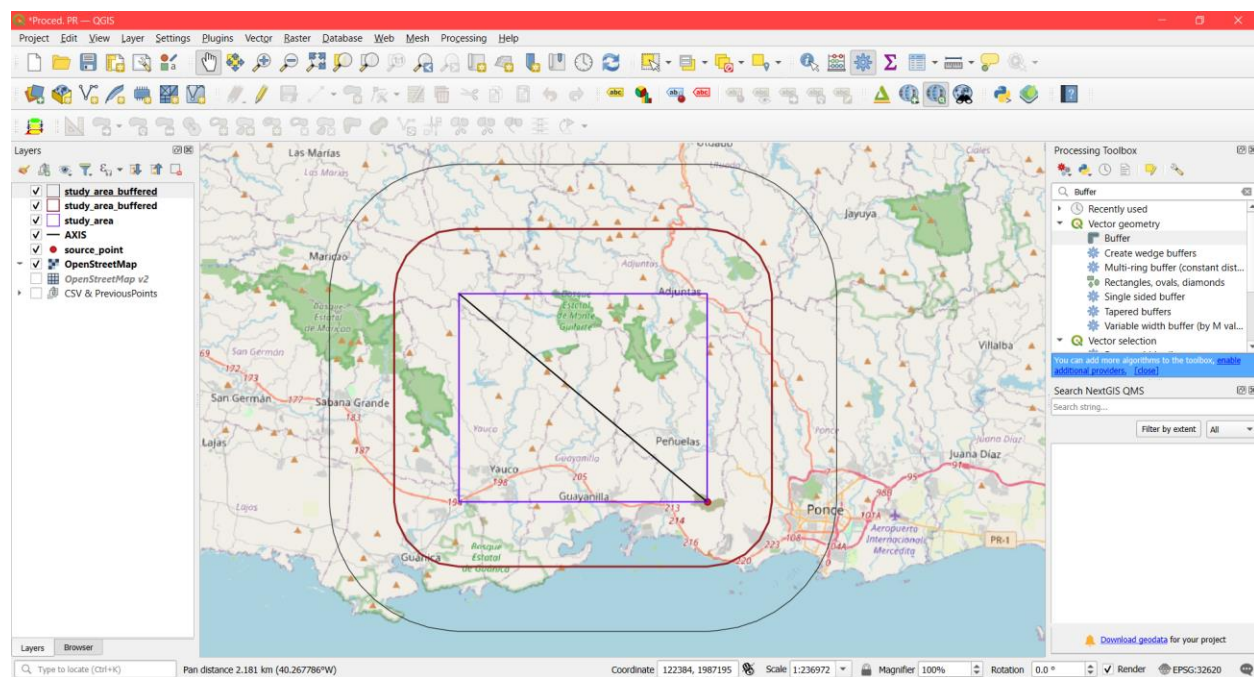
Figura 115

Practica para creación de “buffers” adicionales (no era necesario pero se realizo)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

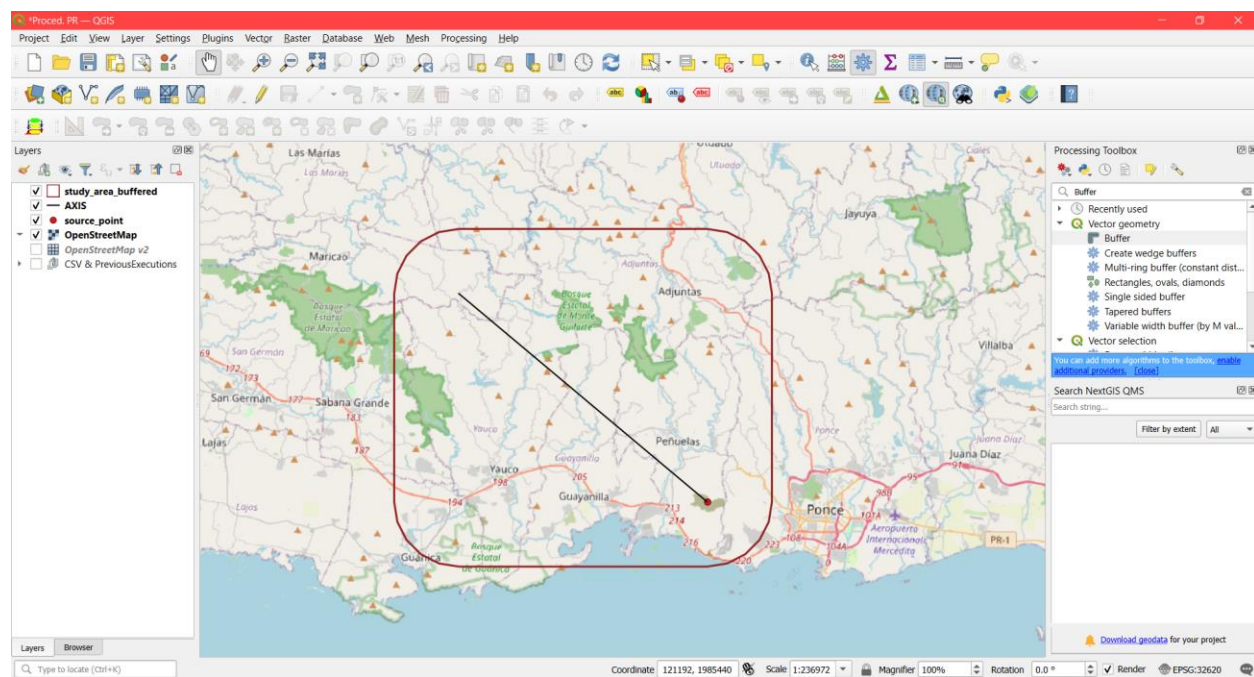
Figura 116

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 117

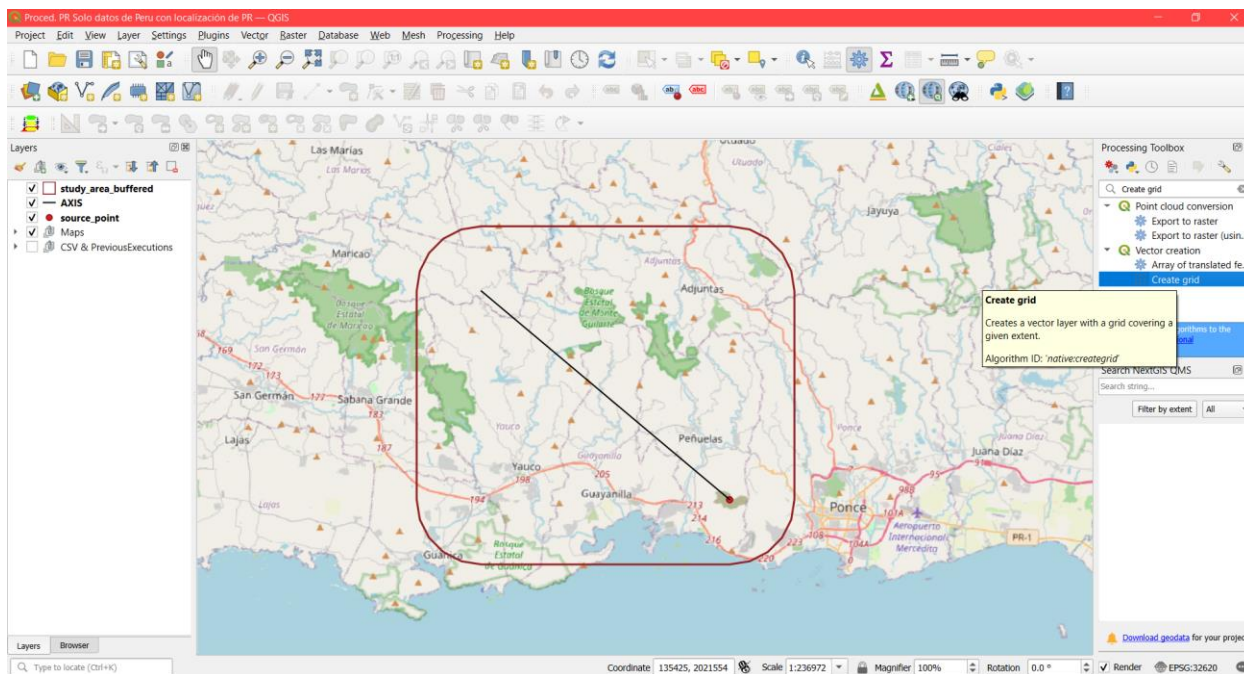
Conservamos visible el “buffer” inicial



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 118

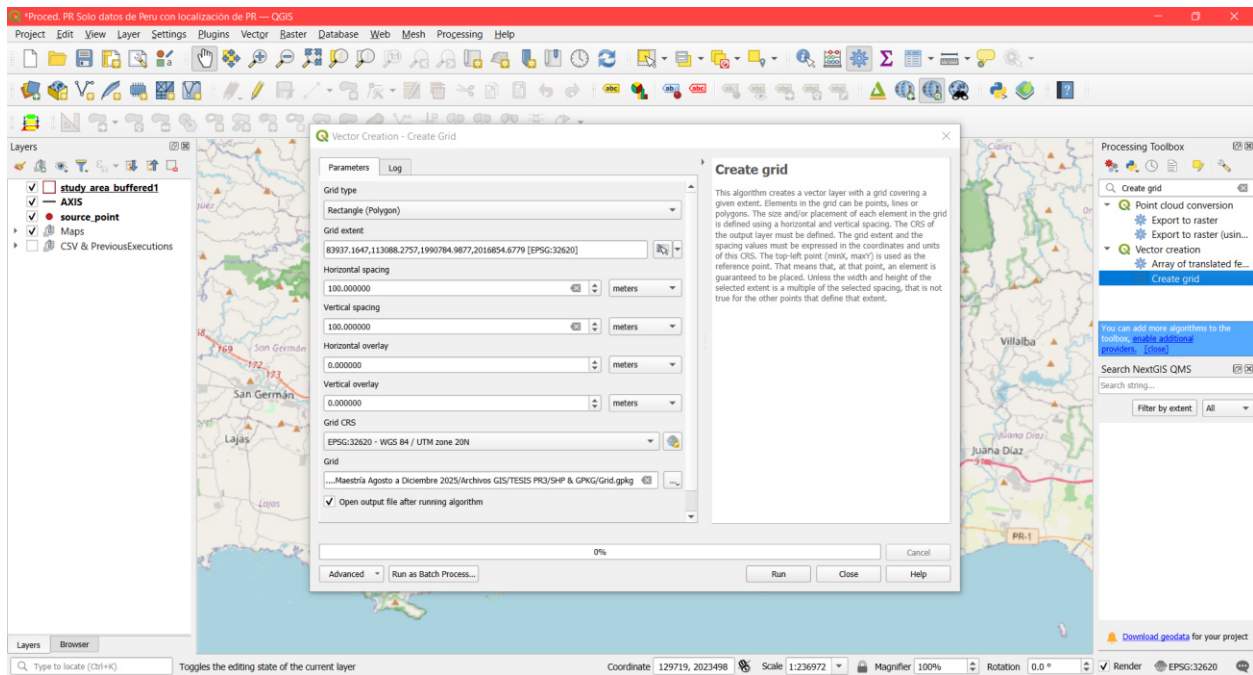
Paso 5. Crear el “grid” (se retomó uno de los proyectos anteriores, desde este paso, ya que el anterior se había dañado, esto comprueba la importancia de tener varias copias del proyecto de QGIS por pasos, para si el mismo, resulta en errores o deja de funcionar, se pueda retomar el mismo desde el paso, que se ejecutó de manera exitosa).



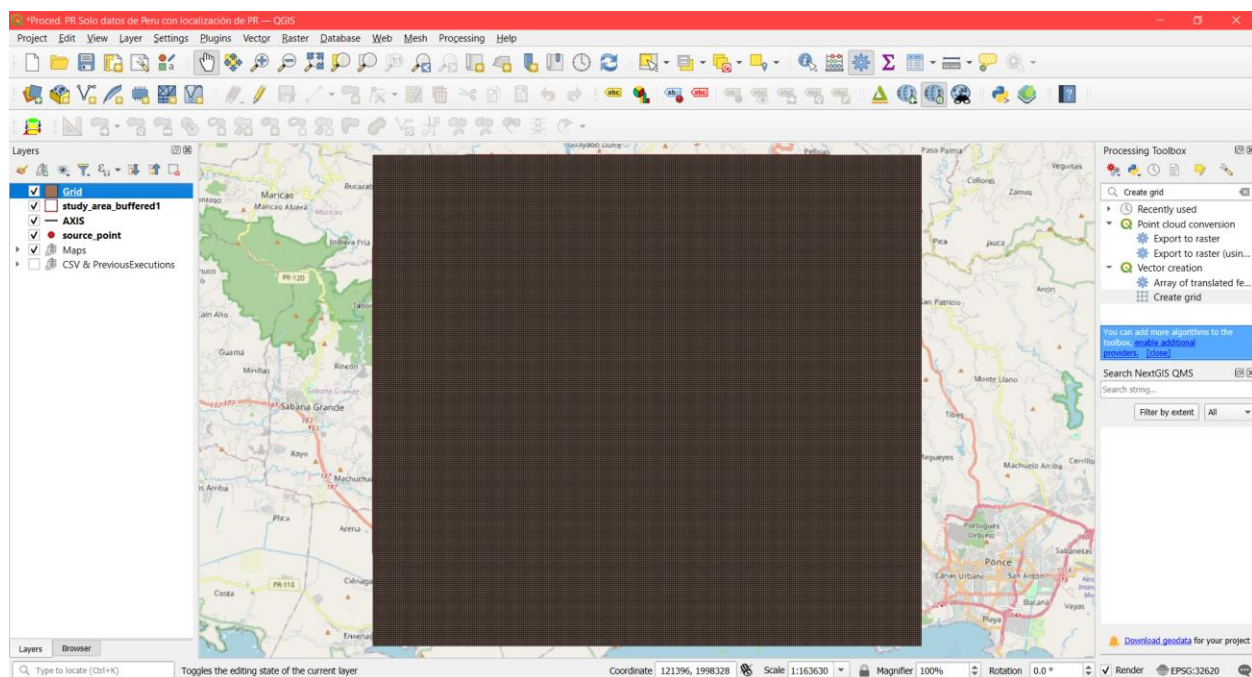
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 119

En “extent” → seleccionó “study_area_buffered1”



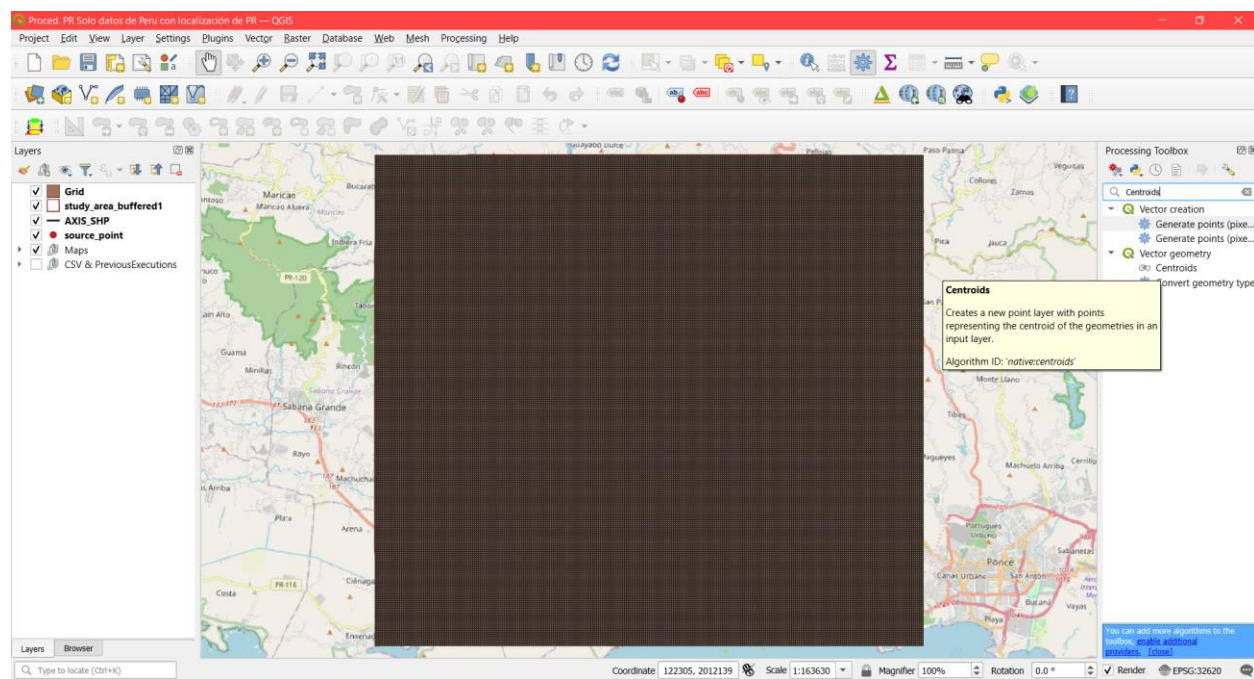
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 120*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

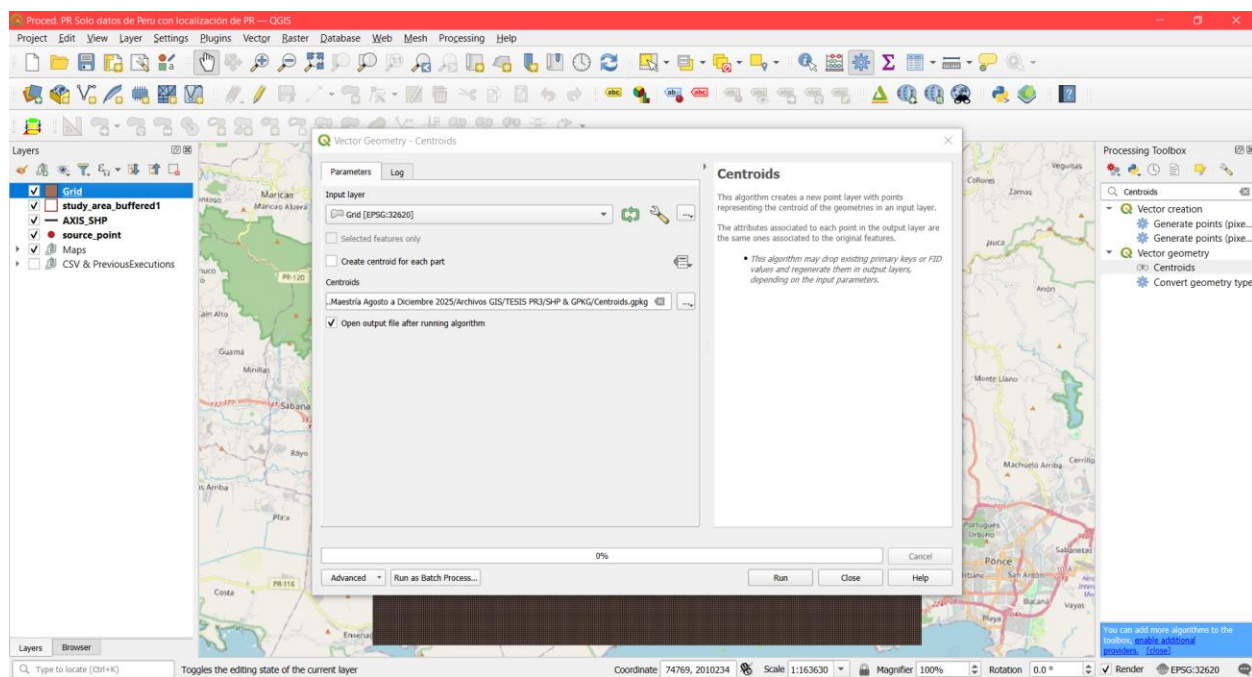
Figura 121

Paso 6. Crear los centroides (aquí convertimos cada celda de la red, en un punto)

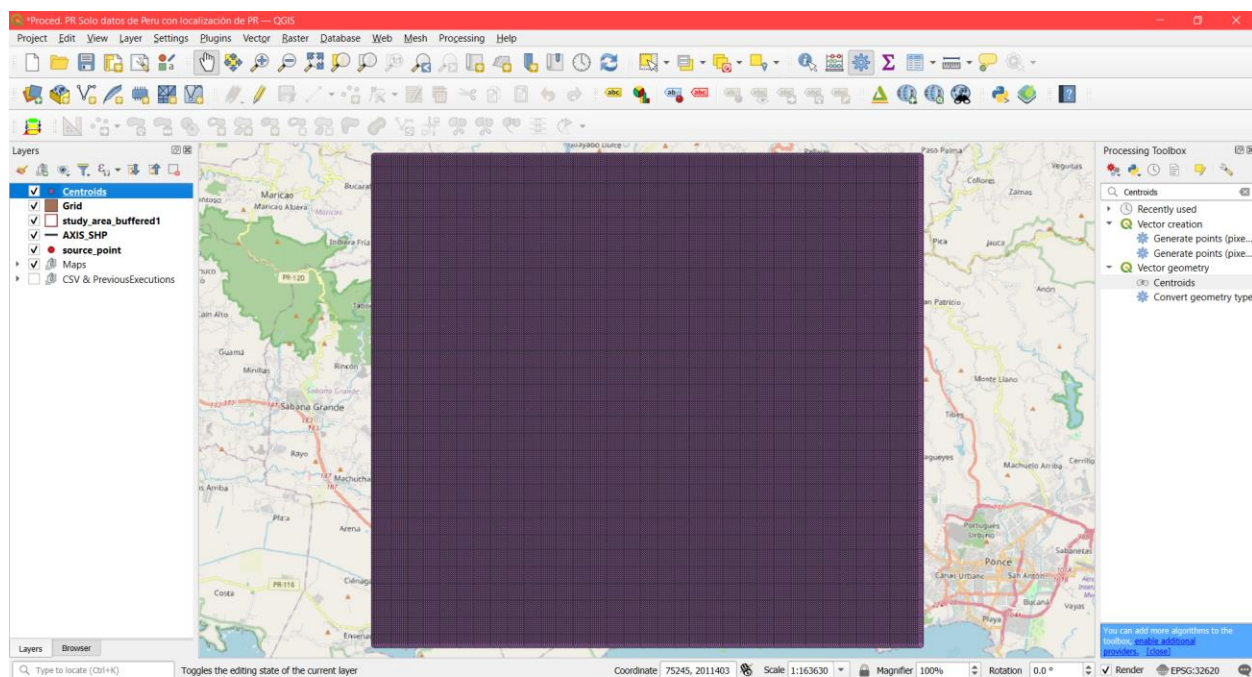


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 122

Continuación del Proceso

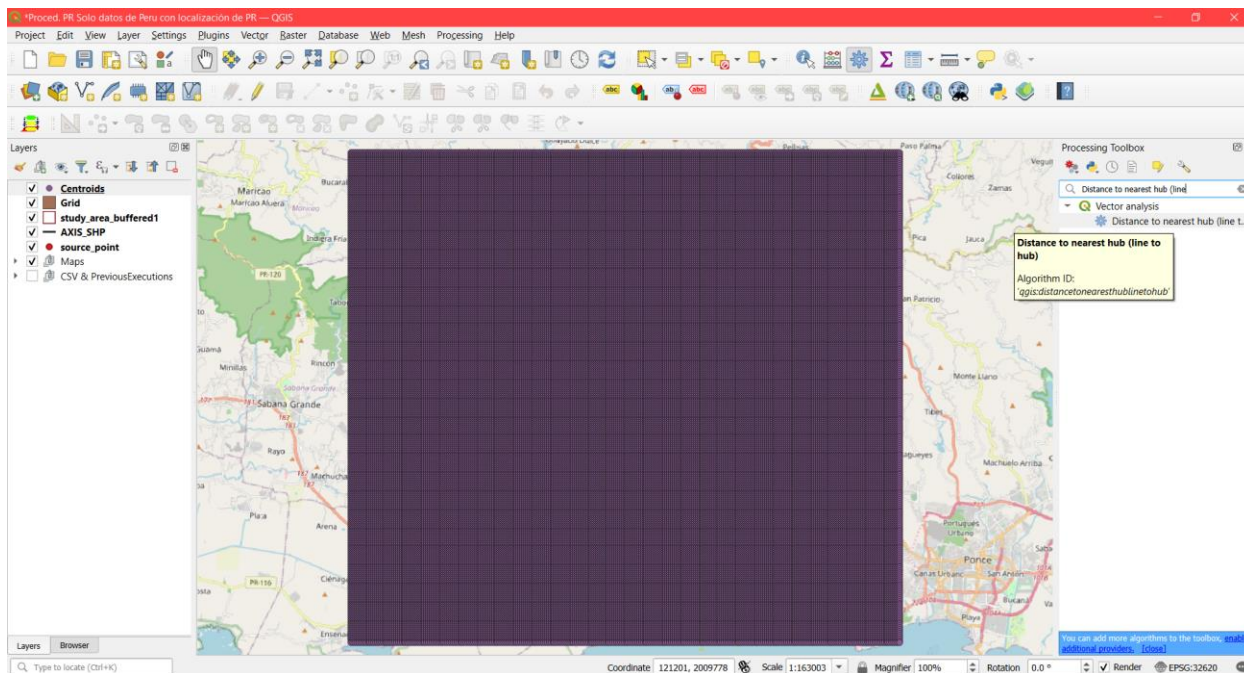
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 123*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 124

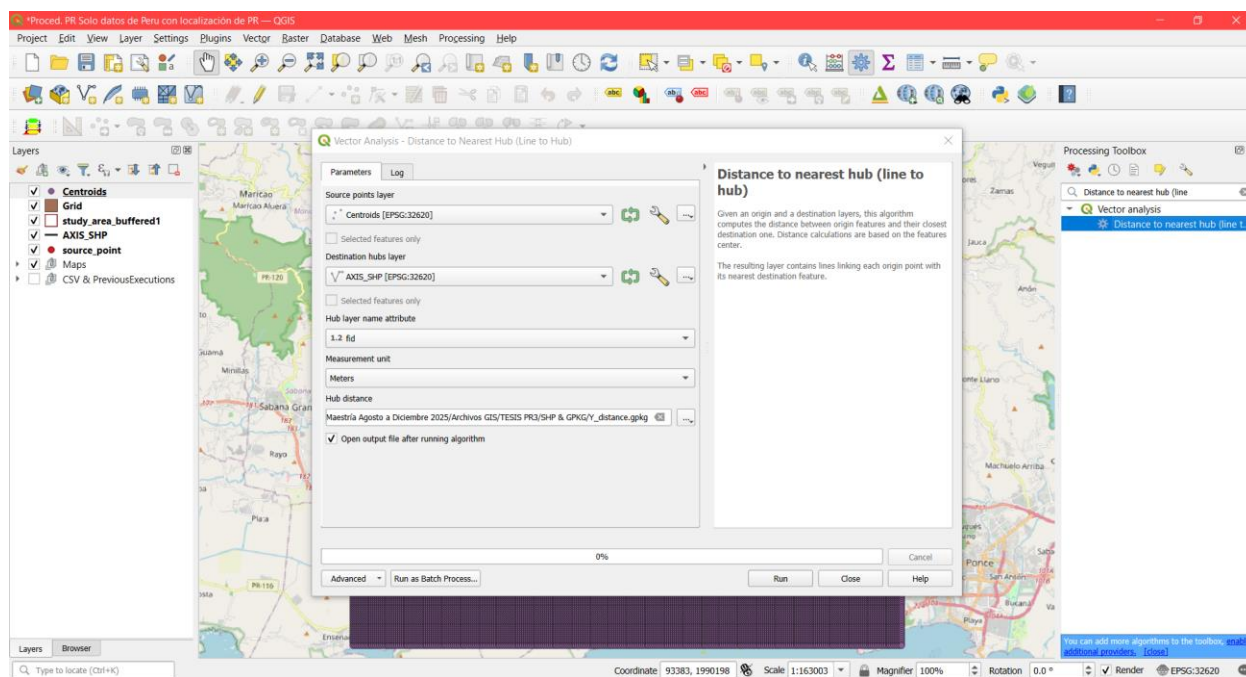
Paso 7. Crear las distancias (Y y X). Aquí cambia todo en cuanto a que se presente, un penacho no radial y atmosféricamente real. No se utiliza “Distance to Nearest Hub (Points)”, se utiliza “Distance to Nearest Hub (line)”. Primero se creó la distancia en Y (correctamente). Parte 1.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 125

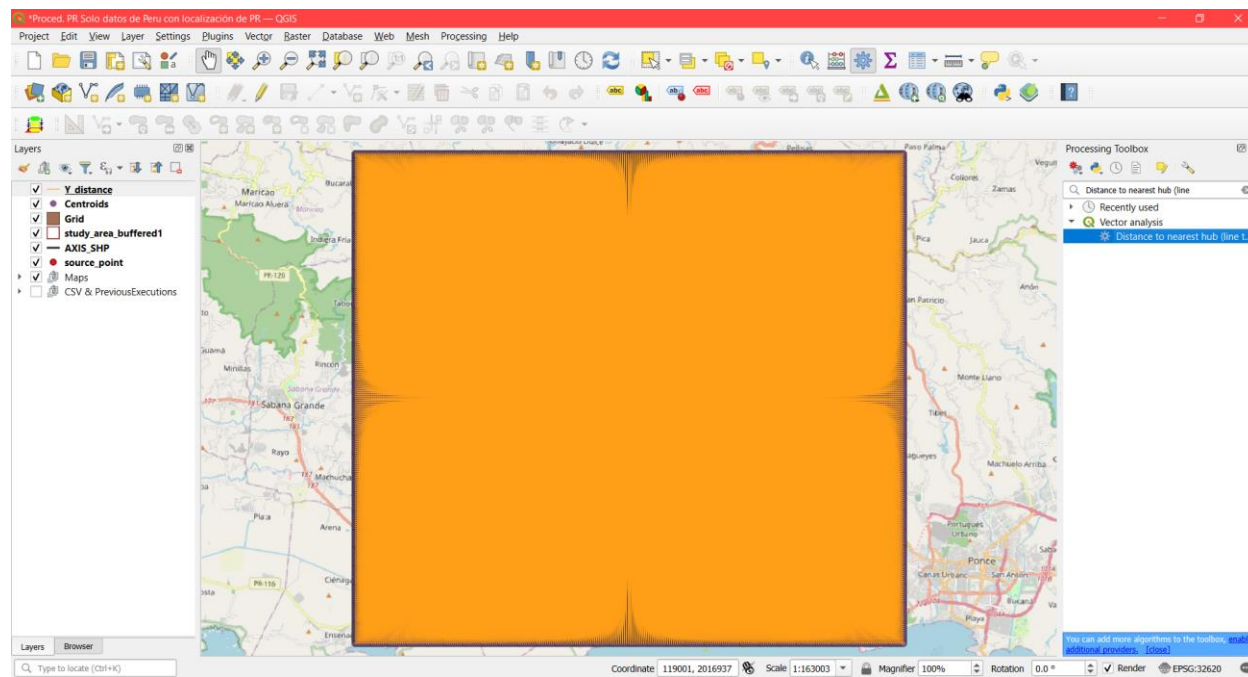
Esto da la distancia de cada centroide hacia el eje (“AXIS”), lo cual se llama “Y crosswind distance”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 126

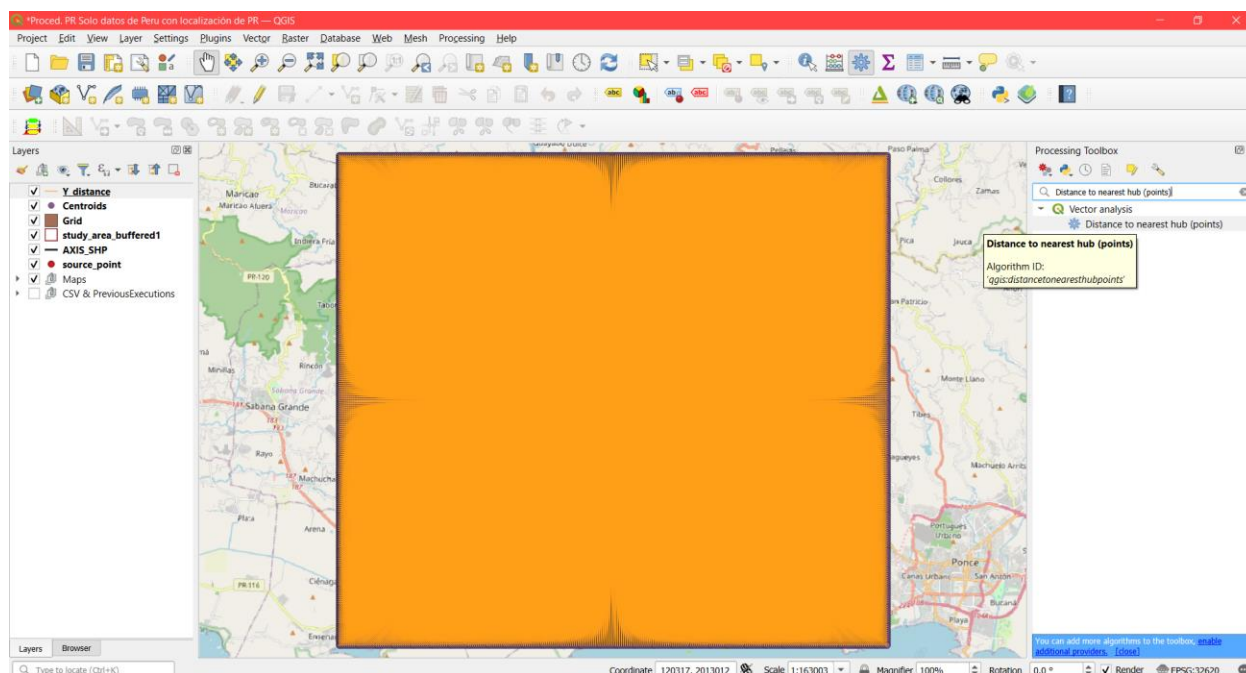
Visualizamos lo ejecutado. Pero más adelante, se completará este paso, en la parte 2, para la distancia en Y



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 127

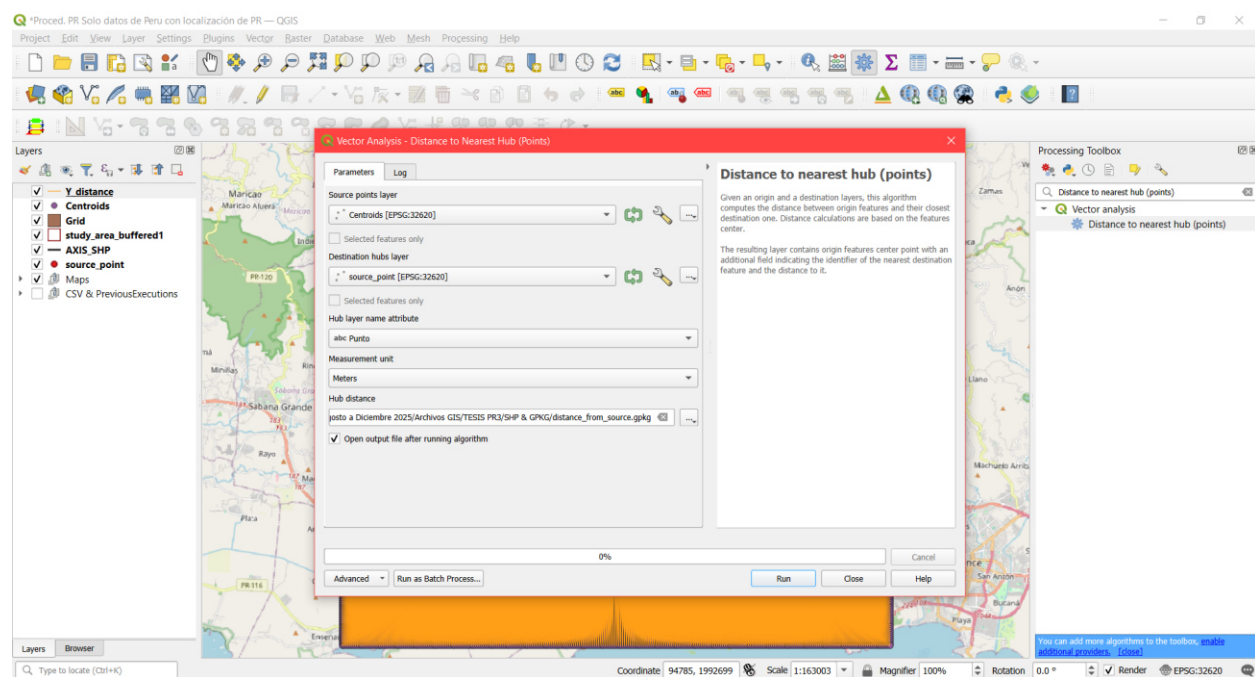
Crear la distancia en X (a lo largo de la línea). Se intentó buscar una herramienta en QGIS llamada “Distance along lines”, pero la misma no estaba disponible en la aplicación, así que se procedió a utilizar otra herramienta, llamada “Distance to nearest hub (points)” en este paso (posiblemente a la autora del tutorial le sucedió algo similar). Esto produce un comportamiento radial, pero más adelante se aplicará un paso adicional para arreglar esto



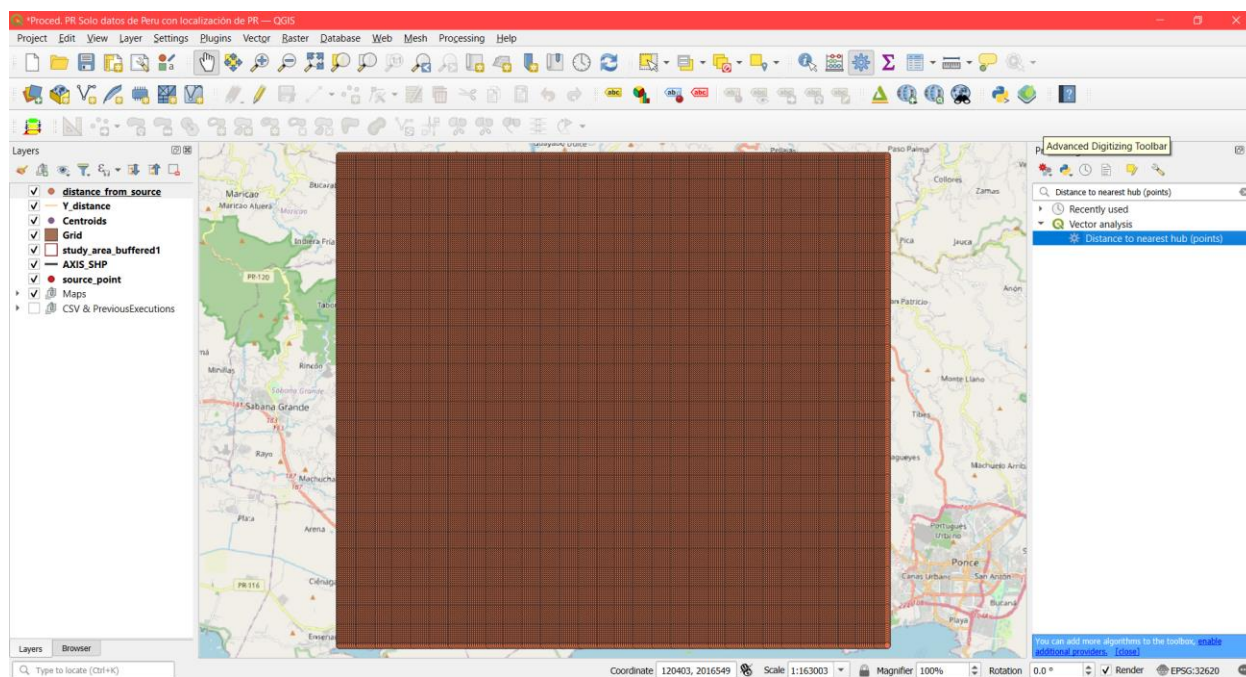
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 128

Continuación del Proceso



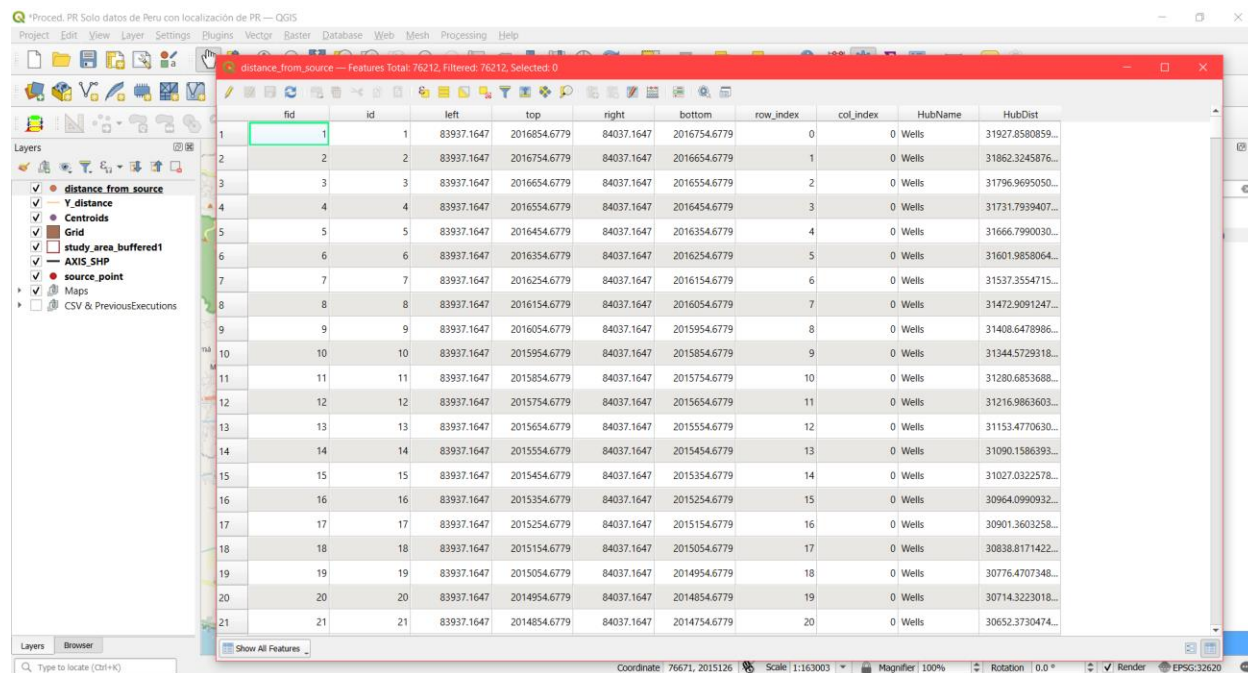
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 129*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 130

Lo que se realizó anteriormente exhibe un comportamiento radial, lo cual se nombrará r , y a partir de Pitágoras ($r^2 = X^2 + Y^2$) se corregirá esto. Donde, “HubDist”, que es la Distancia de la fuente (r)



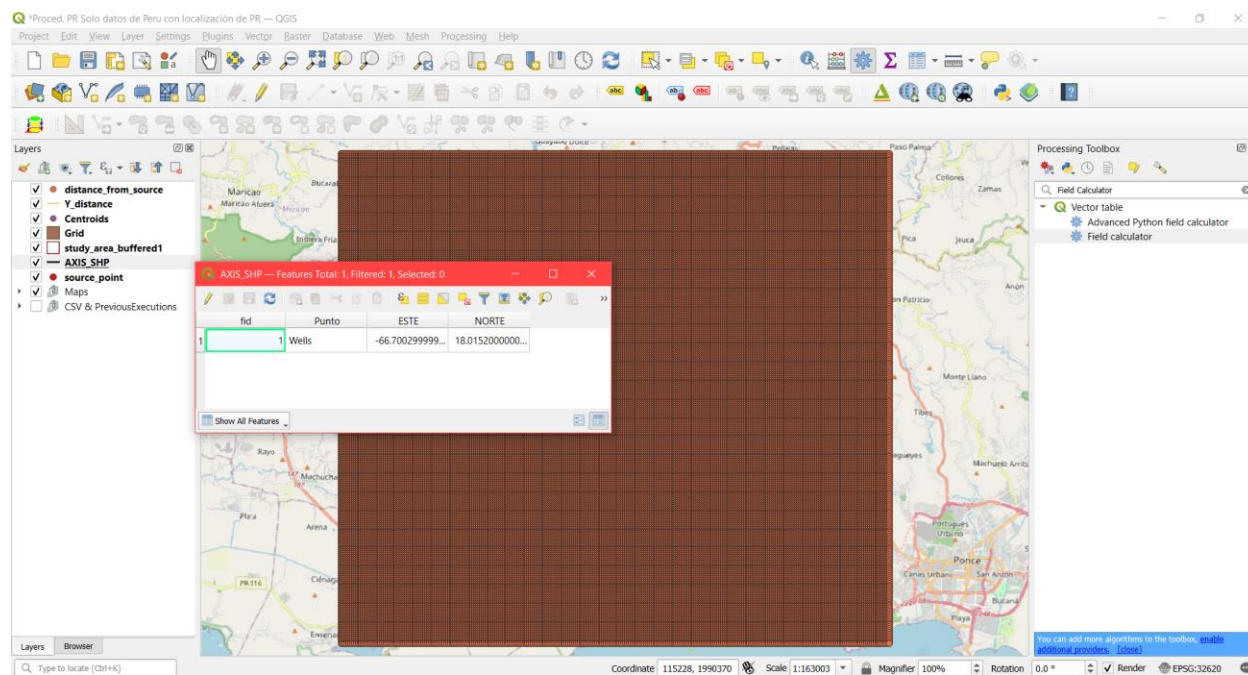
The screenshot shows the QGIS interface with a table of spatial data. The table has the following columns: fid, id, left, top, right, bottom, row_index, col_index, HubName, and HubDist. The data is organized into 21 rows, each representing a spatial feature. The HubName column consistently shows '0 Wells'.

fid	id	left	top	right	bottom	row_index	col_index	HubName	HubDist
1	1	83937.1647	2016854.6779	84037.1647	2016754.6779	0	0	Wells	31927.8580859...
2	2	83937.1647	2016754.6779	84037.1647	2016654.6779	1	0	Wells	31862.3245876...
3	3	83937.1647	2016654.6779	84037.1647	2016554.6779	2	0	Wells	31796.9695050...
4	4	83937.1647	2016554.6779	84037.1647	2016454.6779	3	0	Wells	31731.7939407...
5	5	83937.1647	2016454.6779	84037.1647	2016354.6779	4	0	Wells	31666.7990030...
6	6	83937.1647	2016354.6779	84037.1647	2016254.6779	5	0	Wells	31601.9858064...
7	7	83937.1647	2016254.6779	84037.1647	2016154.6779	6	0	Wells	31537.3554715...
8	8	83937.1647	2016154.6779	84037.1647	2016054.6779	7	0	Wells	31472.9091247...
9	9	83937.1647	2016054.6779	84037.1647	2015954.6779	8	0	Wells	31408.6478986...
10	10	83937.1647	2015954.6779	84037.1647	2015854.6779	9	0	Wells	31344.5729318...
11	11	83937.1647	2015854.6779	84037.1647	2015754.6779	10	0	Wells	31280.6853688...
12	12	83937.1647	2015754.6779	84037.1647	2015654.6779	11	0	Wells	31216.9863603...
13	13	83937.1647	2015654.6779	84037.1647	2015554.6779	12	0	Wells	31153.4770630...
14	14	83937.1647	2015554.6779	84037.1647	2015454.6779	13	0	Wells	31090.1586393...
15	15	83937.1647	2015454.6779	84037.1647	2015354.6779	14	0	Wells	31027.0322578...
16	16	83937.1647	2015354.6779	84037.1647	2015254.6779	15	0	Wells	30964.0990932...
17	17	83937.1647	2015254.6779	84037.1647	2015154.6779	16	0	Wells	30901.3603258...
18	18	83937.1647	2015154.6779	84037.1647	2015054.6779	17	0	Wells	30838.8171422...
19	19	83937.1647	2015054.6779	84037.1647	2014954.6779	18	0	Wells	30776.4707348...
20	20	83937.1647	2014954.6779	84037.1647	2014854.6779	19	0	Wells	30714.3223018...
21	21	83937.1647	2014854.6779	84037.1647	2014754.6779	20	0	Wells	30652.3730474...

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 131

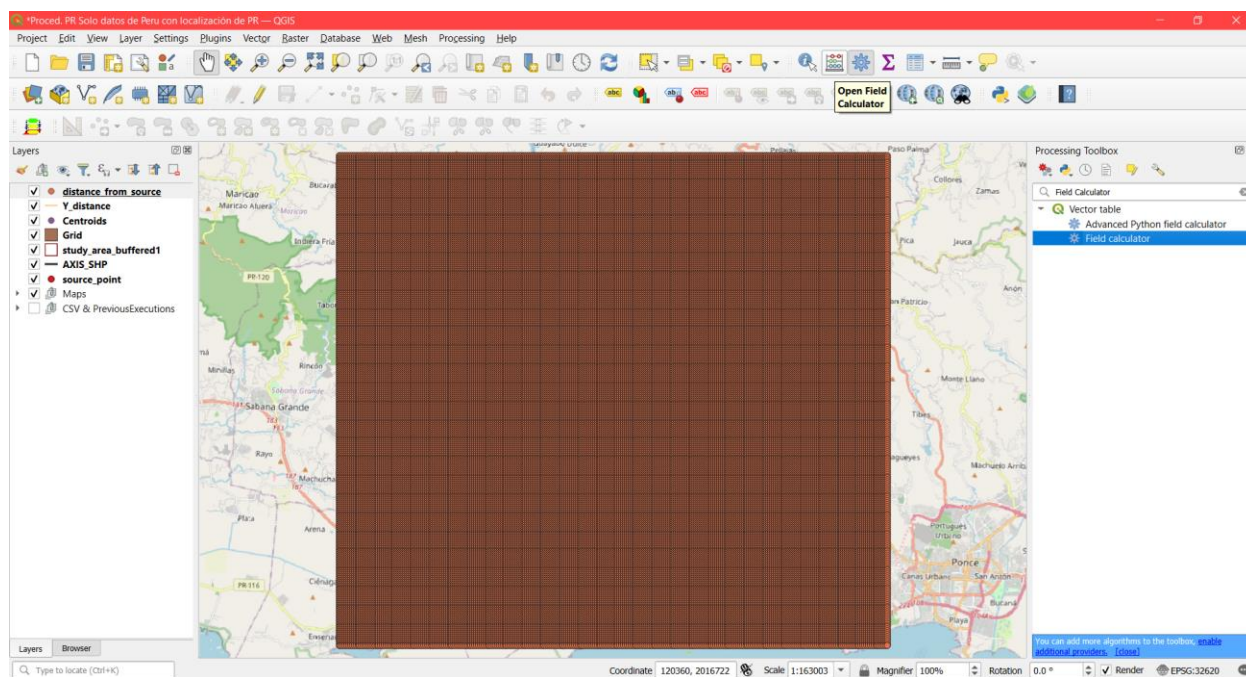
Primero se verificó la tabla de atributos para el “AXIS”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 132

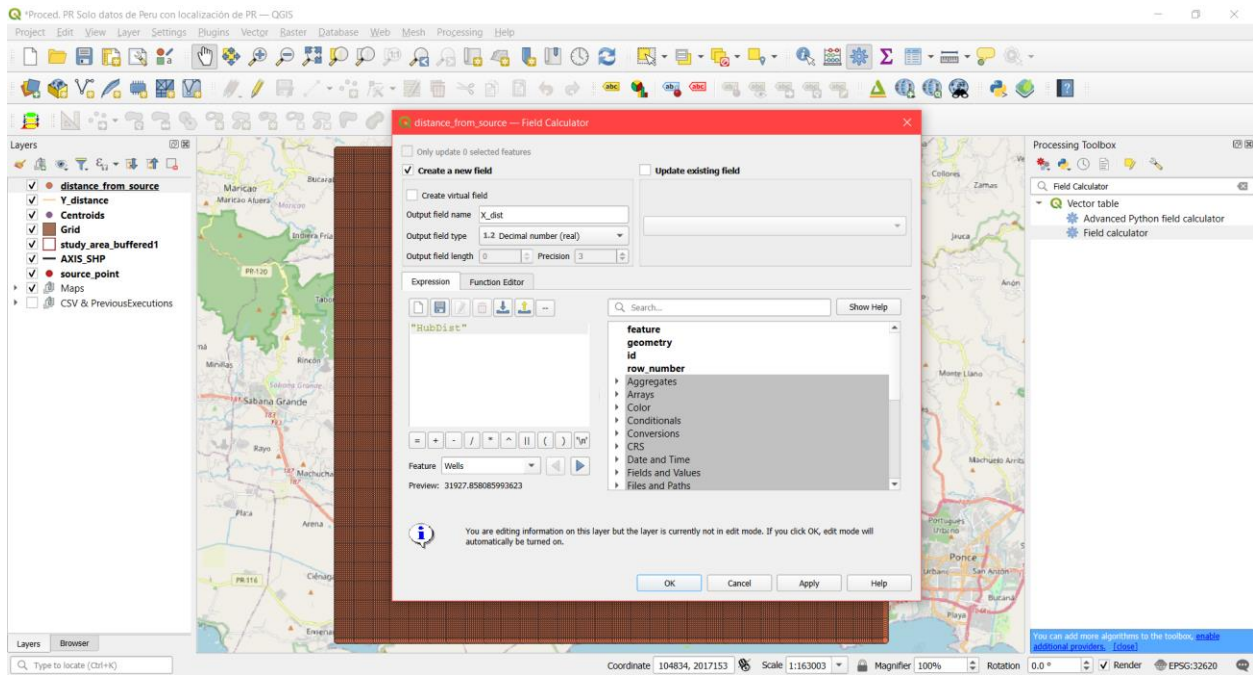
Se procedió a calcular X , que es la distancia “downwind”.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 133

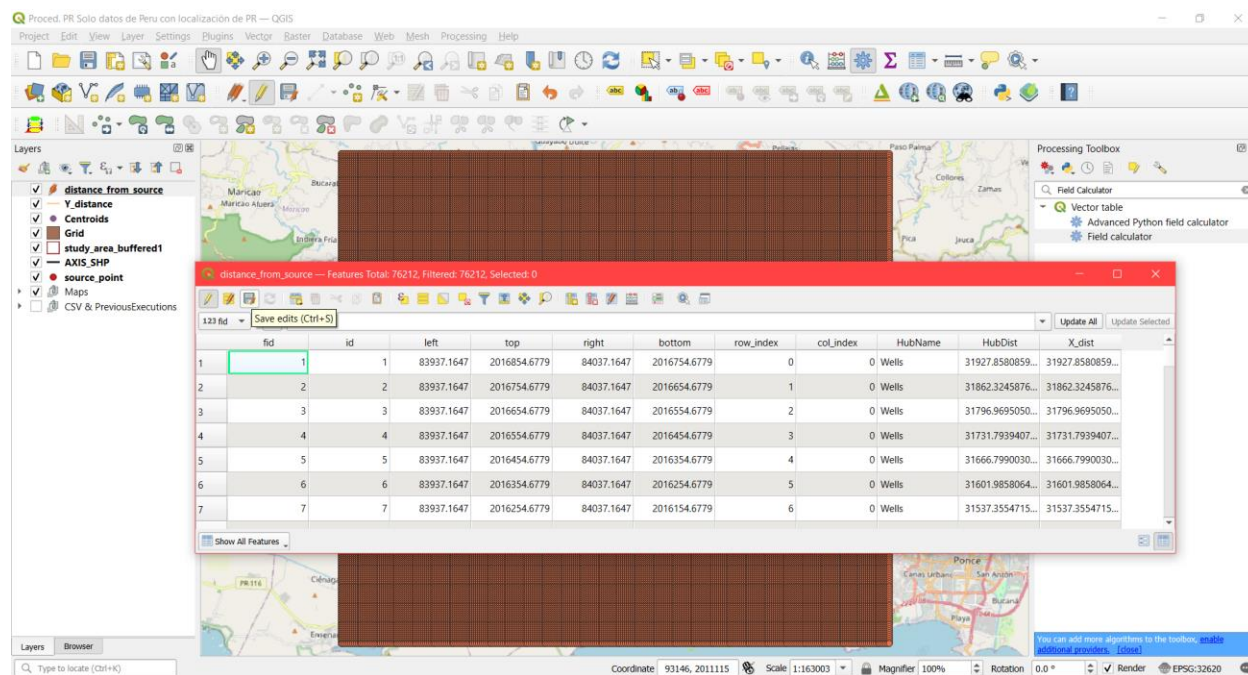
Con la información añadida, se oprime “OK”, no “apply”, ya que si no la capa seguiría en modo edición y eso perjudicaría el resto del proyecto



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 134

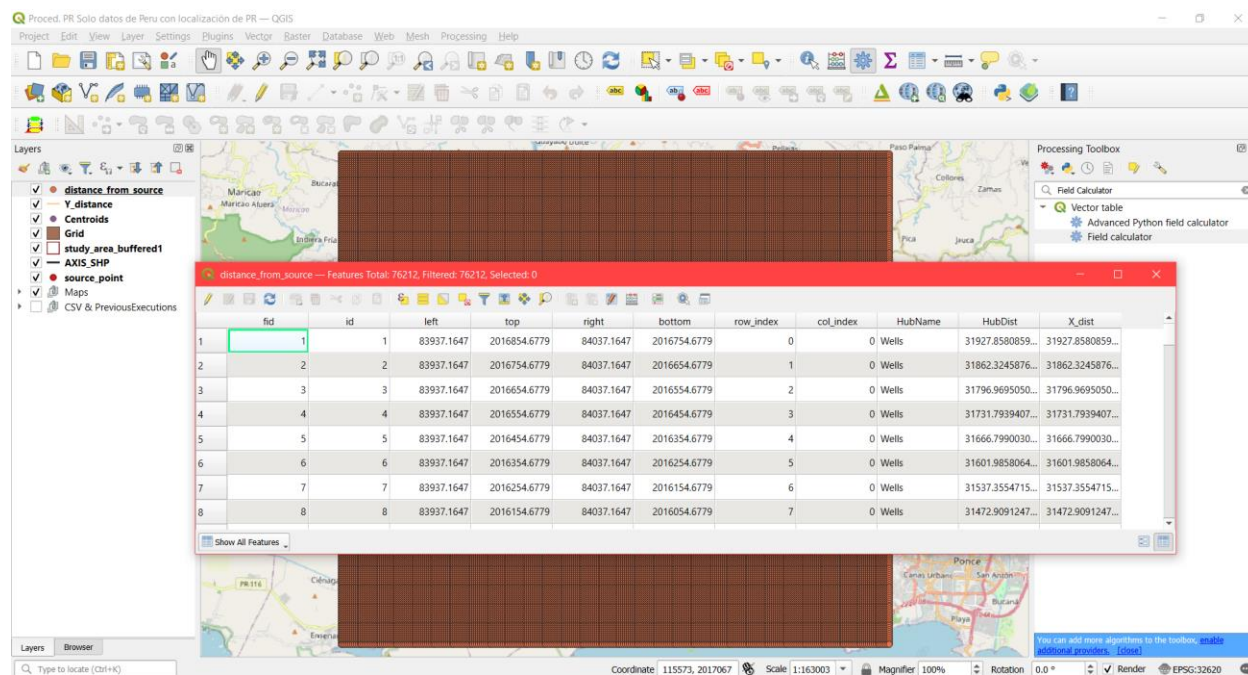
Se observó la nueva columna creada de la ejecución anterior



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 135

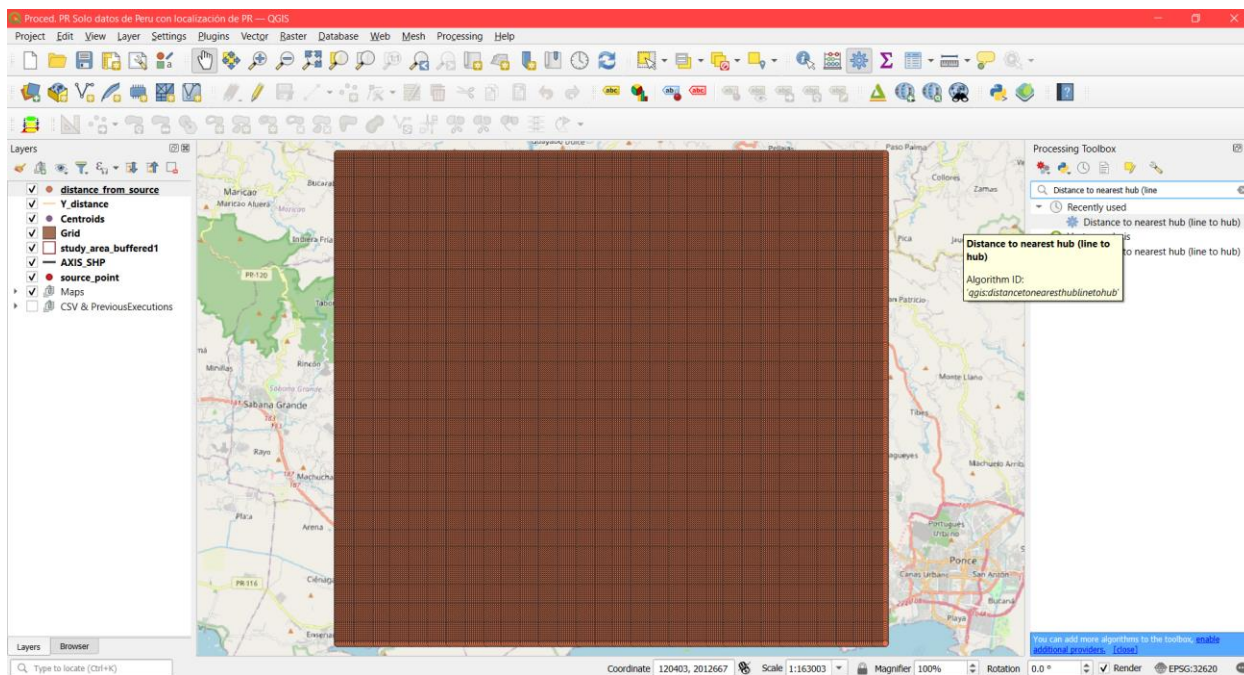
Aunque no se produjo una nueva capa, en la imagen podemos ver la columna para la distancia de X, lo cual comprueba que la capa, en efecto es la “X_dist”



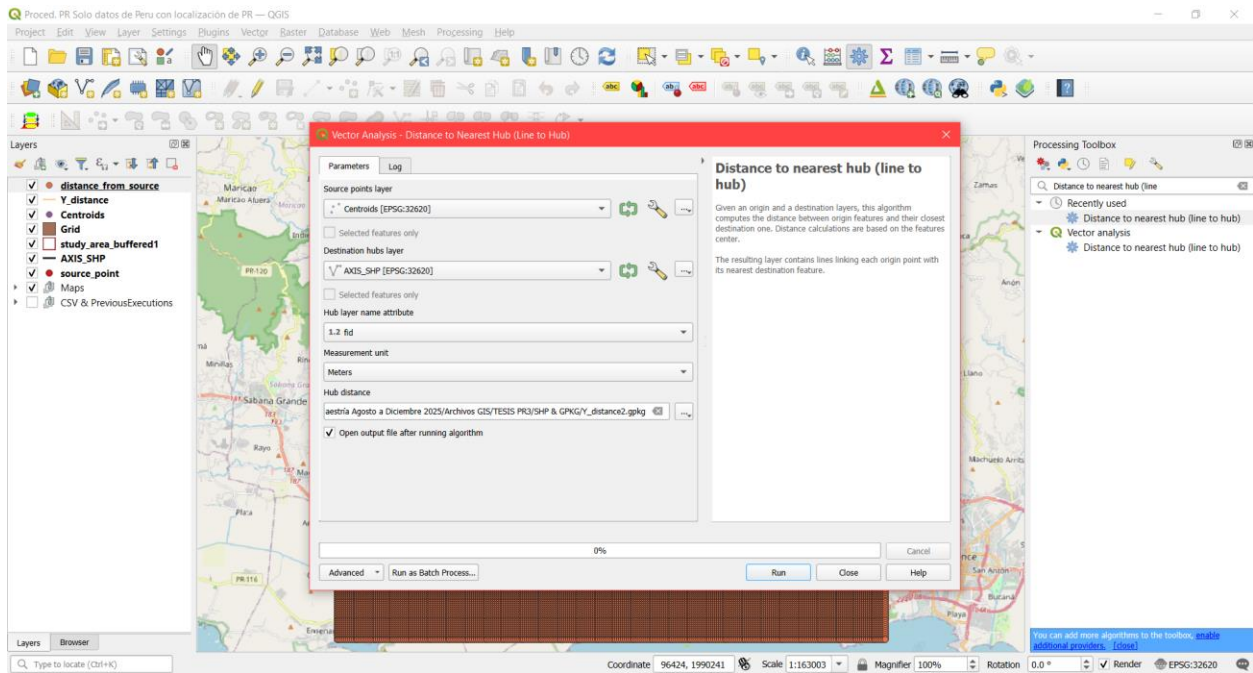
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 136

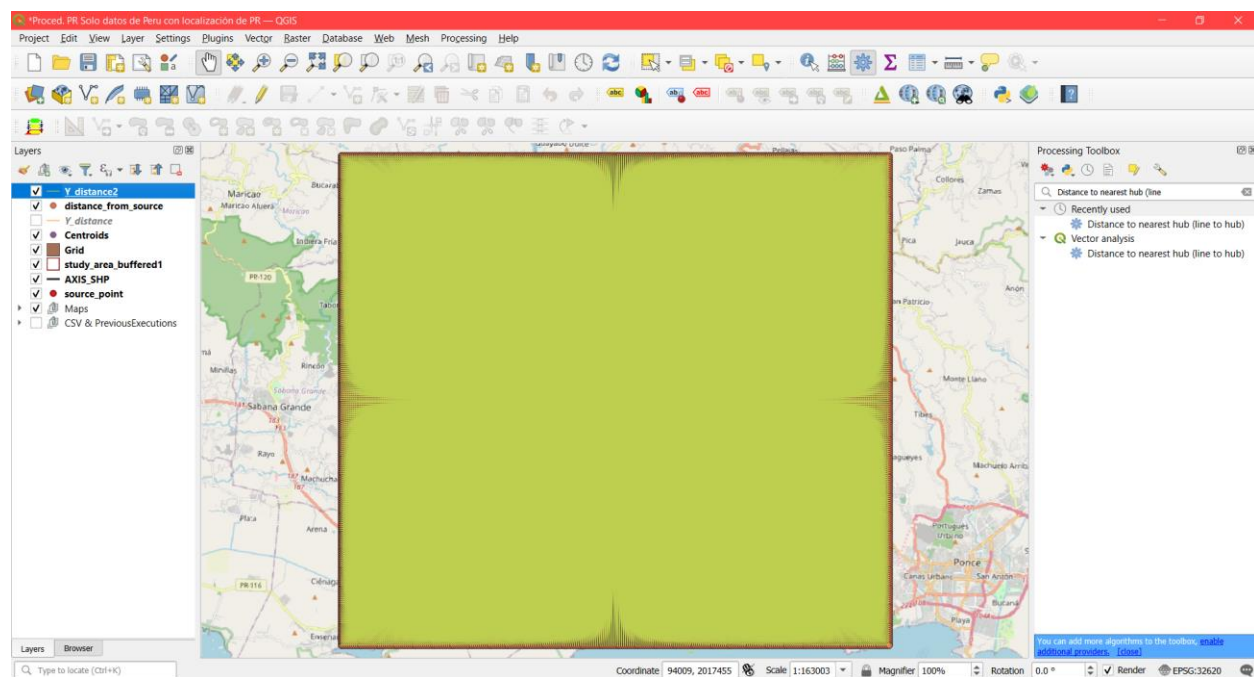
Crear la distancia en Y (correctamente). Parte 2. Se hizo de esta manera para completar el sistema de coordenadas y a su vez asegurar que la dispersión sea correcta y no radial.



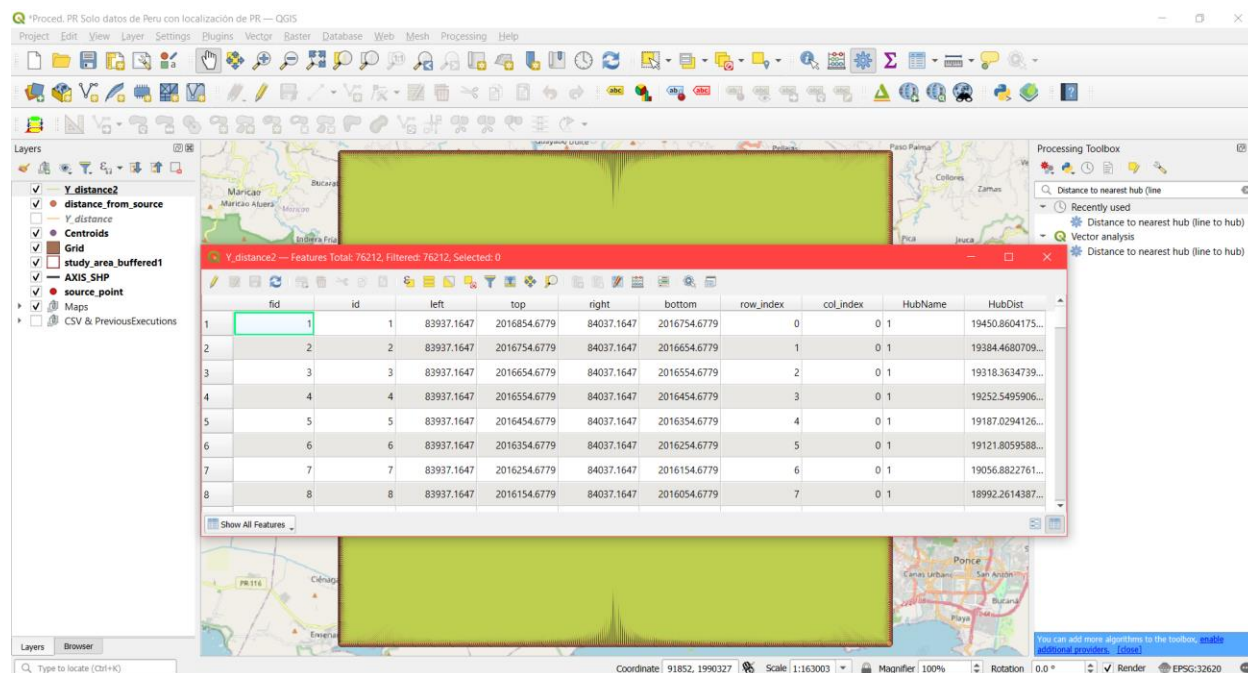
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 137*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 138*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

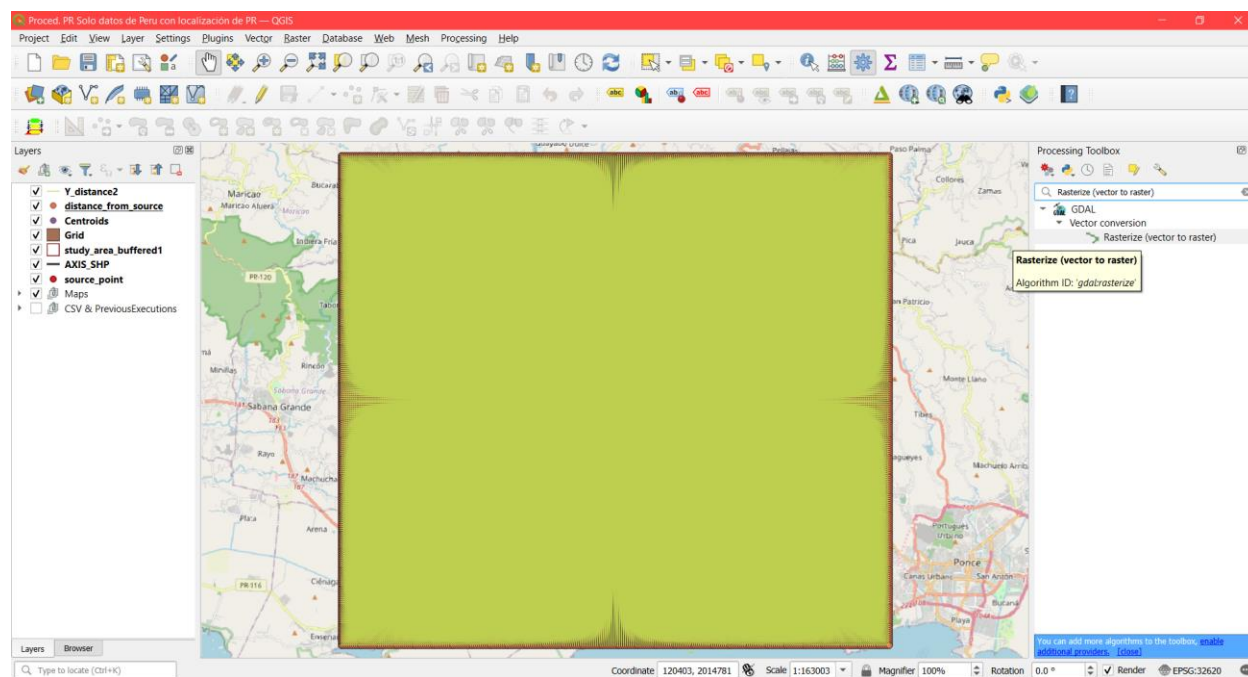
Figura 139*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Nota importante: es importante no renombrar las capas una vez realizadas, ya que puede dañar los próximos pasos, se deja la acción de renombrar para más adelante de ser necesario.

Figura 140

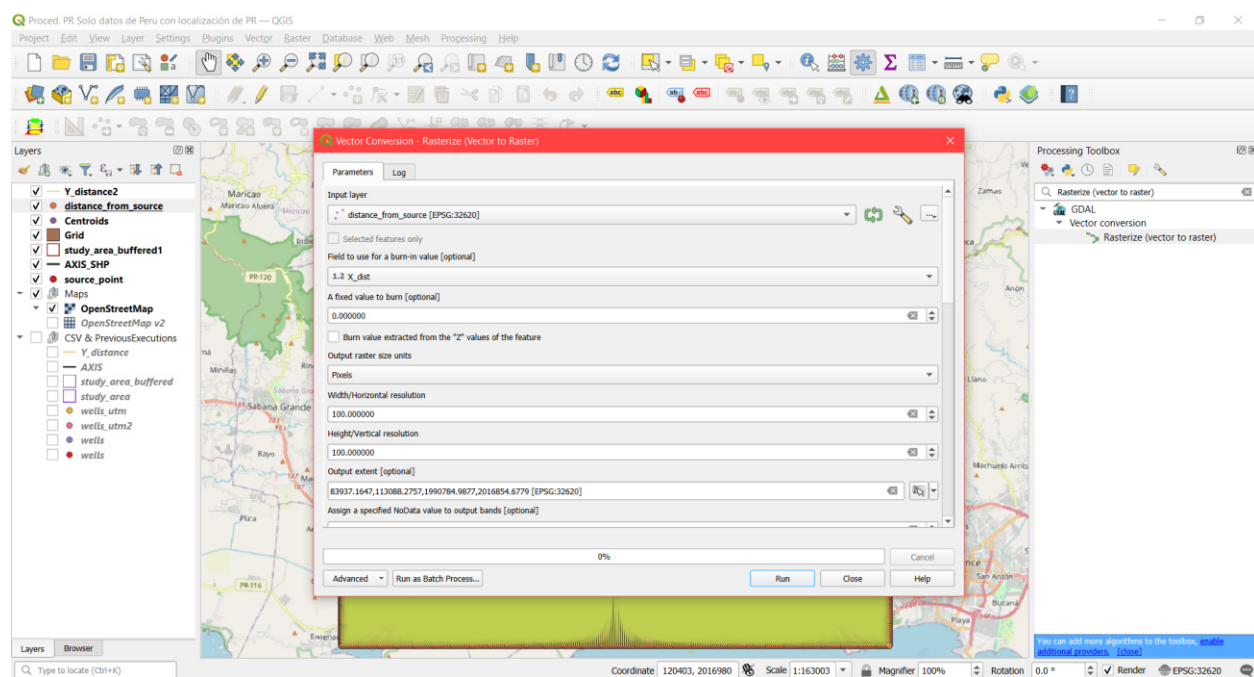
Paso 8. Convertir a “rasters” (X y Y). Primero el “Raster” para X.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

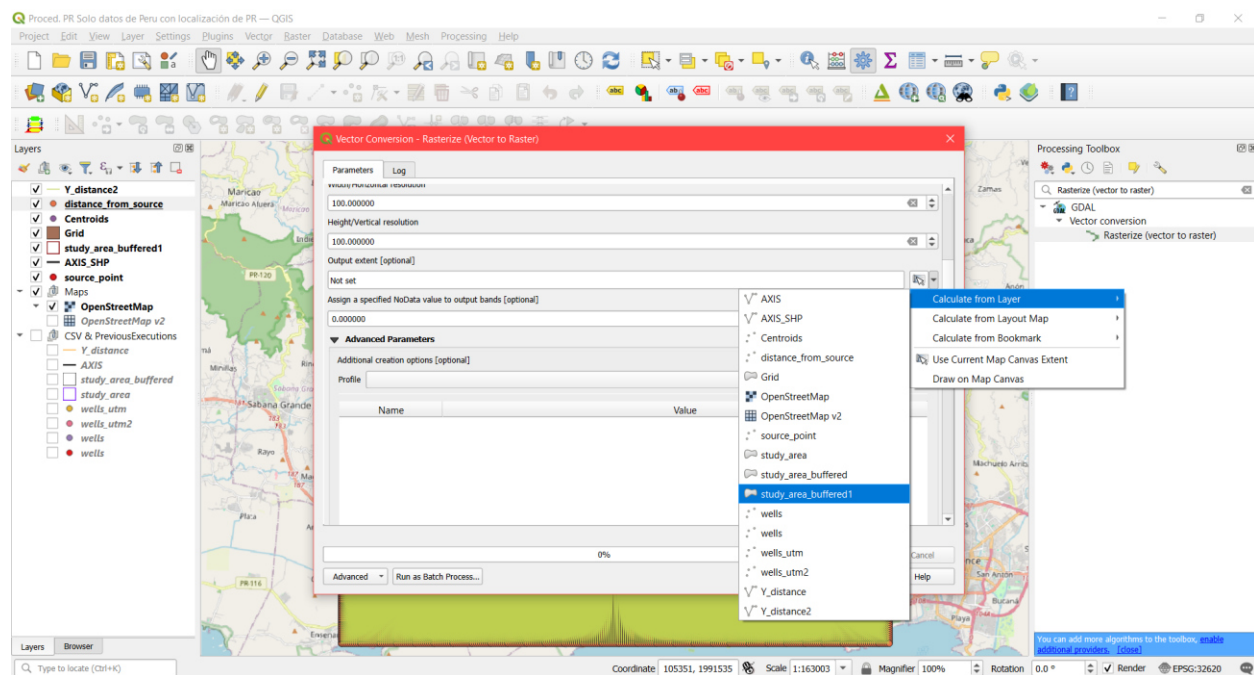
Figura 141

Continuación del Proceso



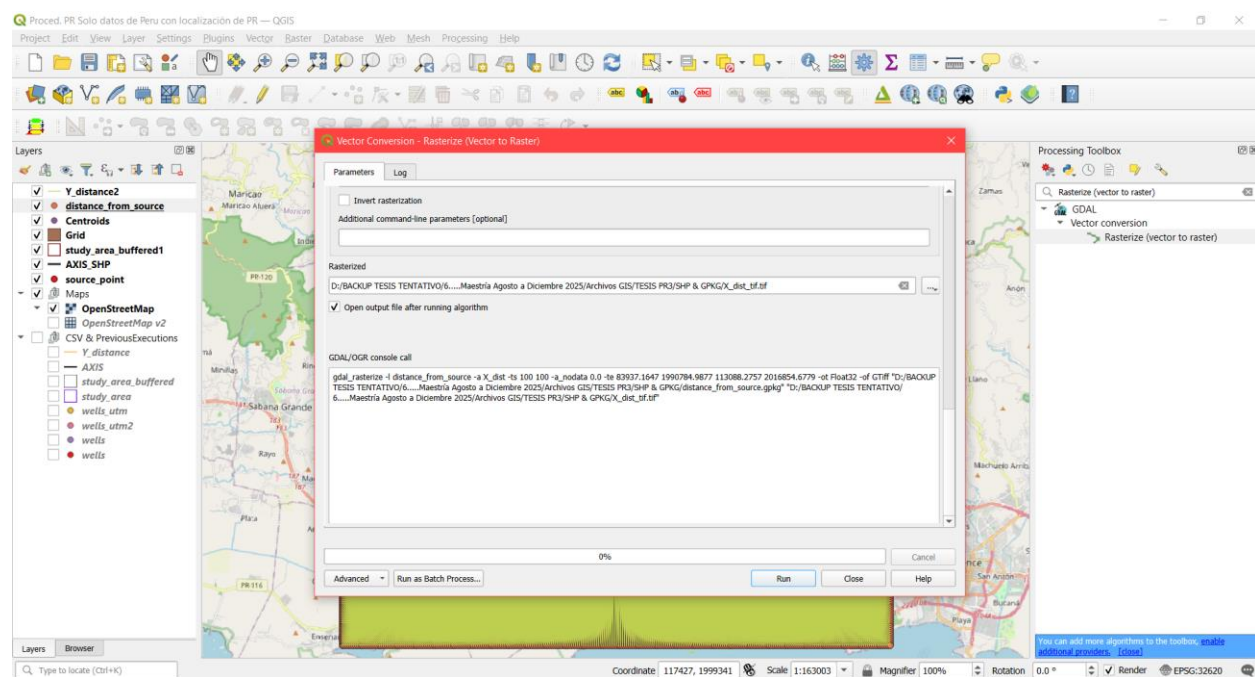
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 142

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

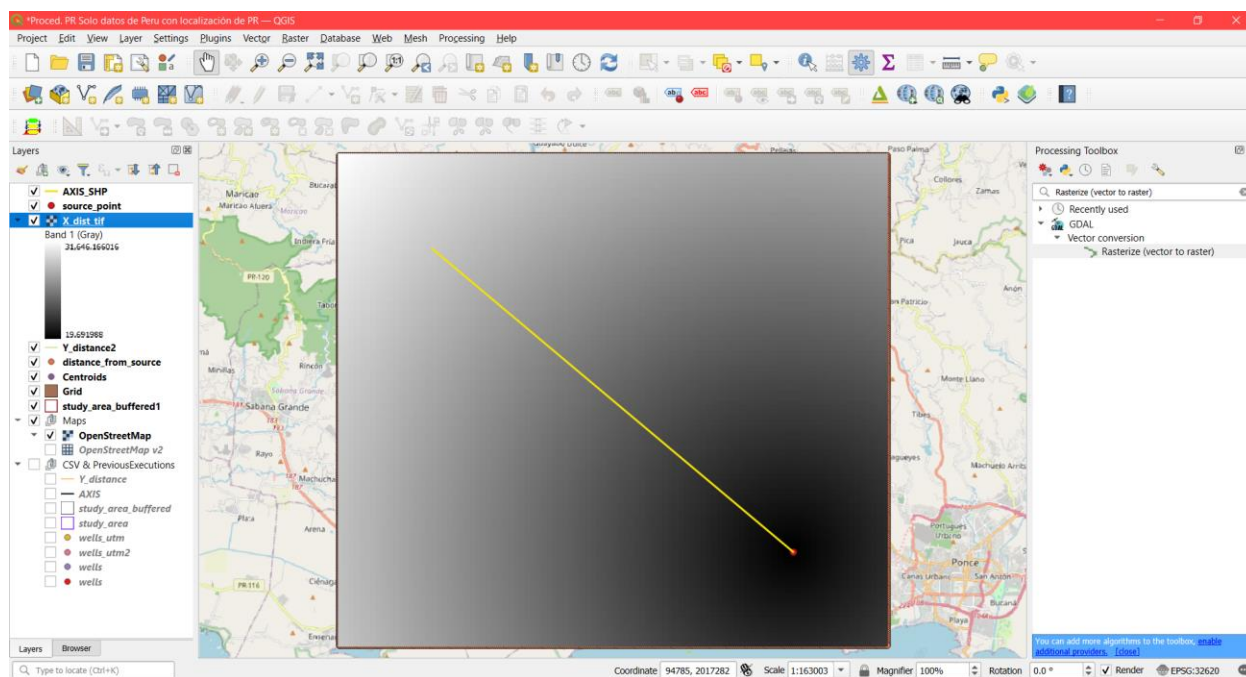
Figura 143

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 144

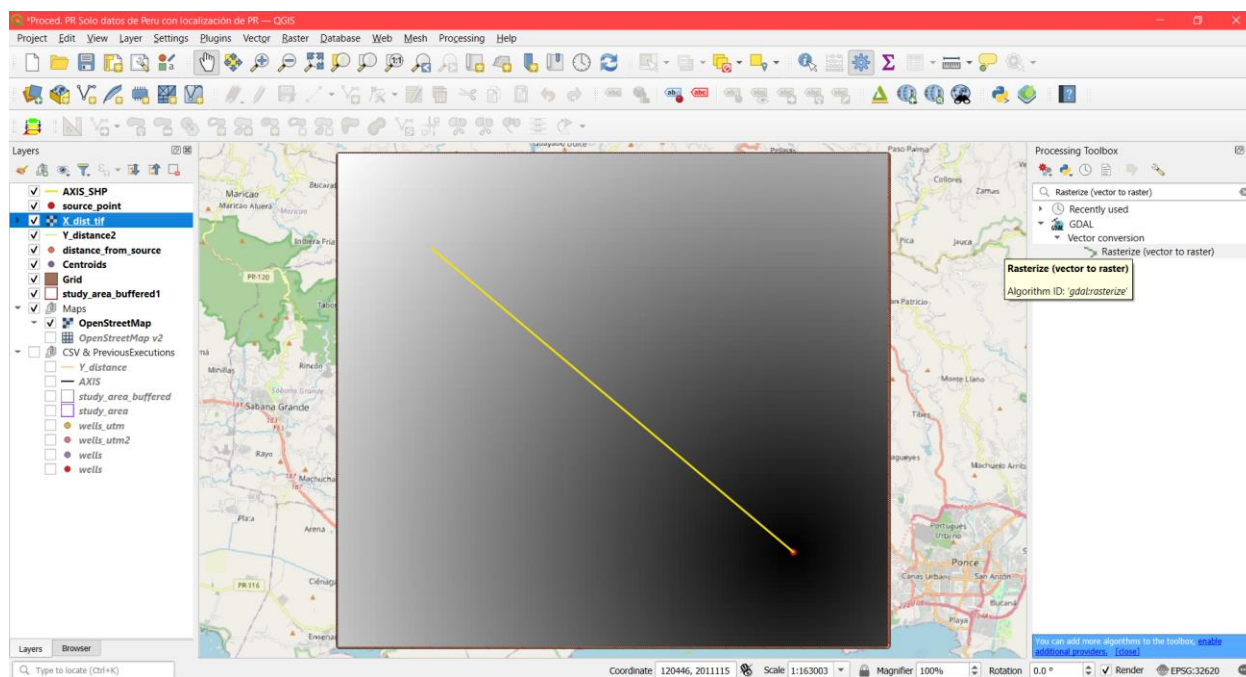
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

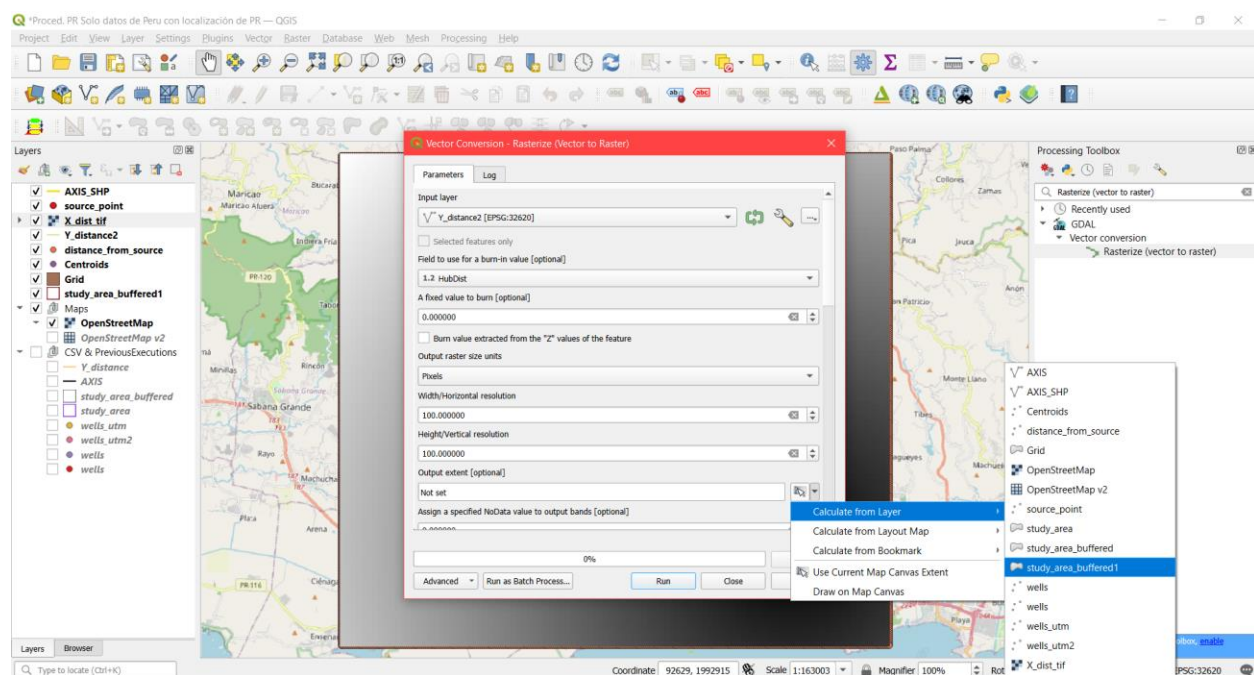
Figura 145

Proceso para el “Raster” para Y.



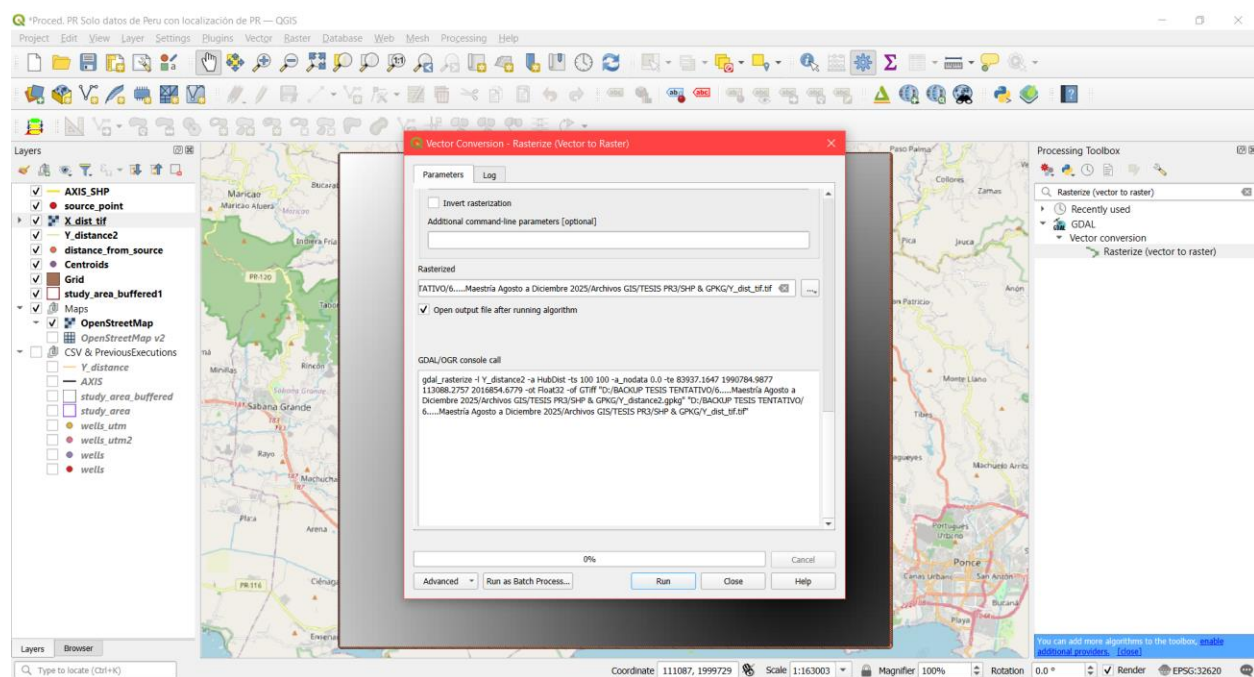
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 146

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

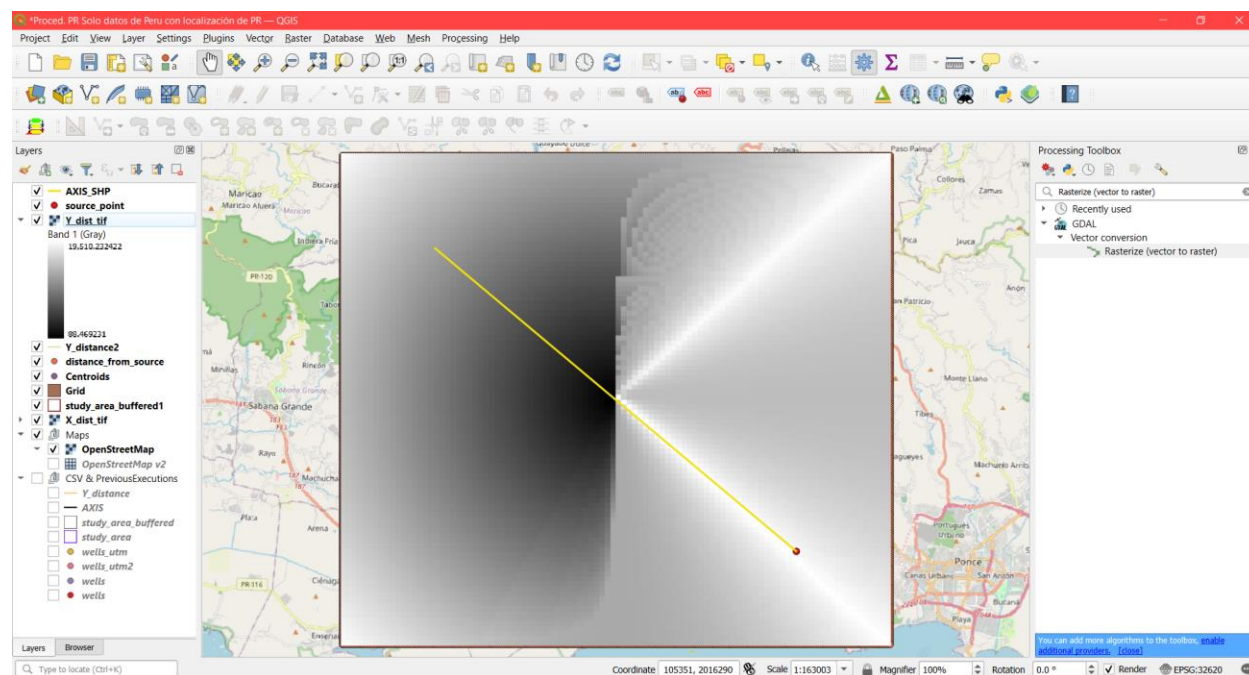
Figura 147

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 148

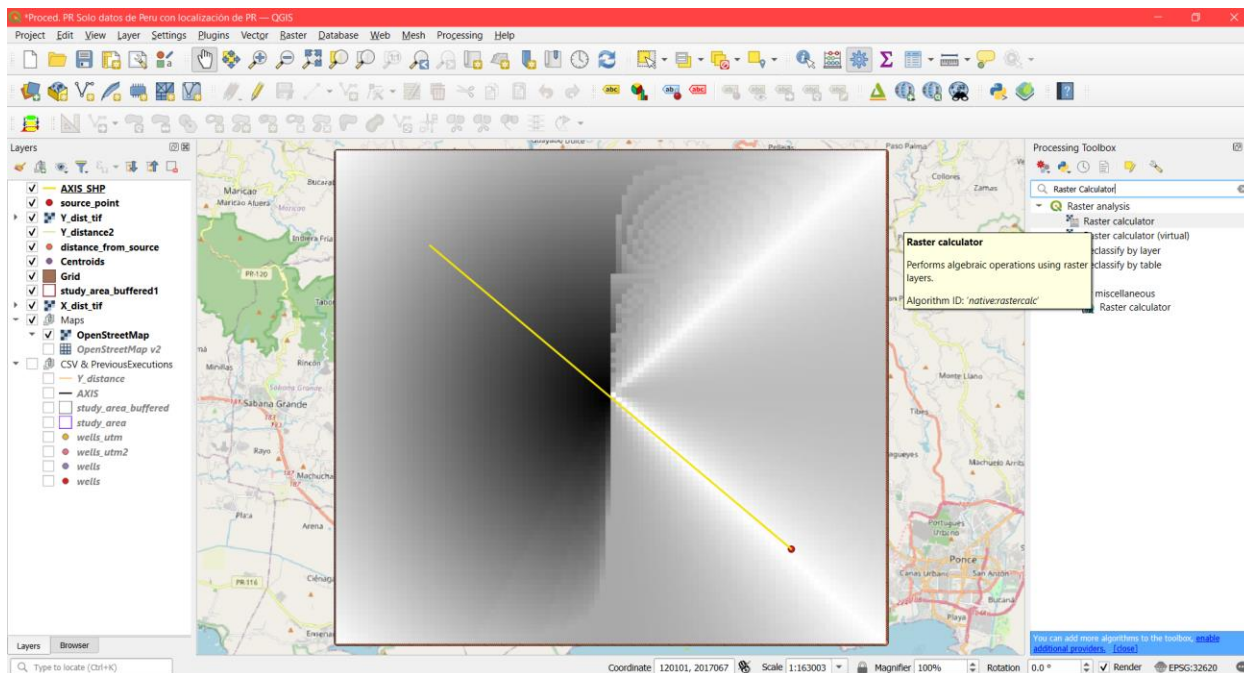
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 149

Paso 9. Crear sigma y y sigma z. Se evitó la calculadora “raster” de “GDAL”, ya que utilizada anteriormente se demostró que es muy rigurosa con la sintaxis, y que la calculadora “raster” de QGIS alcanza para replicar el tutorial hasta el momento. Primero Sigma y.

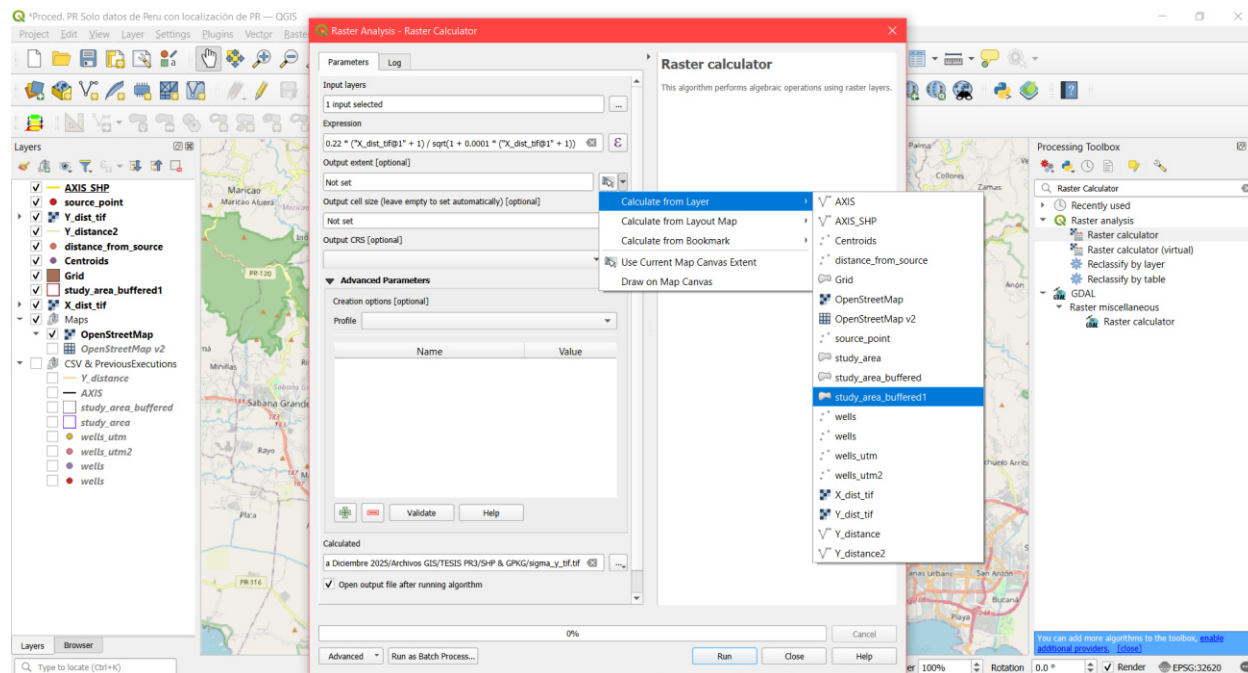


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

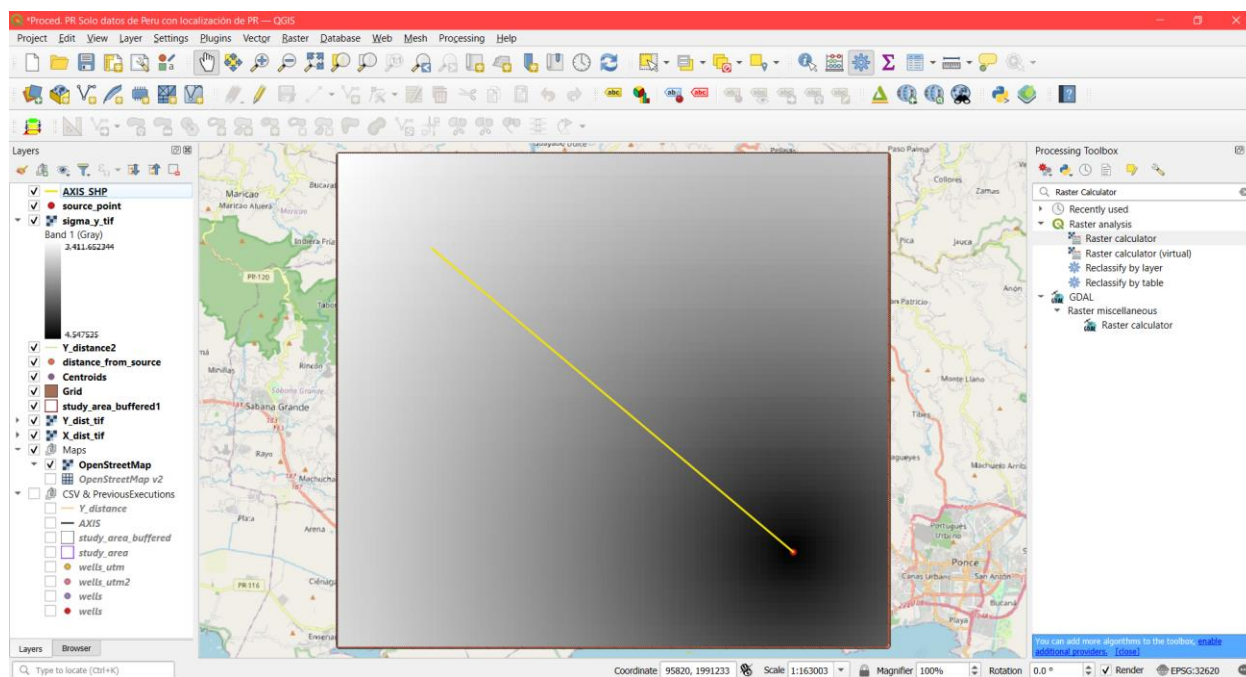
Figura 150

Se arreglo la sintaxis de la fórmula para garantizar la corrida

Fórmula: $0.22 * ((X_dist_tif@1 + 1) / \sqrt{1 + 0.0001 * ((X_dist_tif@1 + 1)})$



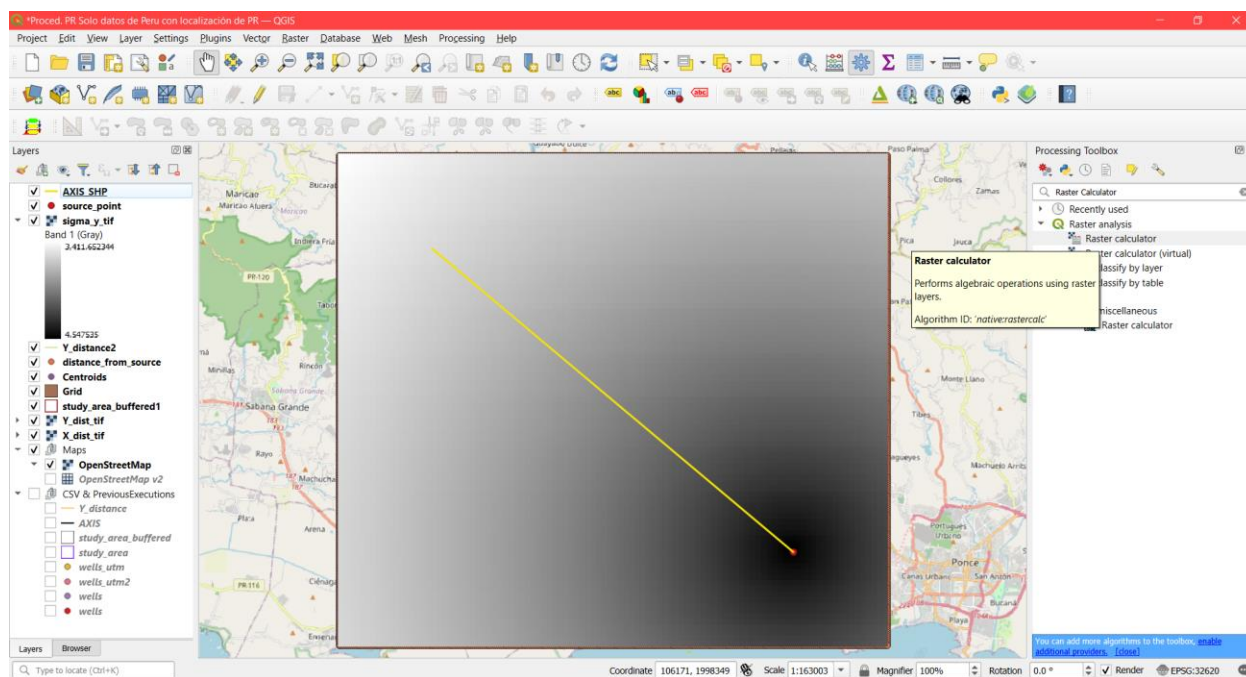
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 151*Continuación del Proceso*

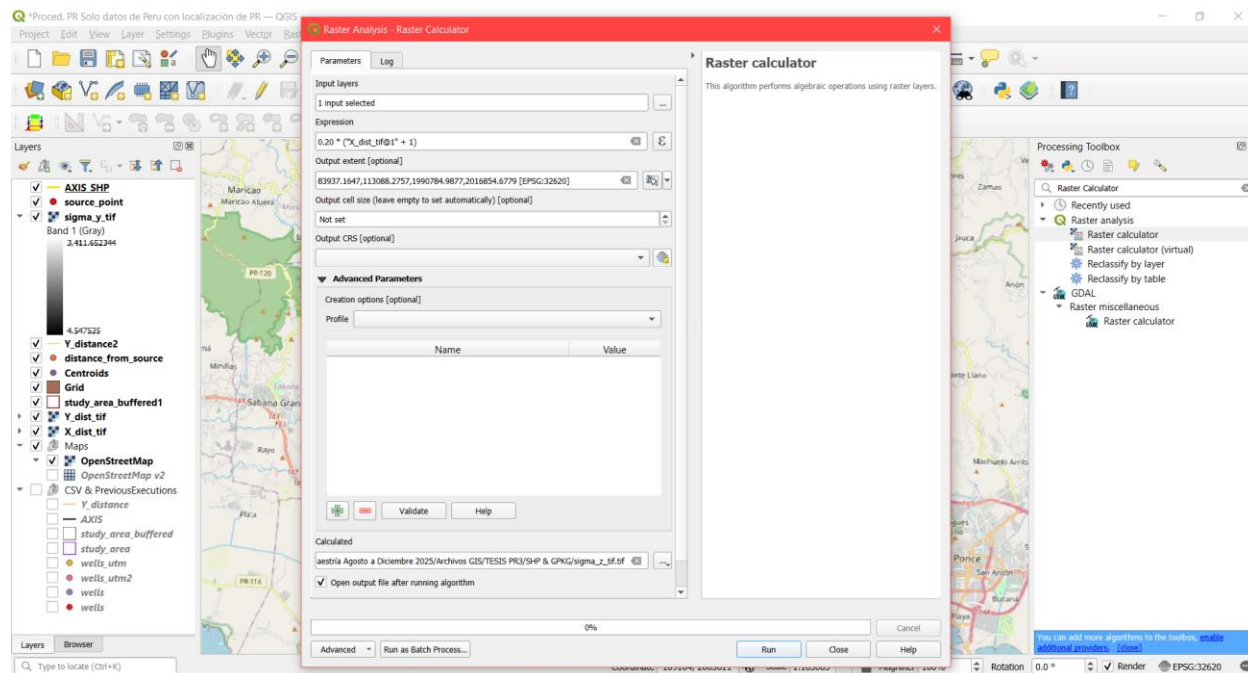
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 152

Proceso para Sigma z.

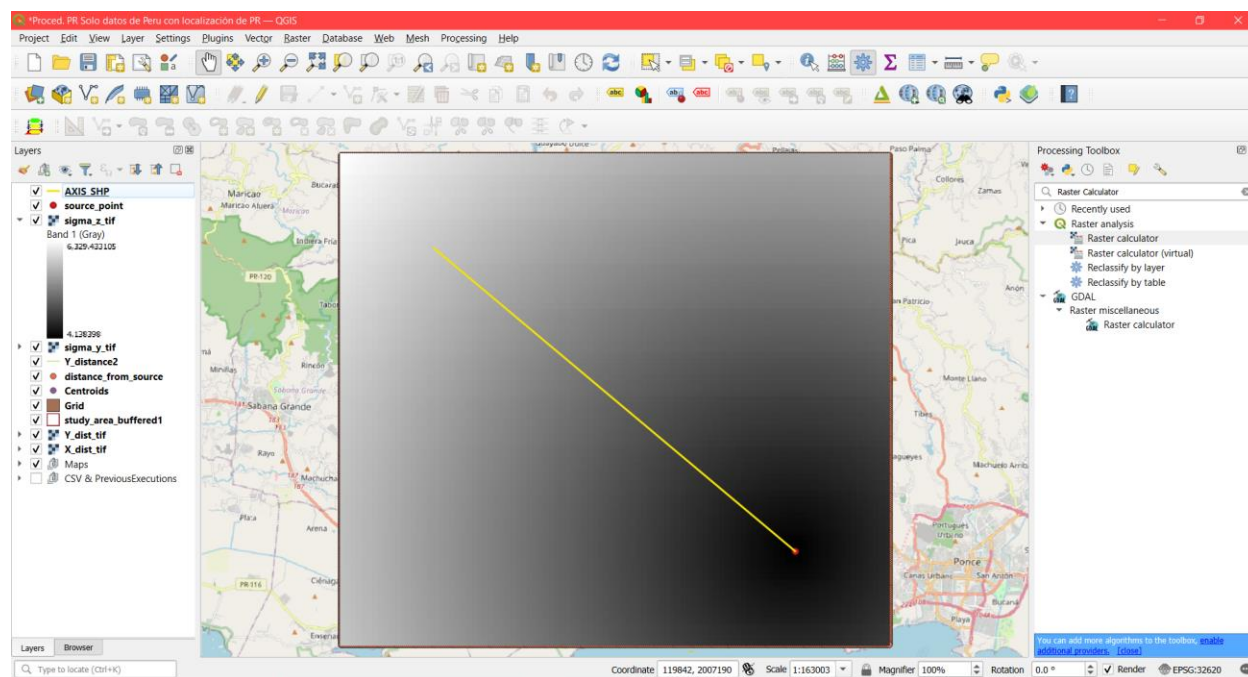


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 153*Continuación del Proceso*Fórmula: $0.20 * ("X_dist_tif@1" + 1)$ 

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 154

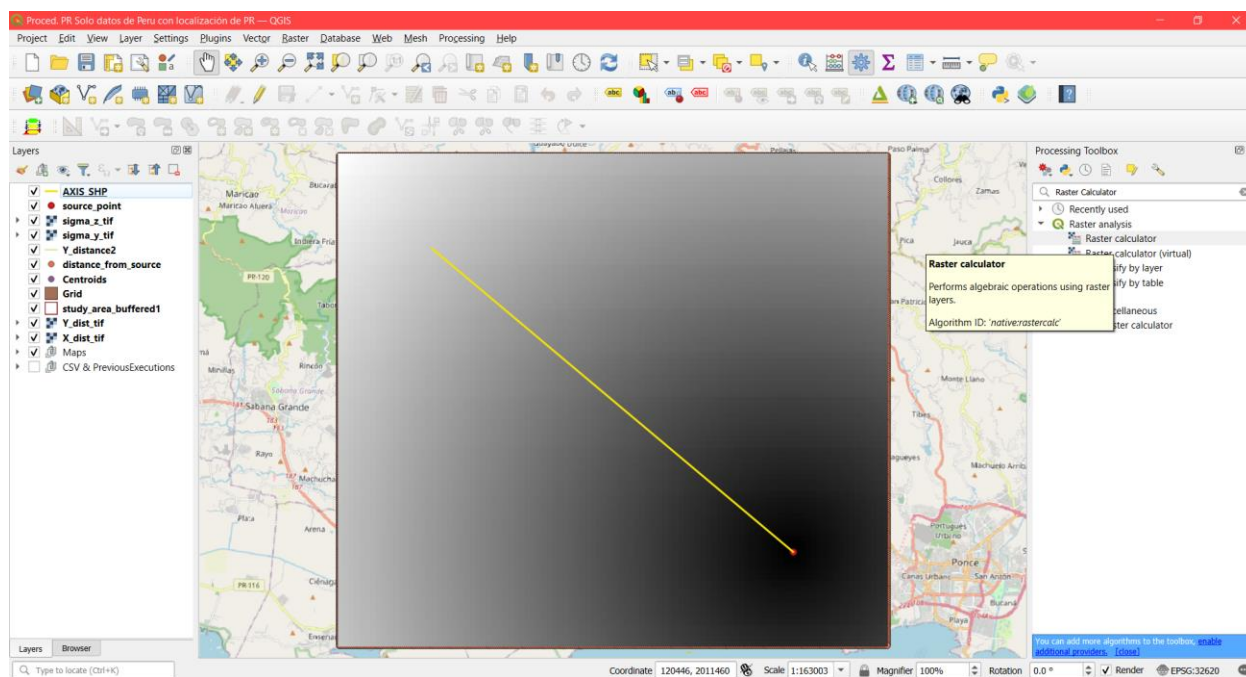
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Nota Importante: Periodo de Análisis en el Procedimiento. Es importante aclarar que a continuación en el Paso de Análisis, se podrá observar más en detalle y mediante análisis, unas corridas de pruebas, donde se encontró que se debe hacer coincidir (“align”) los “rasters” en cuanto al tamaño de los pixeles, de acuerdo a una capa de referencia (que en este caso fue “Y_dist”). Es importante, de igual manera, saber que el tamaño de los pixeles junto a las coordenadas era verificado antes y después de cada paso, para evitar errores en la corrida, y en este caso eso se realizó. Por tanto, más a continuación se muestran las actualizaciones a las capas o creación de σ_y , σ_z , “Y_dist” y “X_dist”, nombrados “aligned”.

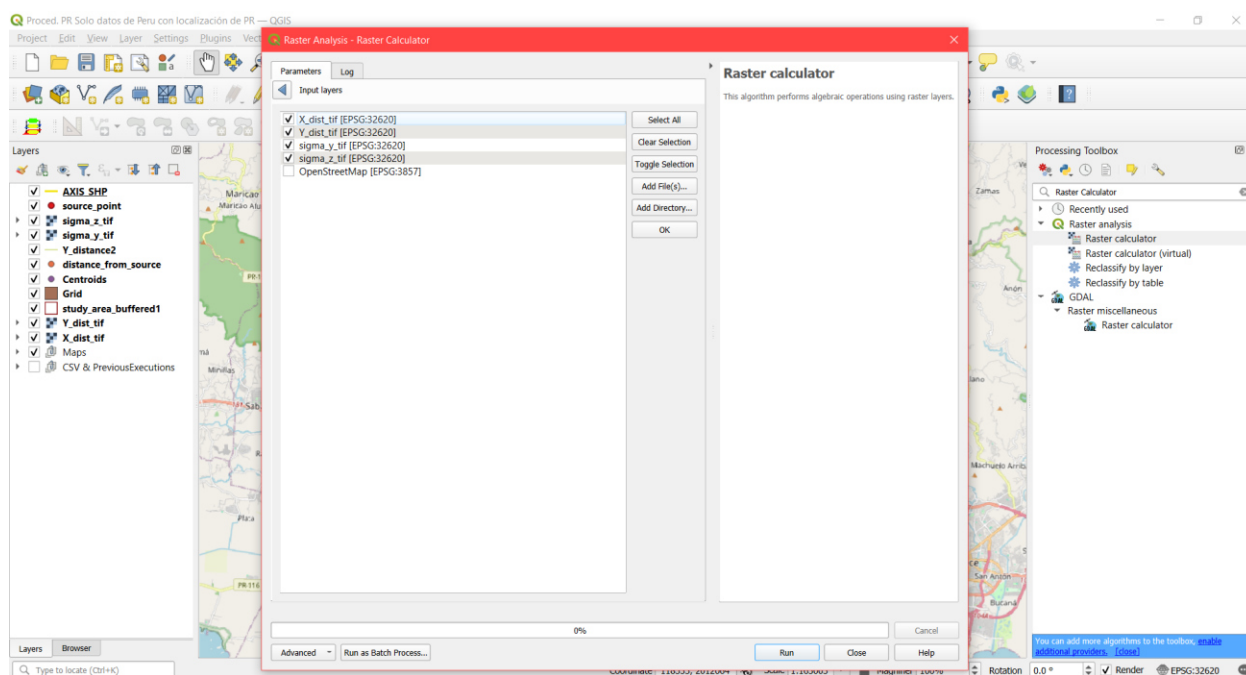
Figura 155

Paso de Análisis. Modelo Gaussiano.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

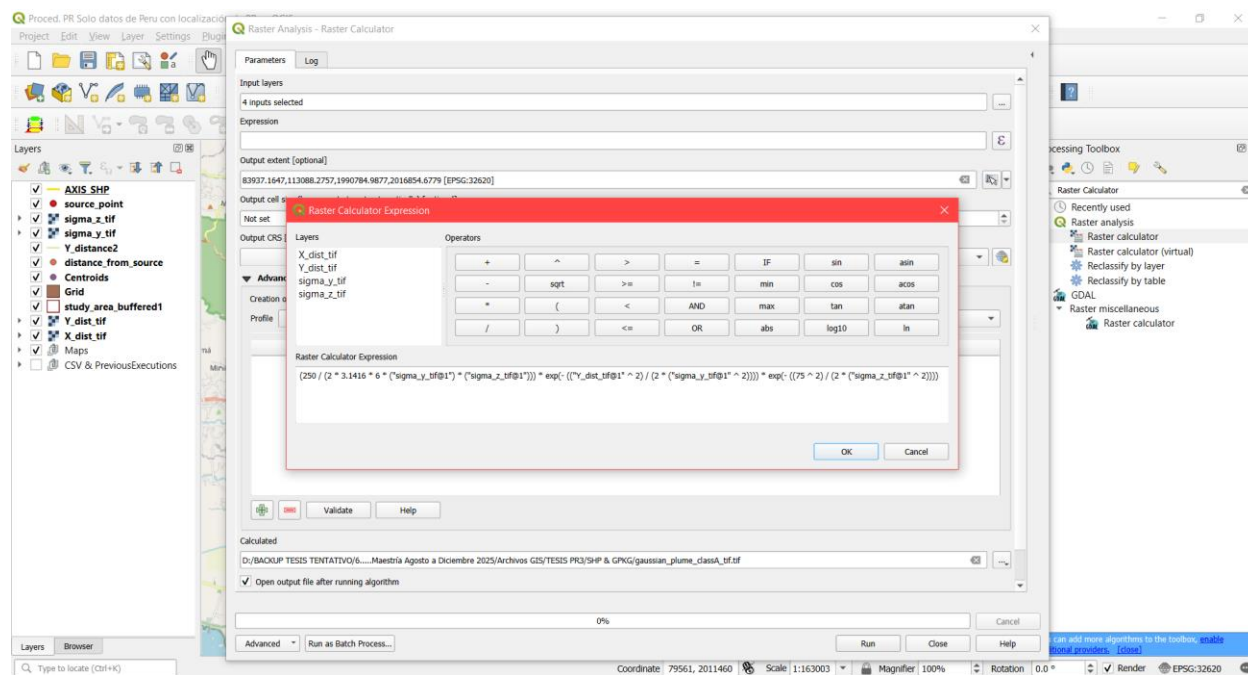
Figura 156

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

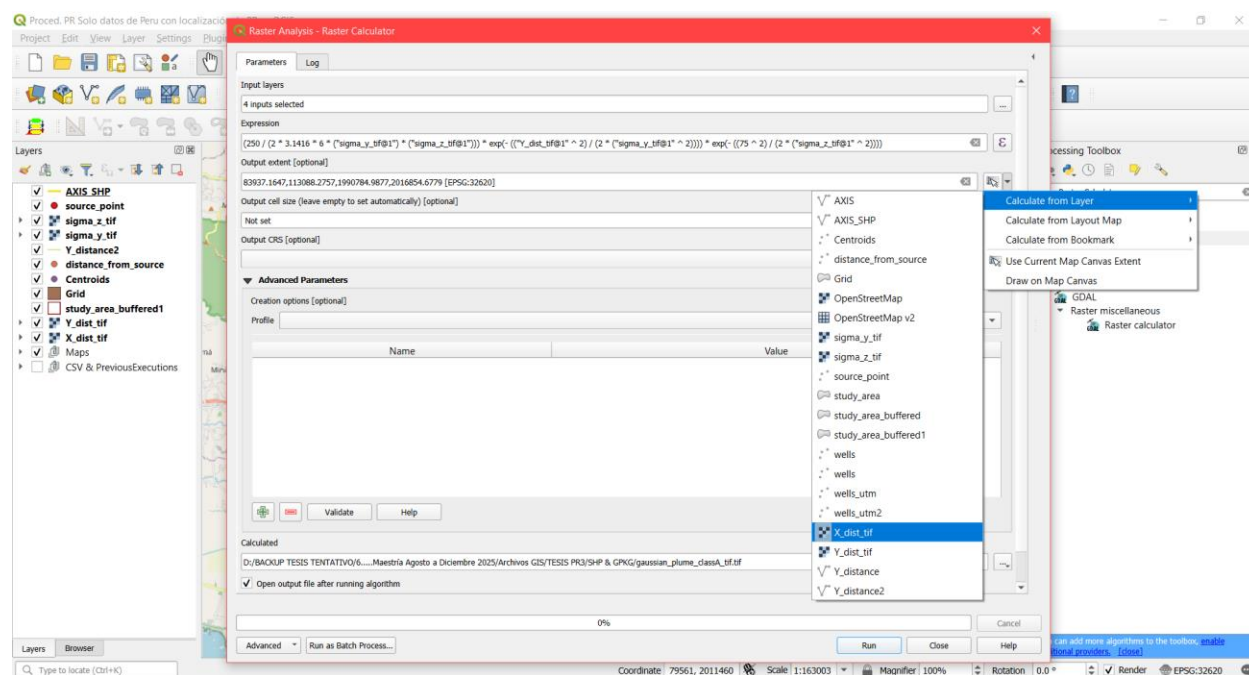
Figura 157

Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

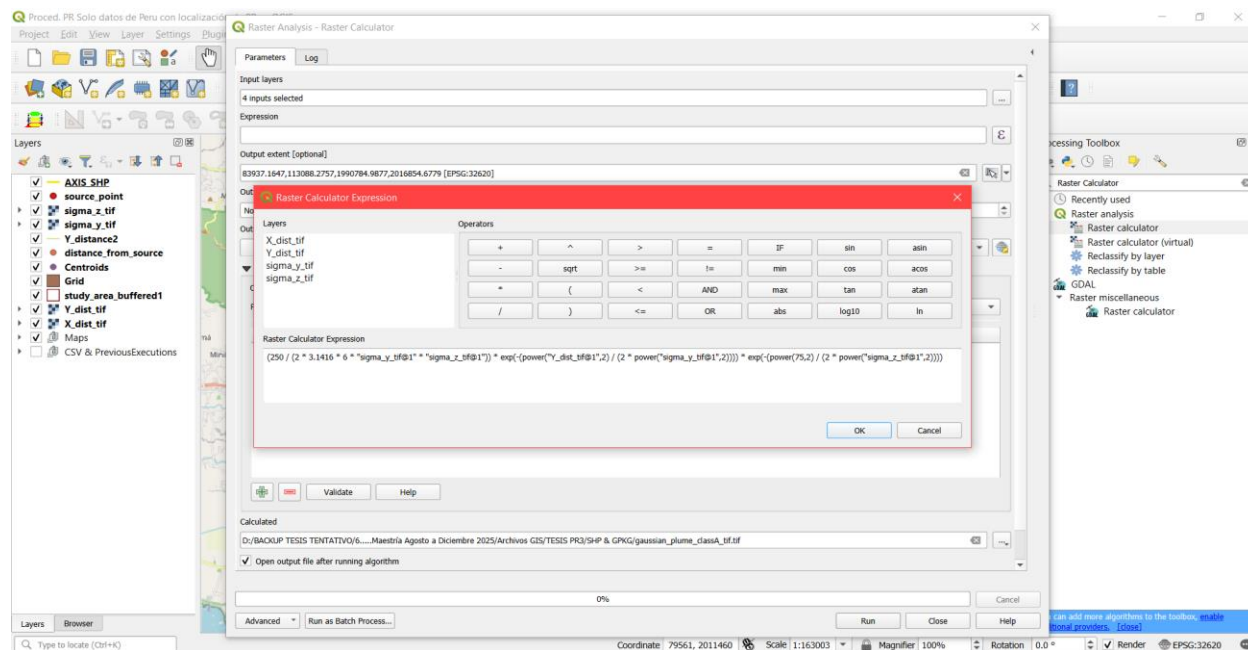
Figura 158

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 159

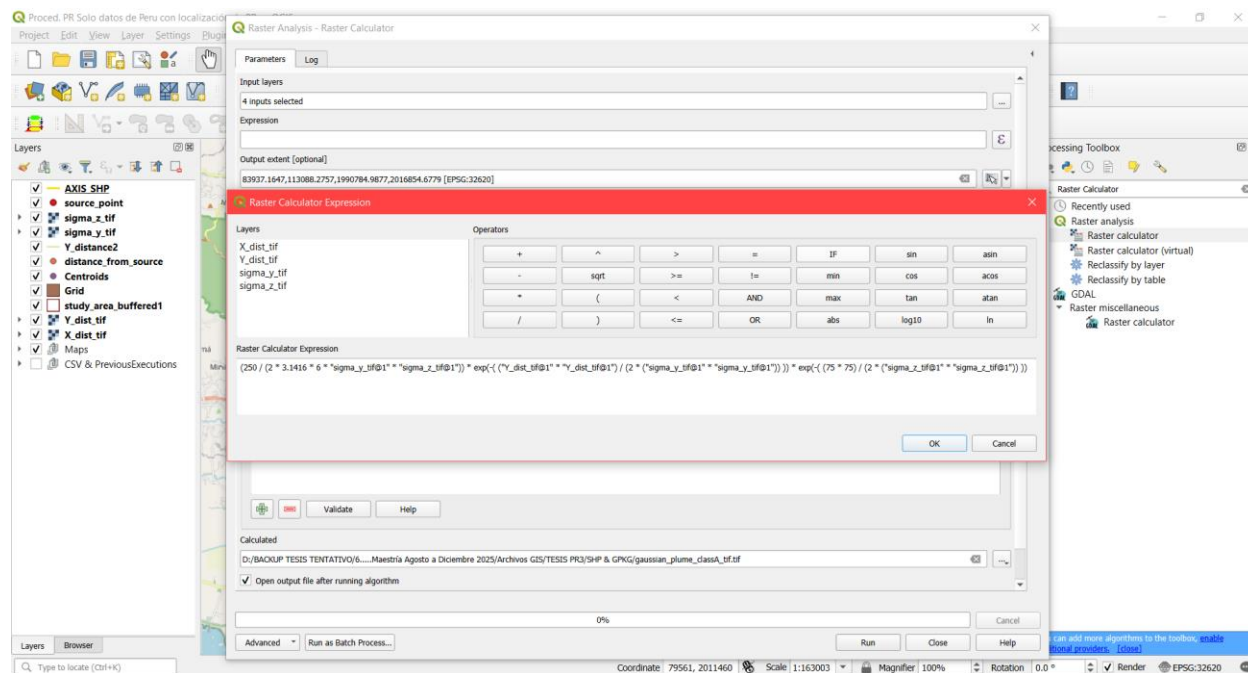
Continuación del Proceso. Produjo error por sintaxis, así que se corrigió la fórmula (solamente) para la ejecución (las demás opciones se quedaron igual). Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 160

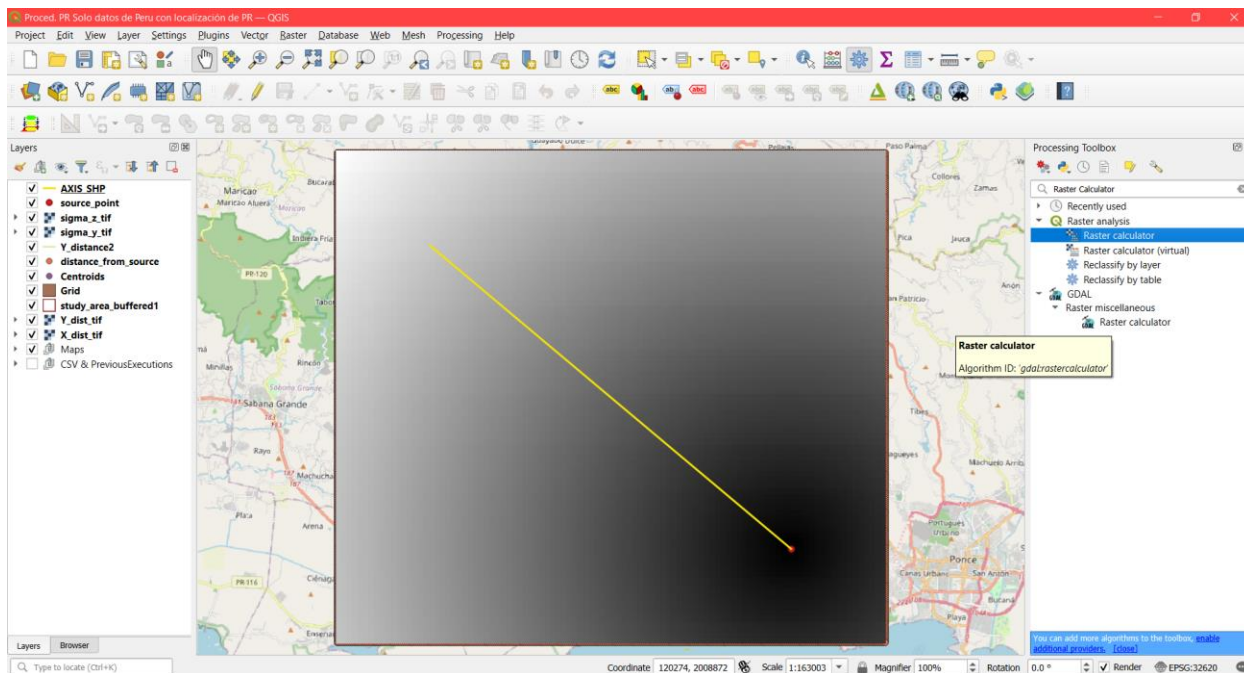
Continuación del Proceso. Produjo error por sintaxis nuevamente, así que se corrigió la fórmula (solamente) para la ejecución (las demás opciones se quedaron igual). Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 161

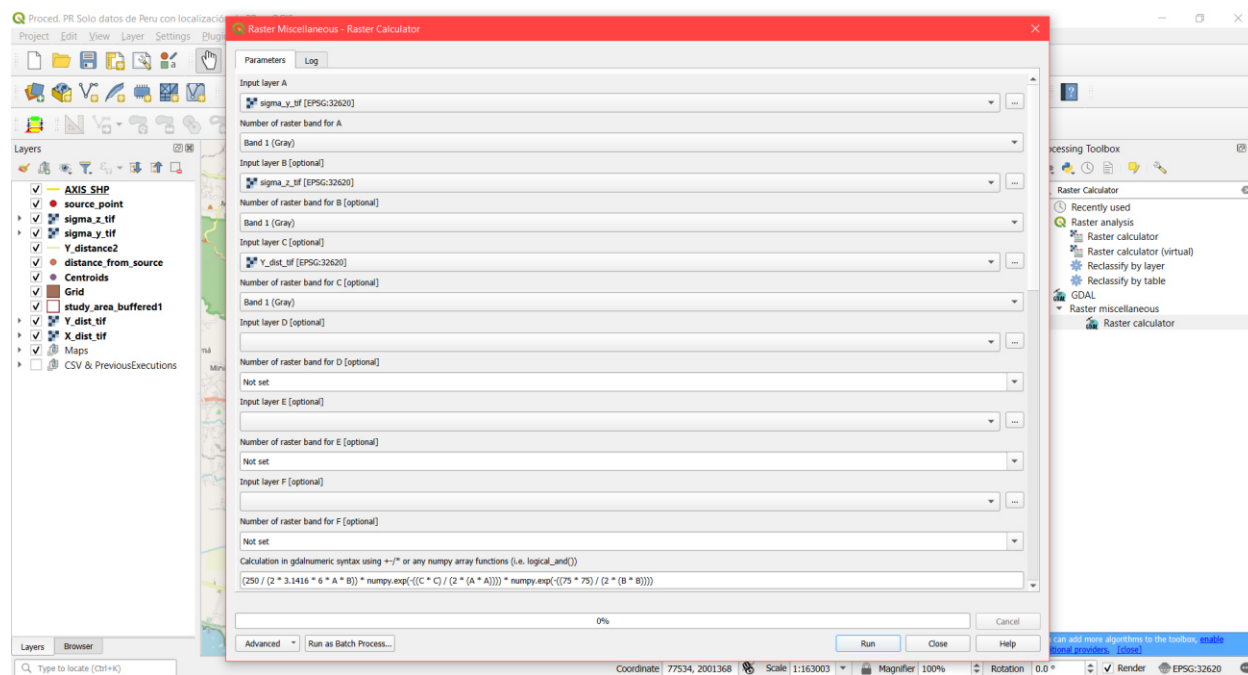
Continuación del Proceso. Se entiende que el problema es la “Raster Analysis Calculator”, ya que, al ser muchas capas, exponentes, y expresiones largas, no funciona. Por tanto, se procedió a cambiar a la “GDAL Raster Calculator”, que es más estable para la matemática compleja.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

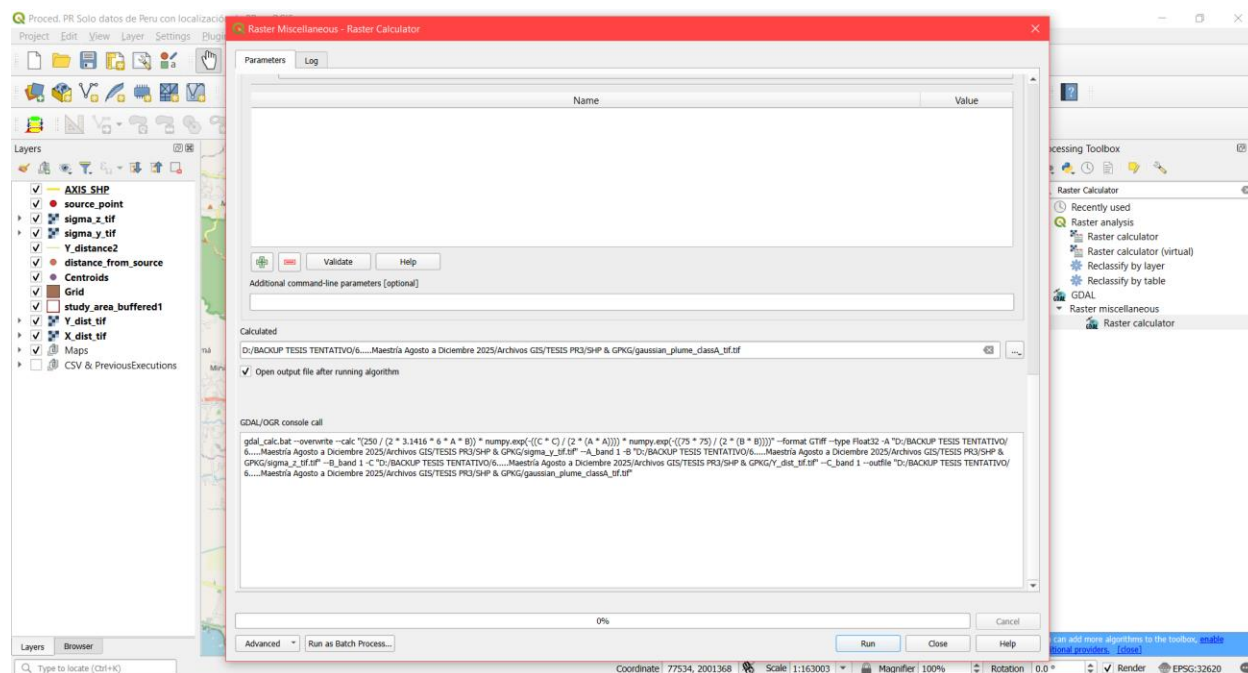
Figura 162

Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 163

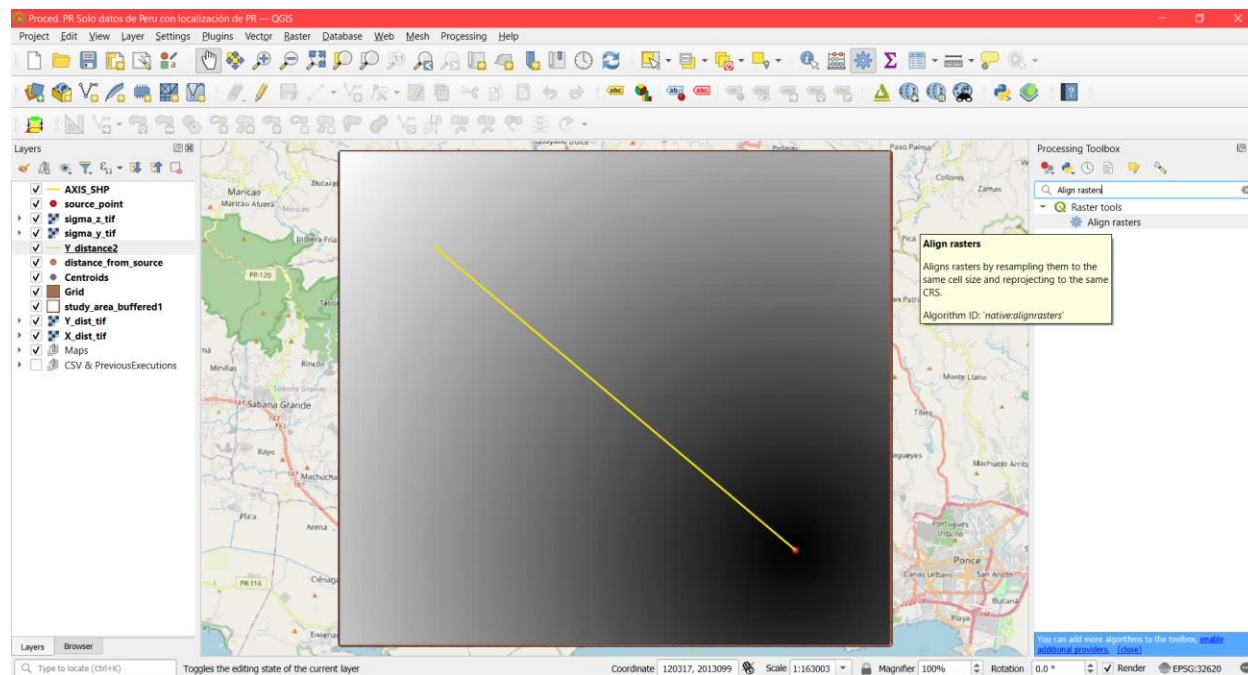
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

La corrida, no se dio, ya que se alega de que hay incompatibilidad con los pixeles (a pesar de que estas selecciones anteriormente en cuanto a pixeles se realizaron de manera cuidadosa), parece que en algún momento QGIS los cambio. Por tanto, antes de realizar este paso, se procedió a “forzar” a todos los “rasters” a coincidir con un “raster” de referencia (en este caso, Y_dist.tif que demostró tener una resolución de pixeles de 100x100). Primero para sigma y y luego para sigma z.

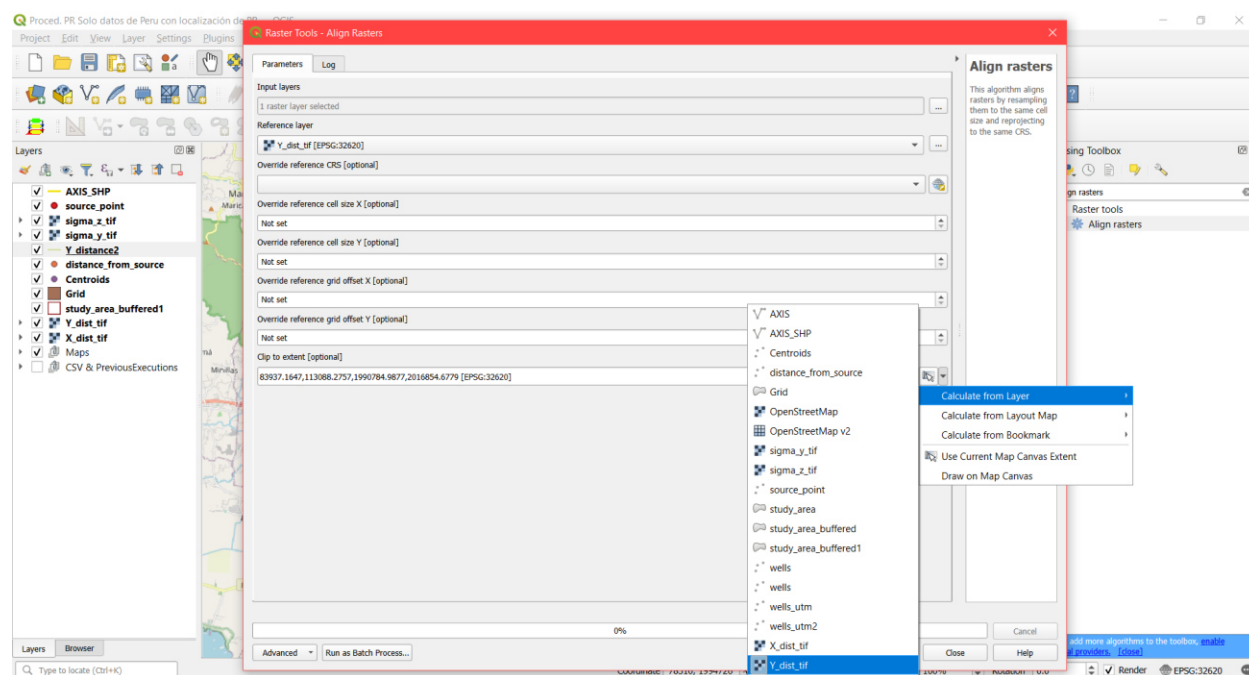
Figura 164

Continuación del Proceso para “Sigma y aligned”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

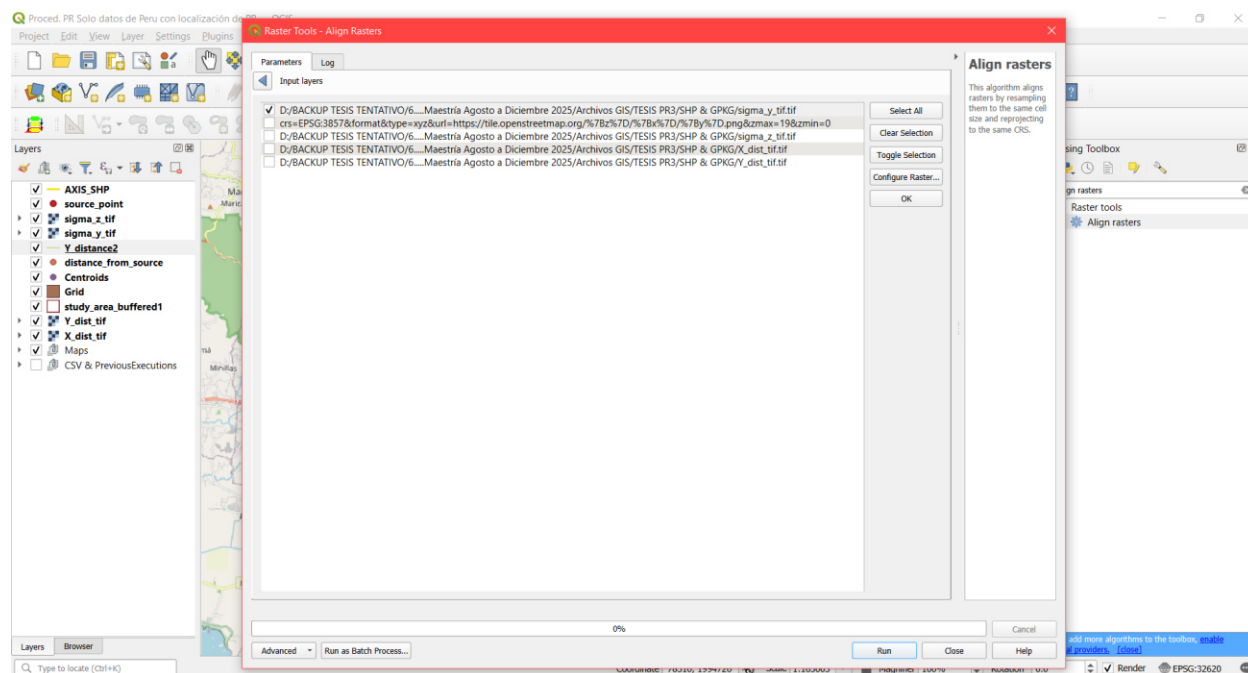
Figura 165

Continuación del Proceso

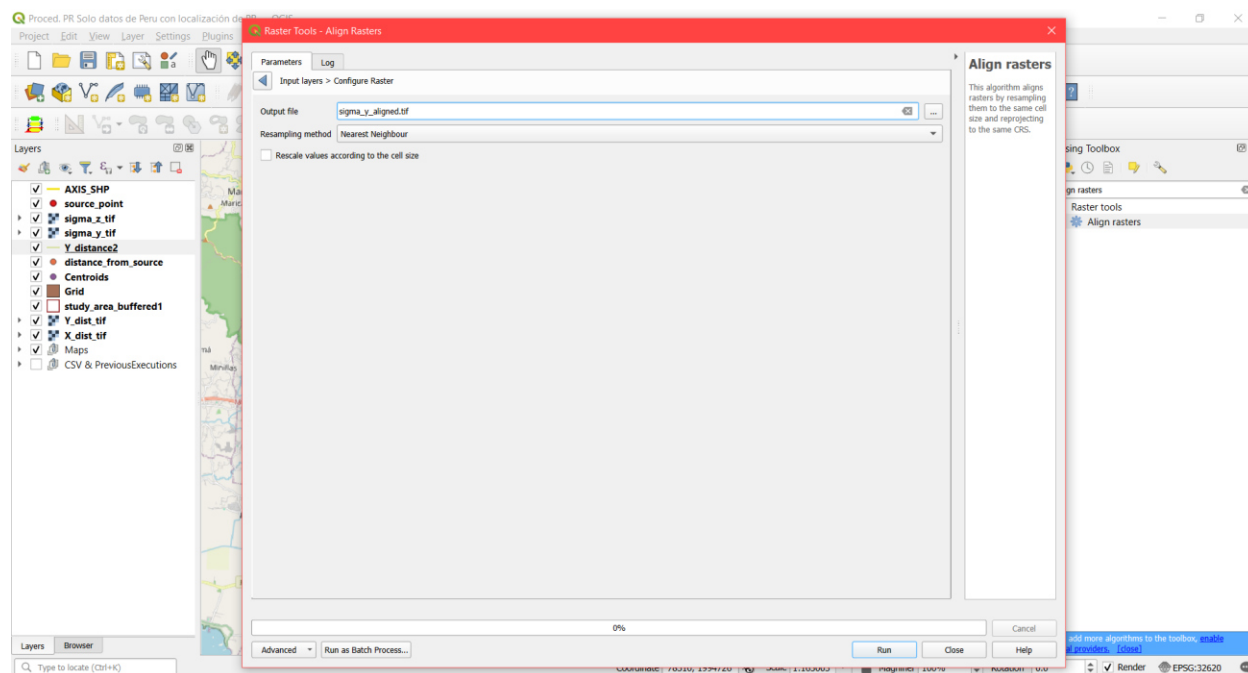
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 166

Continuación del Proceso



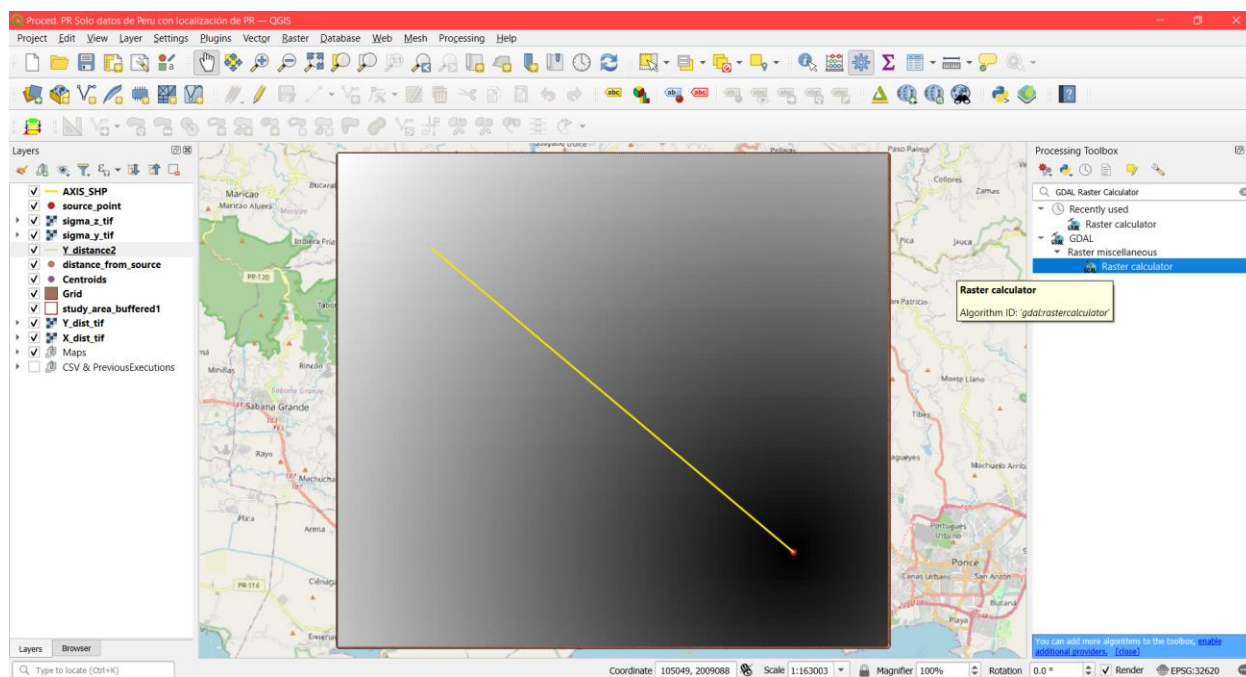
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 167*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Resultó en una corrida exitosa, se procedió a alinear de la misma manera (repetir el proceso) para: $\text{sigma_z_tif.tif} \rightarrow \text{sigma_z_aligned.tif}$ y $\text{Y_dist_tif.tif} \rightarrow \text{Y_dist_aligned.tif}$. Se guardaron en el “file” para el proyecto.

Una vez realizamos esto, regresamos a la “GDAL Raster Calculator”, para realizar el cálculo del modelo gaussiano final.

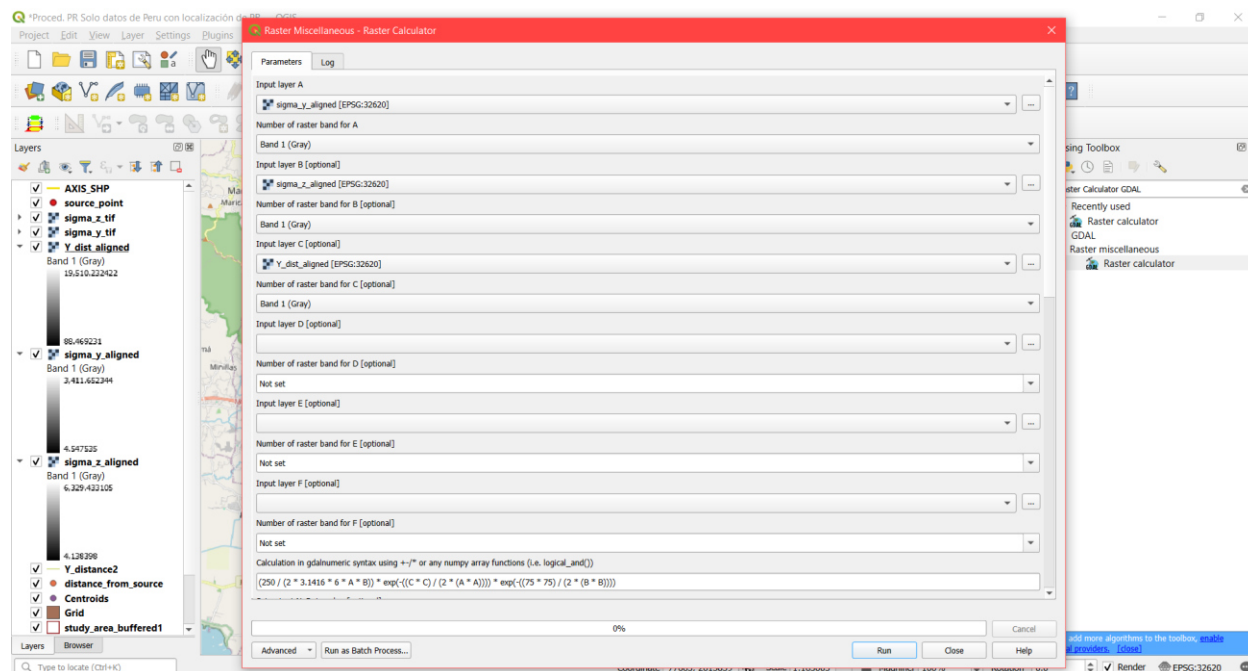
Figura 168*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

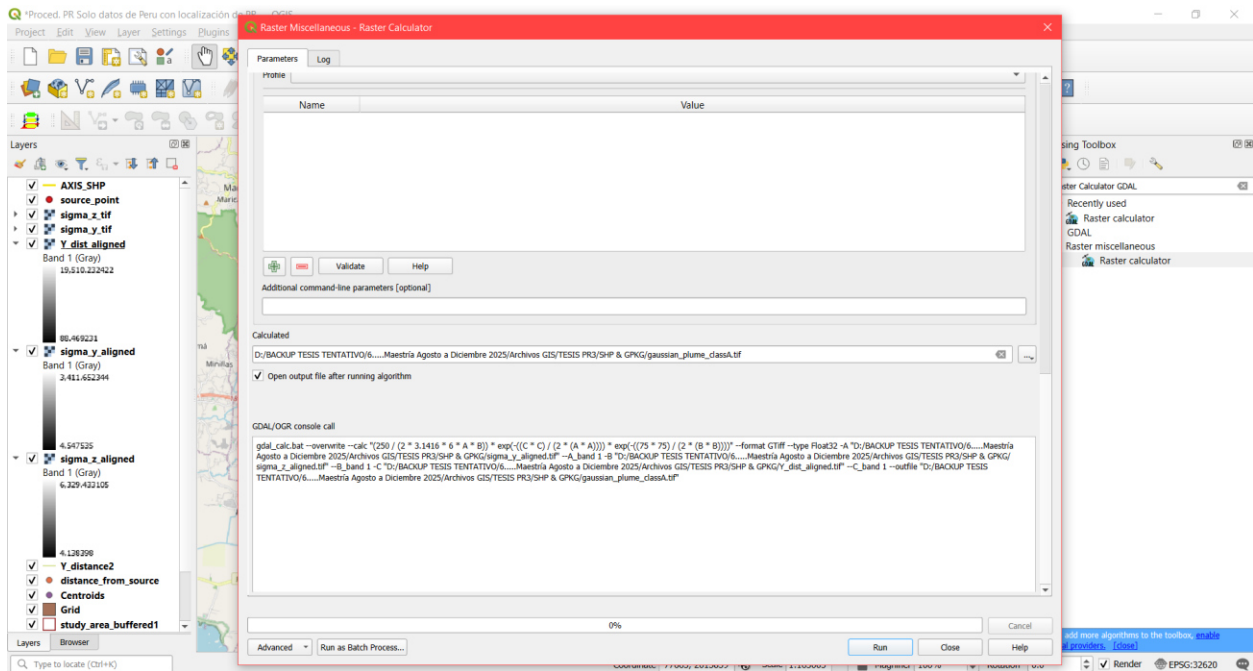
Figura 169

Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla. Como prueba se utilizarán los datos de Perú primero.

Fórmula: $(250 / (2 * 3.1416 * 6 * A * B)) * \exp(-((C * C) / (2 * (A * A)))) * \exp(-((75 * 75) / (2 * (B * B))))$



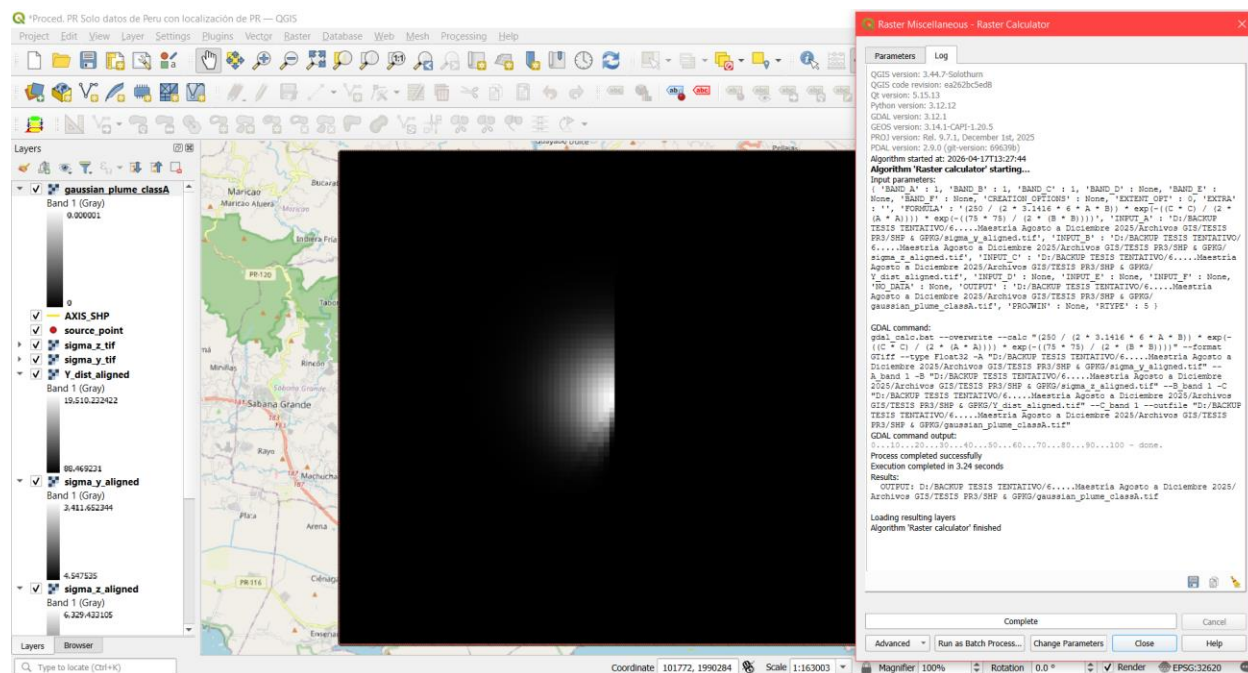
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 170*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 171

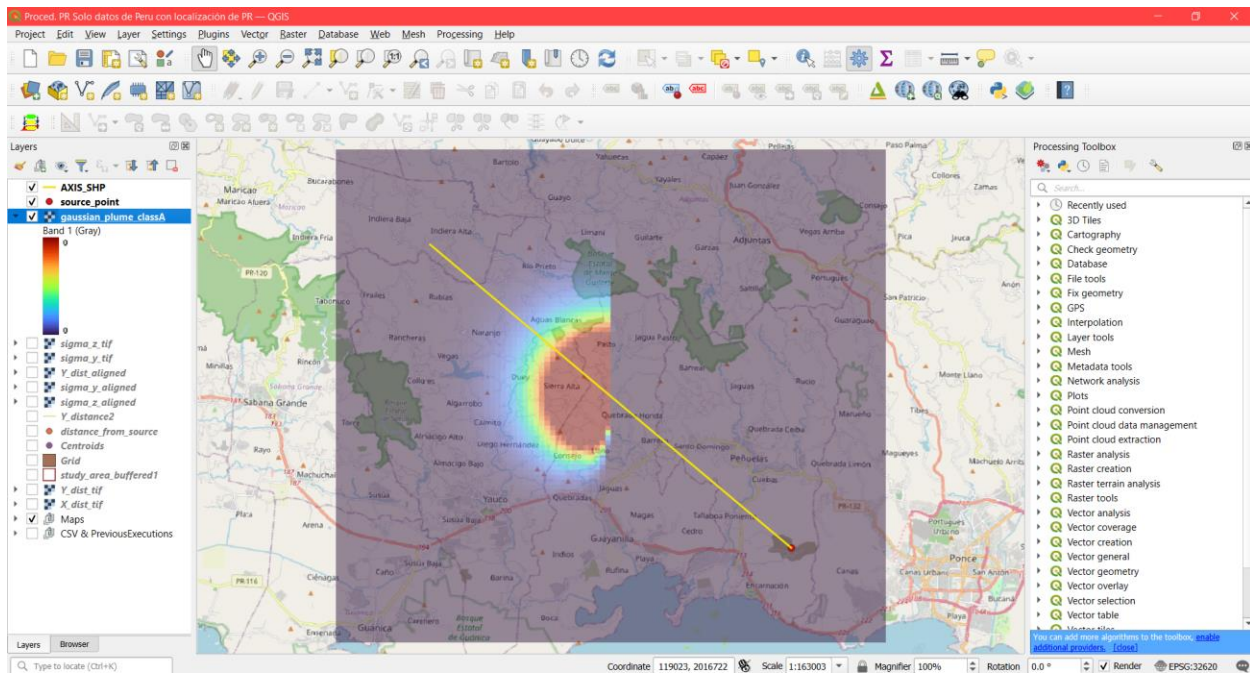
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 172

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Análisis: El comportamiento mostrado es por $Y=0$ por eso se ve de esa manera y no comienza en el “source point”, hay que arreglarlo para $y = \text{source point}$.

Se mostró una corrida exitosa para la dispersión clase A, por el momento observamos un penacho gaussiano de sección cruzada, porque la forma muestra como el modelo gaussiano decae en Y y Z; lo cual hace que se vea una mancha entre circular/ ovalado, lo cual comprueba que al momento solo se está modelando la dispersión en Y y Z solamente (y utilizando la distancia en Y), pero al momento no a lo largo de X (“downwind direction”). La limitación se centra en la fórmula utilizada (para asegurar que QGIS procesara los cálculos matemáticos de

parte en parte, ya que mostro un comportamiento inestable en cuanto a los cálculos). Utilizando los datos del tutorial la fórmula utilizada fue la siguiente:

$$(250 / (2\pi * 6 * \sigma_y * \sigma_z)) * \exp(-(y^2 / 2\sigma_y^2)) * \exp(-(H^2 / 2\sigma_z^2))$$

Se puede observar que la distancia en términos de X, es la faltante, Por tanto, no hay transporte (“downwind”), el penacho no se alarga y se ve como una mancha y no un penacho todavía.

Siendo así, se procedió a añadir la distancia en X (pero como lo realizado anteriormente de hacer coincidir (“aligned”) los pixeles para que la fórmula se pueda producir y a su vez se produzca la visualización). Por tanto, más adelante se mostrará la fórmula utilizada para esto. El procedimiento se retomará en la **página 220**, ya que lo que verán a continuación como **paréntesis** forma parte de pruebas y errores que se realizaron, antes de reconocer que se estaba intentando arreglar capas que ya estaban realizadas de manera correcta. Por tanto, se ignora el **paréntesis** y se retoma el procedimiento en la **página 220**.

(Comienza Paréntesis)

Se recalca: *lo que verán a continuación como **paréntesis** forma parte de pruebas y errores que se realizaron, antes de reconocer que se estaba intentando arreglar capas que ya estaban realizadas de manera correcta o que fueron actualizadas o creadas fuera del paréntesis, para que el modelo resultara exitoso.*

Ahora se procedió a “aligned” la distancia de X

No se puede utilizar la $X_distance$ que se tiene al momento porque es un raster no valido que produce distancia radial y no dirección en si, el modelo gaussiano debe incluir a X (“downwind distance”, ya sea positivo o negativo) y Y (“crosswind distance”).

Entre este paso se correrá una parte del modelo gaussiano *básico*, pero se debe recordar que antes de correrlo se debe “align rasters” para que la resolución de los pixeles no sean un problema luego al aplicar la fórmula gaussiana.

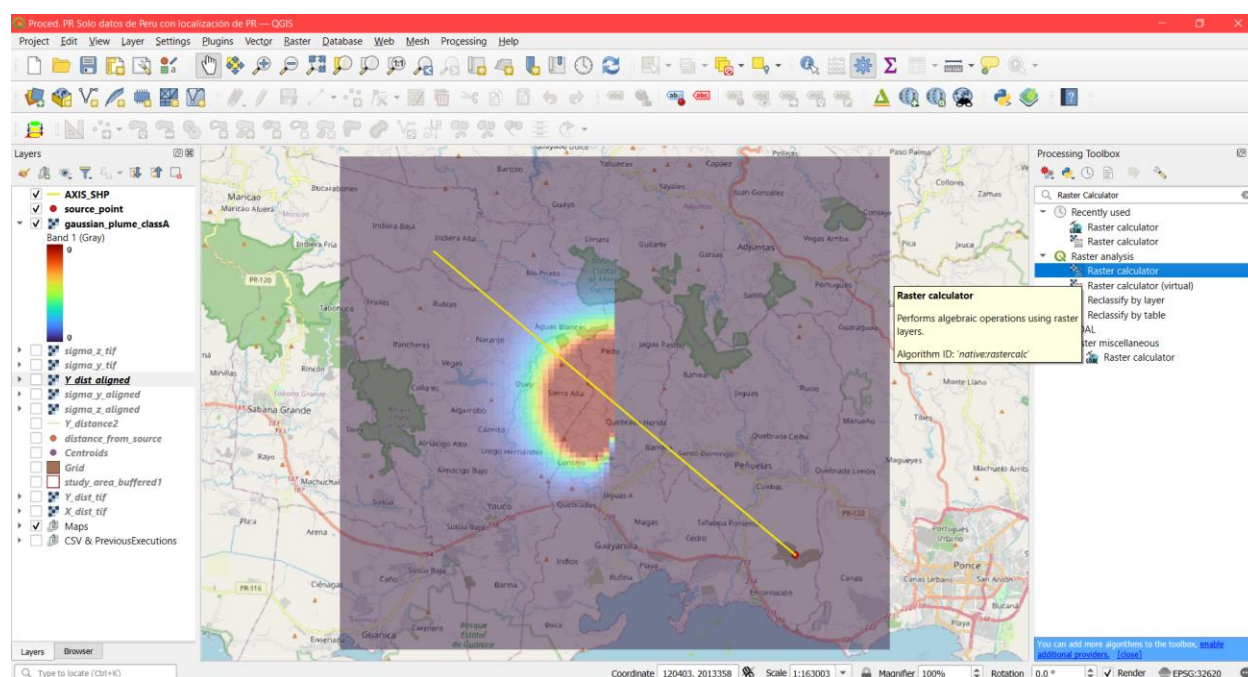
Luego de esto (arreglar la geometría), se puede proceder a realizar una corrección para los componentes físicos, que son sigma y (con X) y sigma z (con X) (ya que estos no deben estar como rasters, si no, como funciones de X (basándose en Pasquill-Gifford), para que el modelo no este incompleto), para que el comportamiento de dispersión sea físicamente correcto (estos componentes determinan hacia donde se mueve el penacho). Es importante saber, que esto se debe realizar, luego de arreglar X y Y, discutido anteriormente, ya que si no se realiza de esta manera la dispersión aparecerá en direcciones erroneas.

Entre este paso se correrá una parte del modelo gaussiano *avanzado o de fisica correcta*, pero se debe recordar que antes de correrlo se debe “align rasters” para que la resolución de los pixeles no sean un problema luego al aplicar la fórmula gaussiana final.

Para todos estos se utilizará la misma capa de referencia, para que no se produzcan errores luego en la fórmula en cuanto a resolución de los pixeles, se puede escoger entre “Y_dist_aligned” o “sigma-y_aligned”, para efectos del próximo procedimiento se utilizó el primero mencionado.

Figura 173

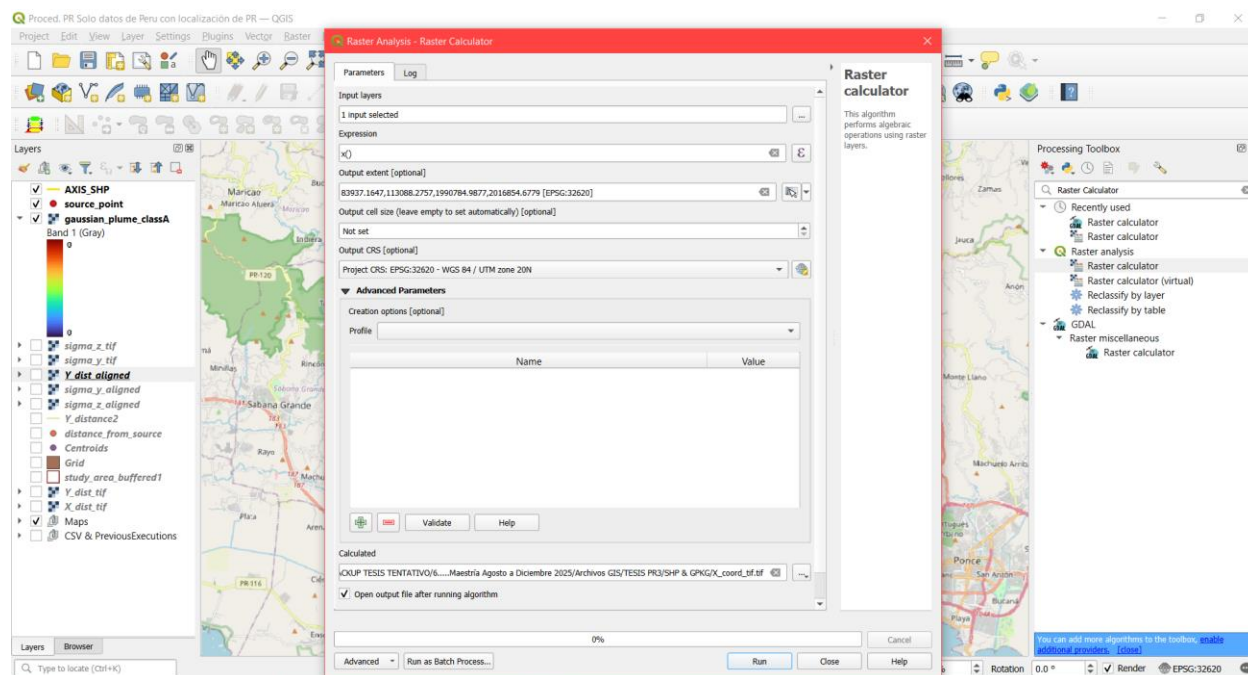
Crear el raster “X_coord” (de coordenadas)



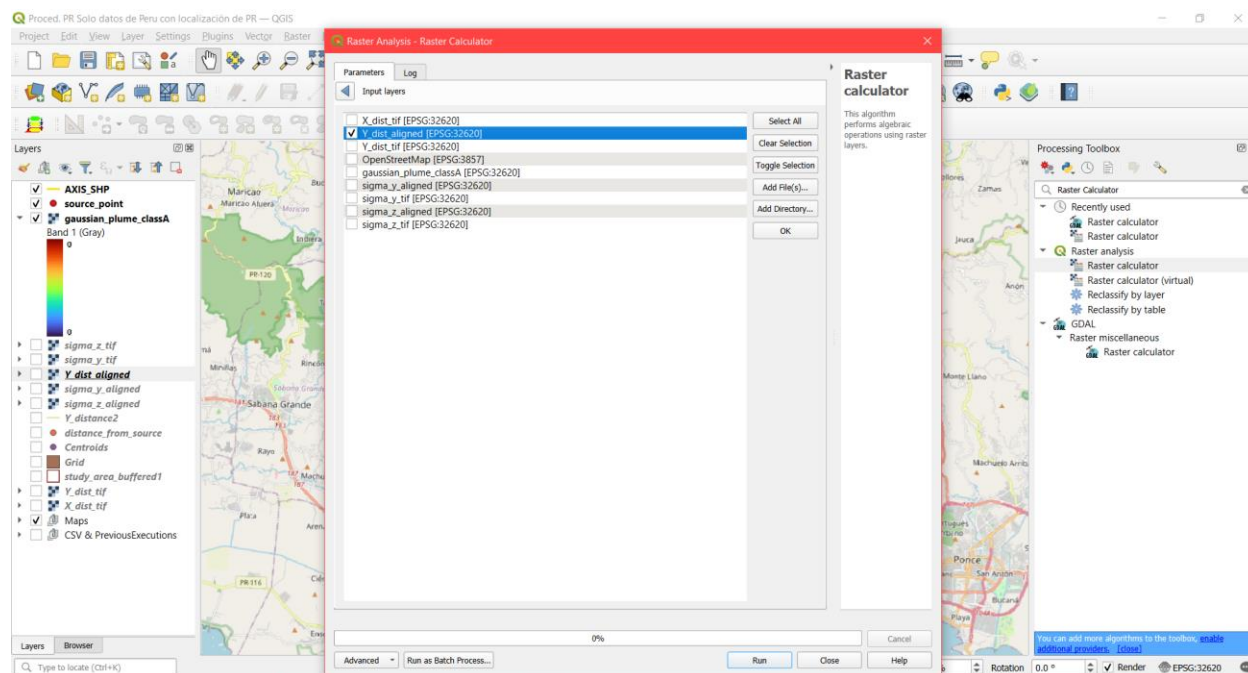
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 174

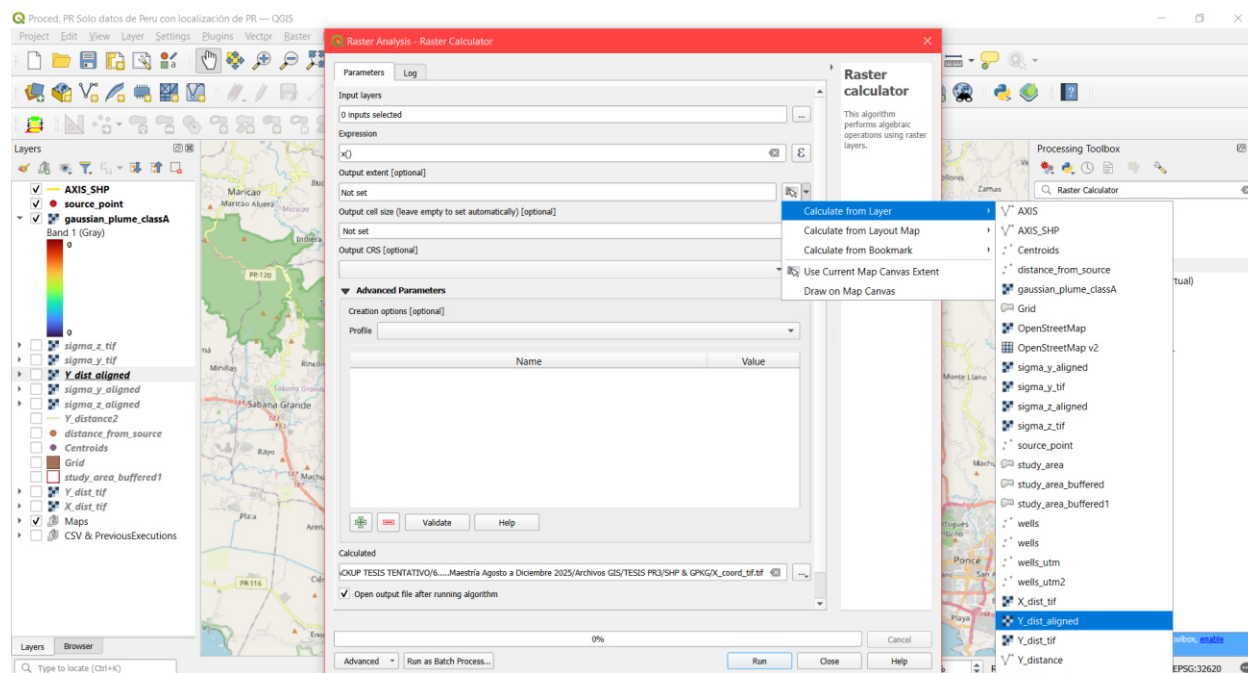
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 175*Continuación del Proceso*

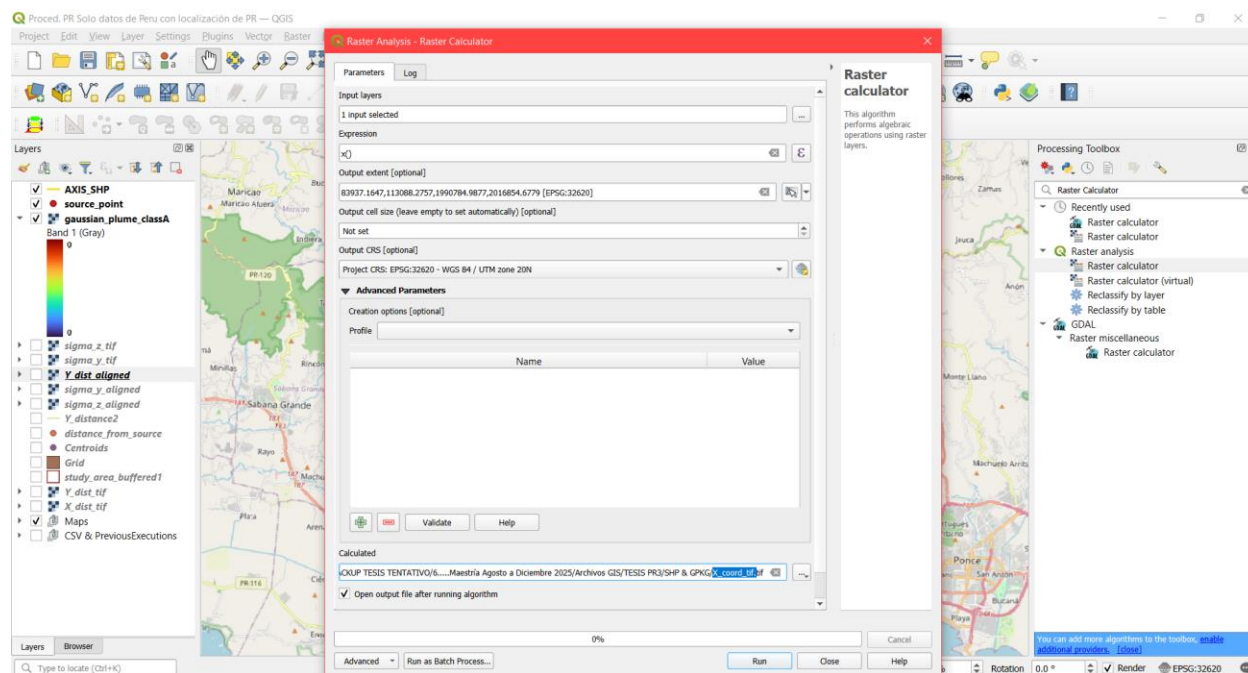
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 176*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 177

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Parece, que se utilizó la calculadora incorrecta, se procedió a escoger la correcta.

Se intento las demás calculadoras, sin embargo, se experimentó la presencia de un “bug” que la versión de QGIS con la que se está trabajando tiene. La misma se manifiesta en no permitir que las calculadoras reconozcan o validen las expresiones (ejemplo como las descritas: $x()$ y $y()$).

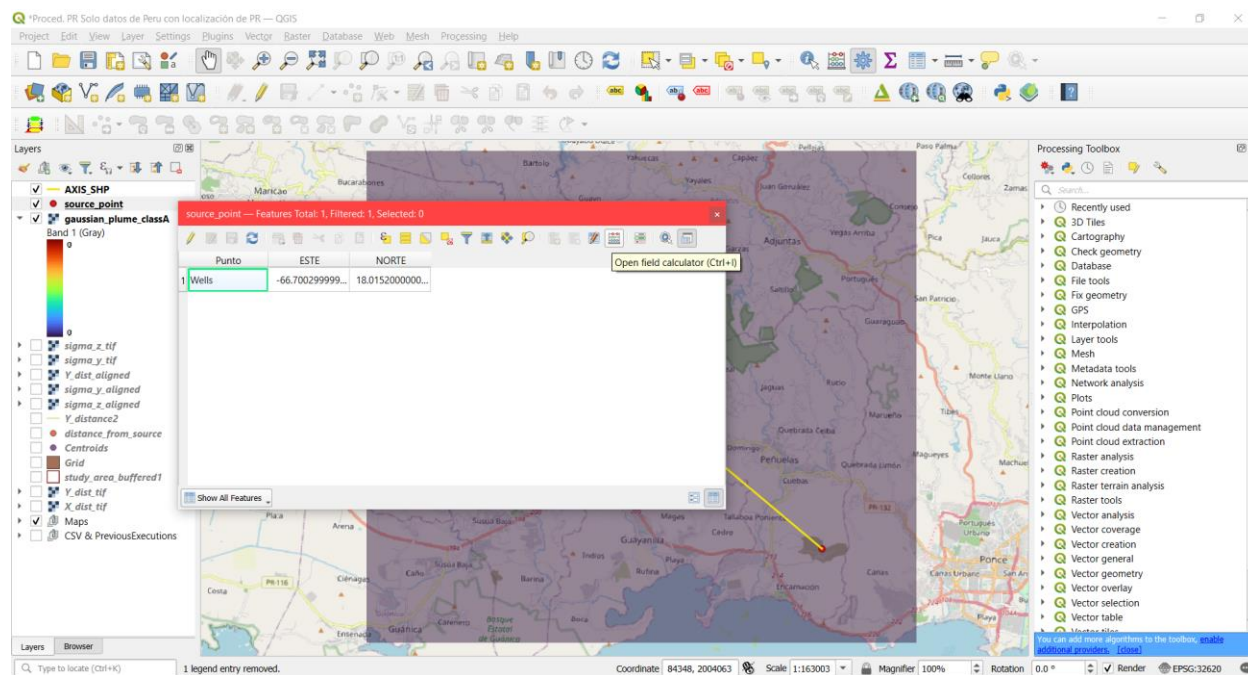
Al tener que resolver esto, se procedió a crear las distancias directamente del “source_point”, que científicamente hablando evita este tipo de error. Ahora, las llamaremos “X_dist and Y_dist”.

Primero obtendremos las coordenadas del “source point”.

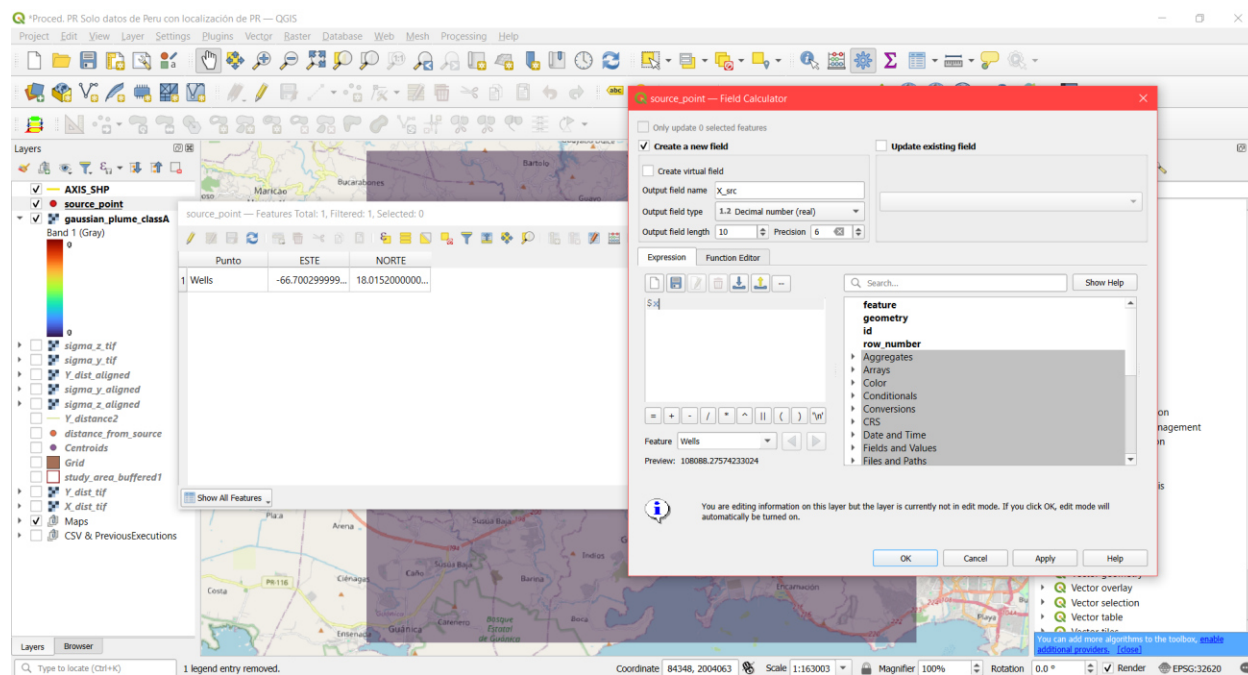
Obtener las coordenadas directamente de la tabla de atributos, no funciona ya que, las coordenadas deben estar en metros. Se procedió a buscarlas con el “Field Calculator”, icono que se encuentra desde la tabla de atributos.

Figura 178

Continuación del Proceso



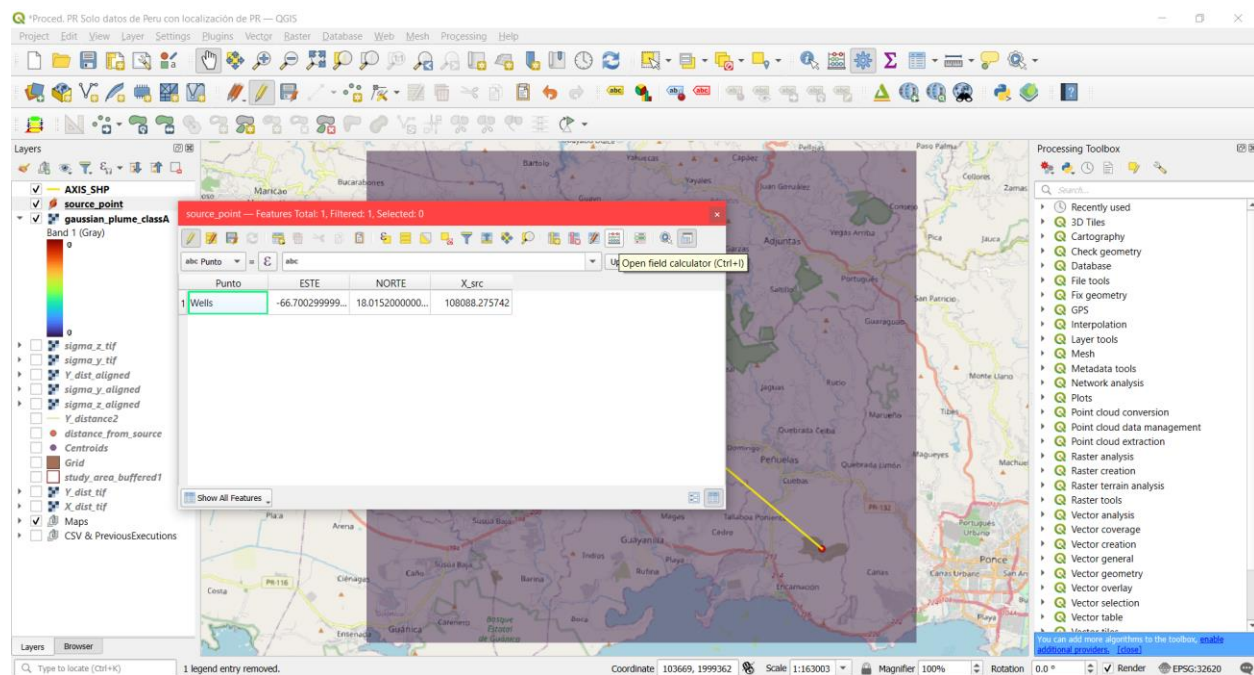
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 179*Continuación del Proceso*

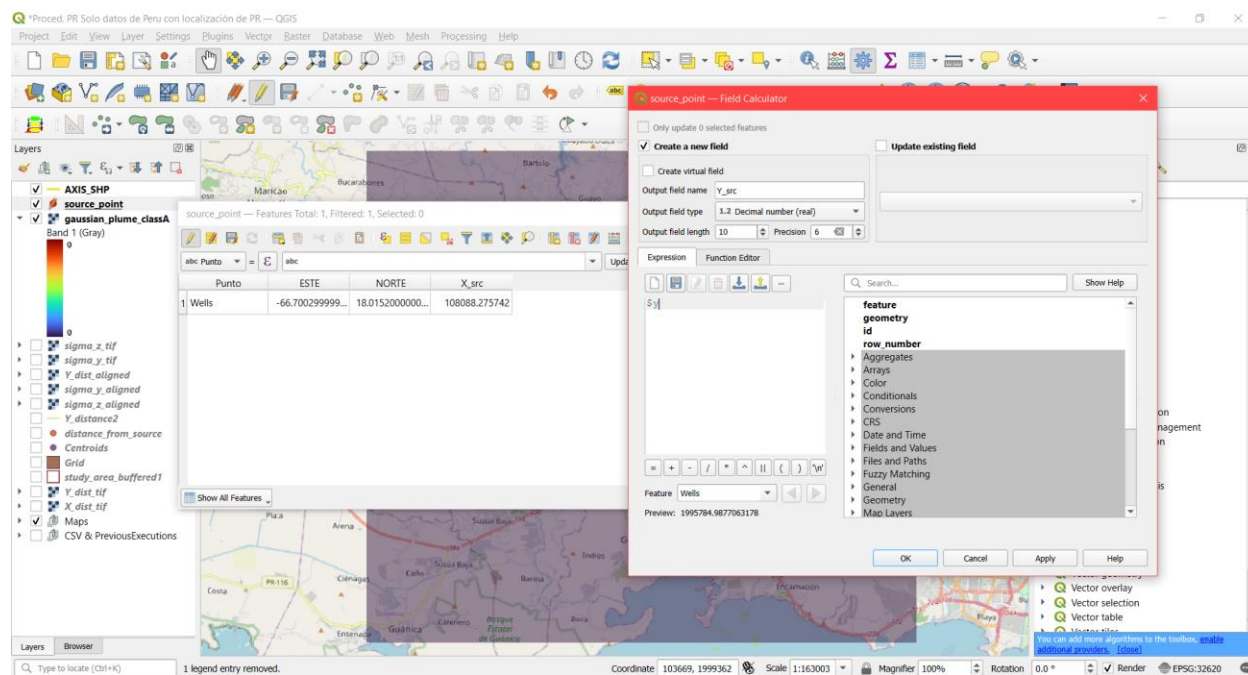
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 180

Continuación del Proceso



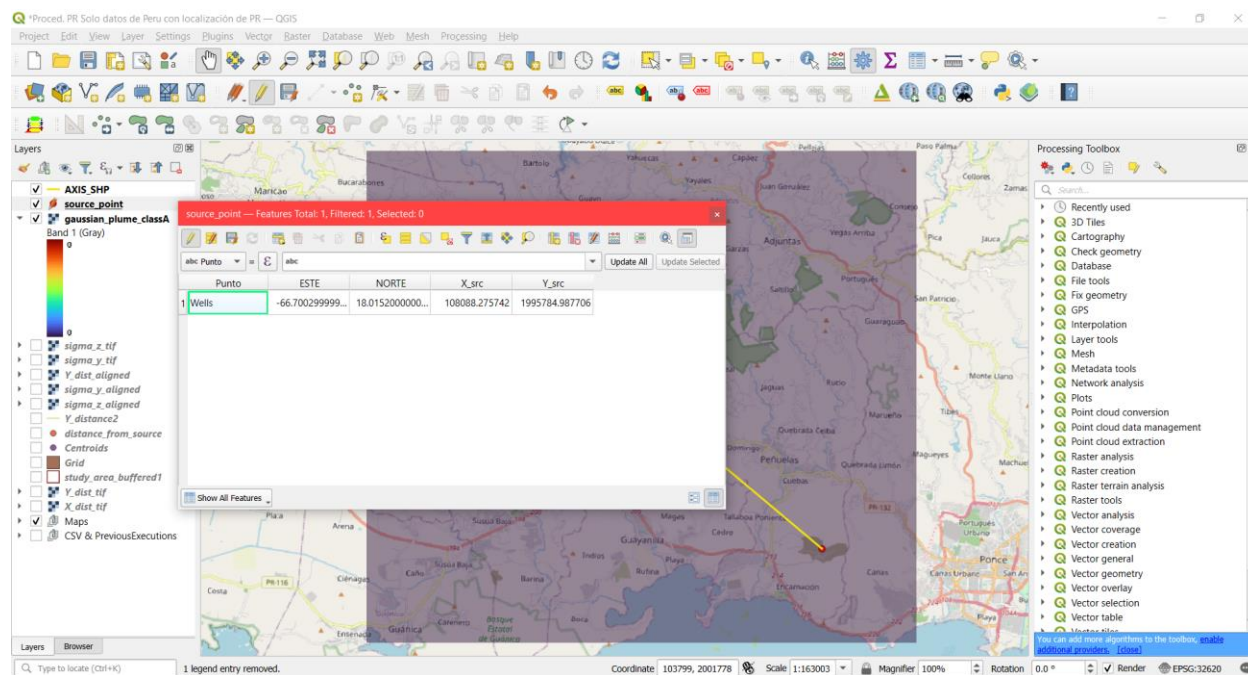
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 181*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 182

Continuación del Proceso

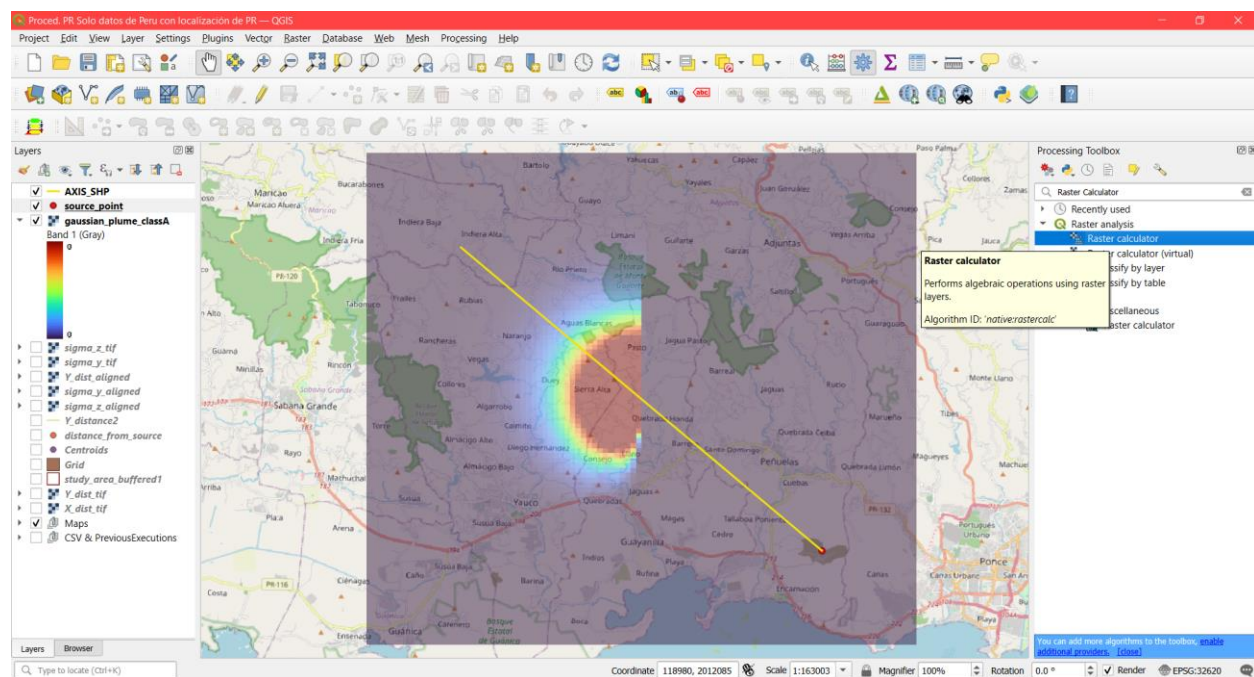


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Ya realizado esto, se continua con la tarea inicial de este paso que era (para arreglar la dirección del penacho y el origen (que es algo que no se explica en el tutorial)), la creación de la capa “X_coord” (“raster”) y las demás a continuación.

Figura 183

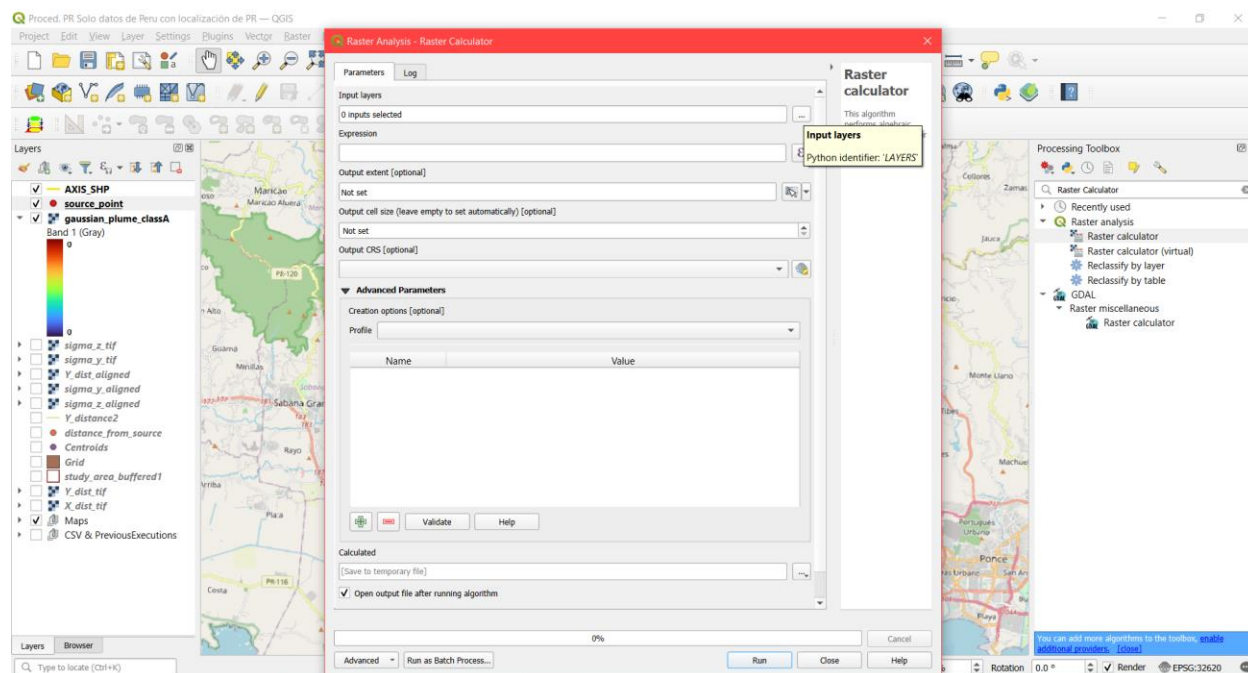
Proceso para la creación de “X_coord” (“raster”)



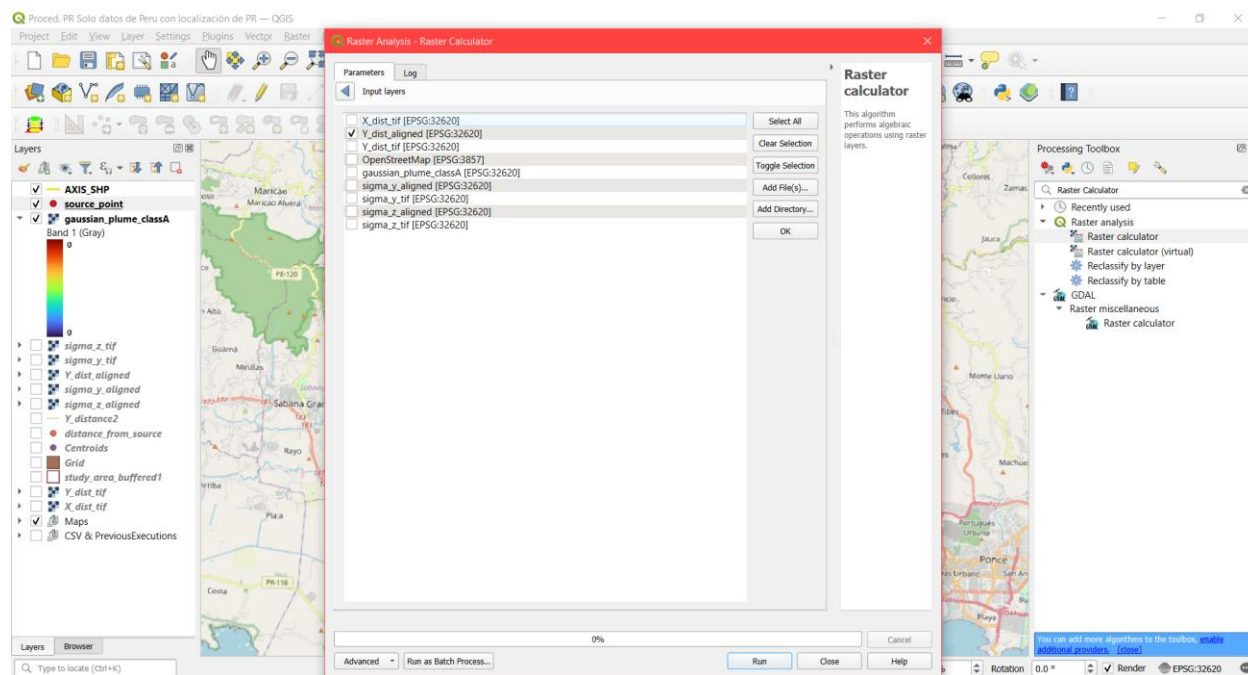
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 184

Continuación del Proceso

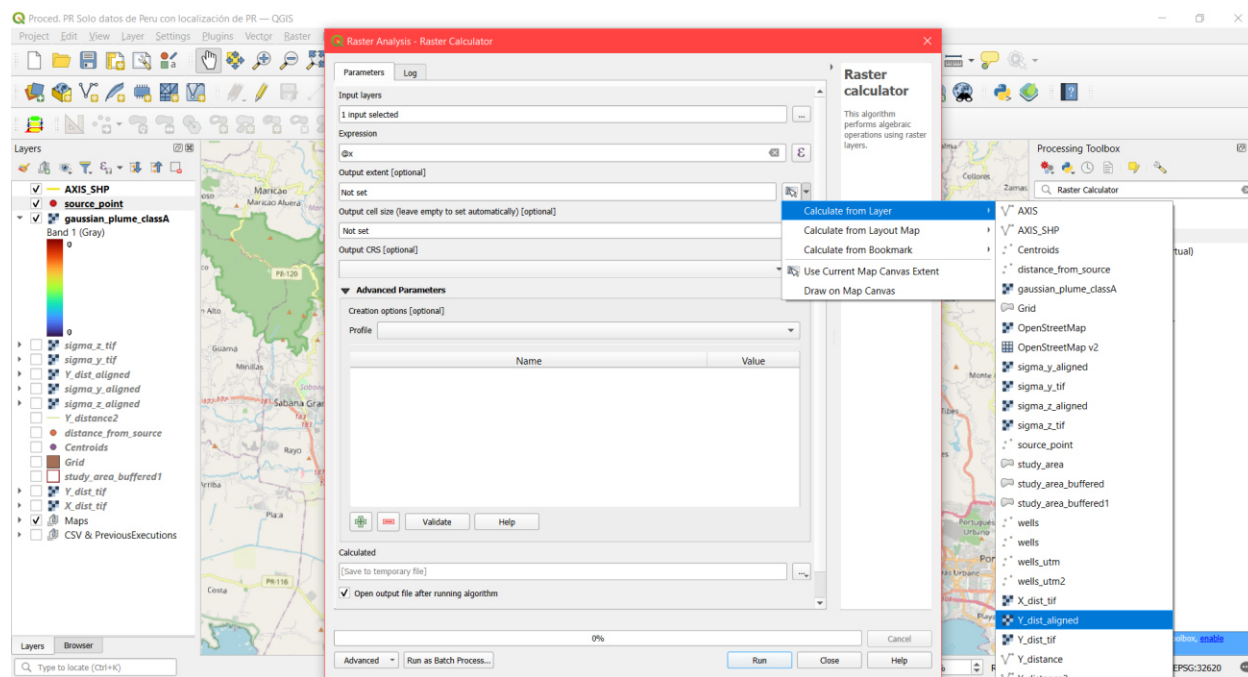


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 185*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

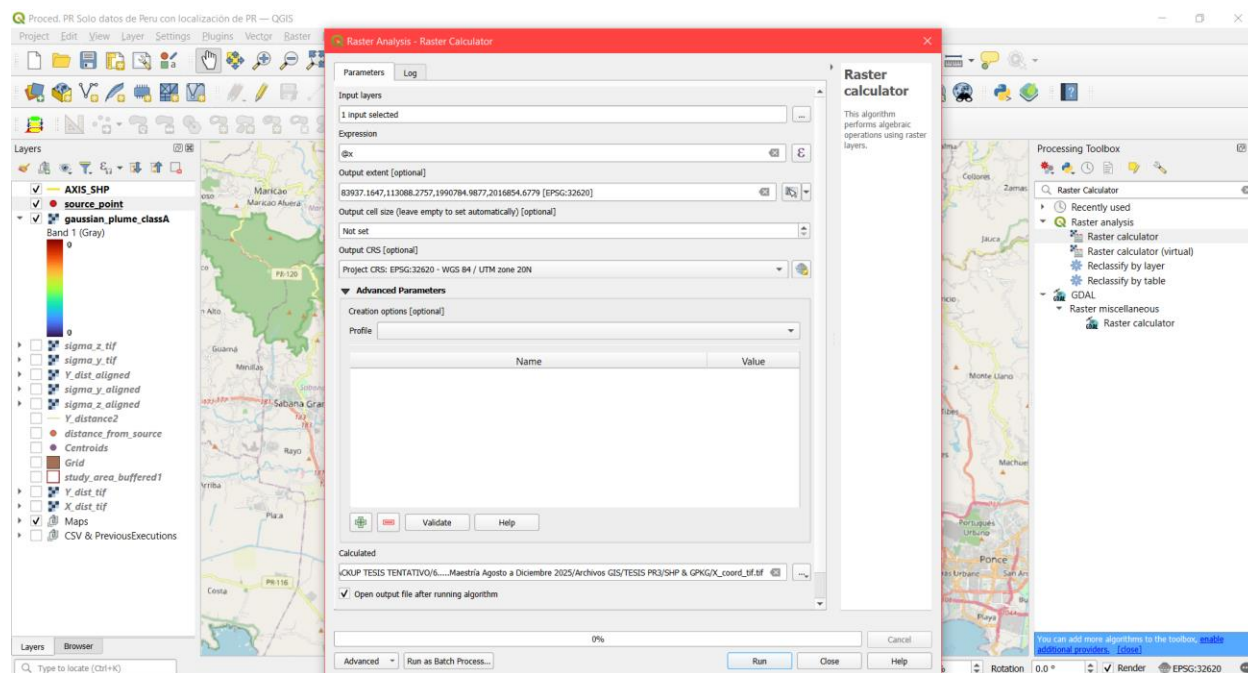
Figura 186

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 187

Continuación del Proceso



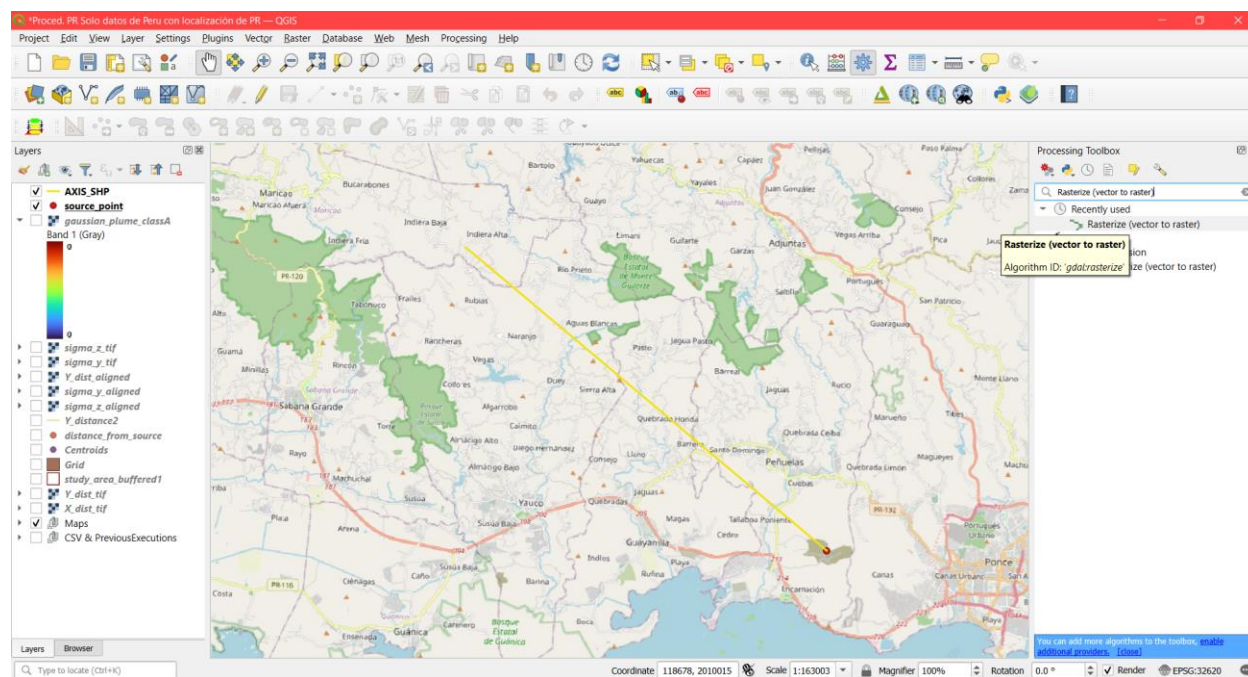
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Resultado en que la versión de QGIS, no puede procesar este cálculo (@x), por tanto, se procedió a buscar un método alternativo (no con calculadora). Luego de verificar si se podía utilizar un método alternativo se concluyó que la utilización de la calculadora, con unos cambios en la fórmula y los “input files”, podía ser utilizada.

Se procedió a cambiar uno de los “input files”.

Figura 188

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

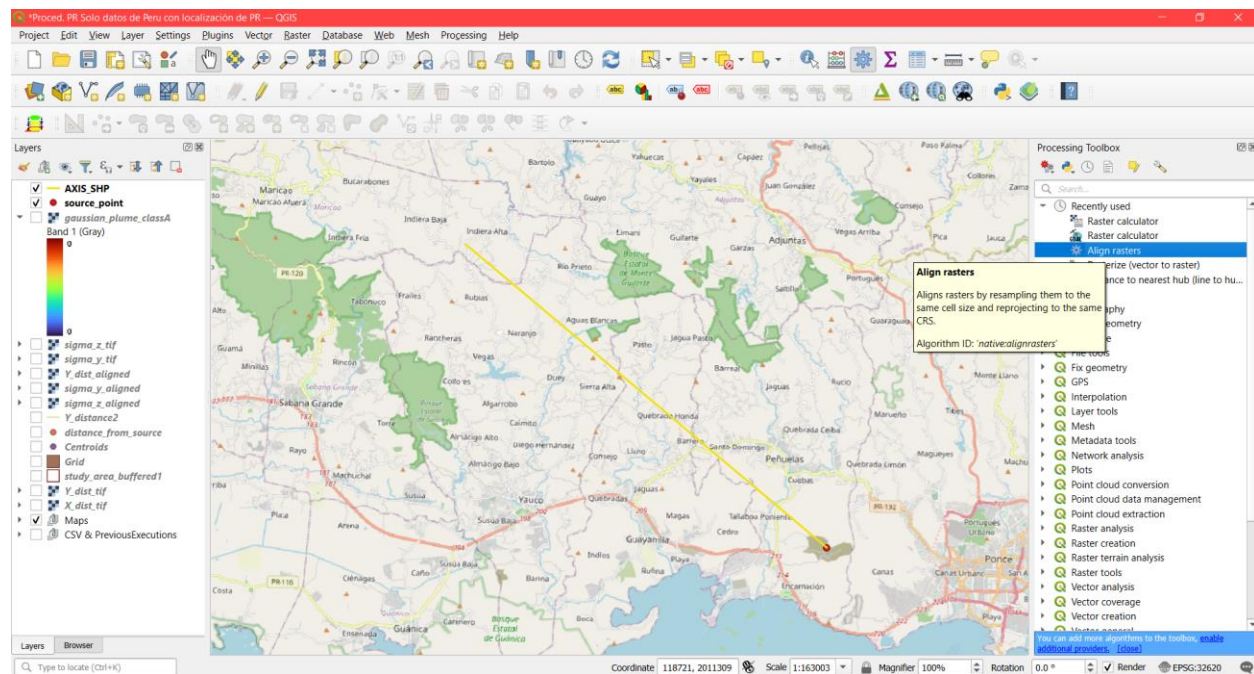
Nota aclaratoria: Antes de proseguir se analizó que lo que se estaba intentando de corregir, ya estaba correcto y se prosiguió fuera del paréntesis, continuando el procedimiento de la manera mas apropiada.

(Culmina Paréntesis)

Se retoma el procedimiento:

Figura 189

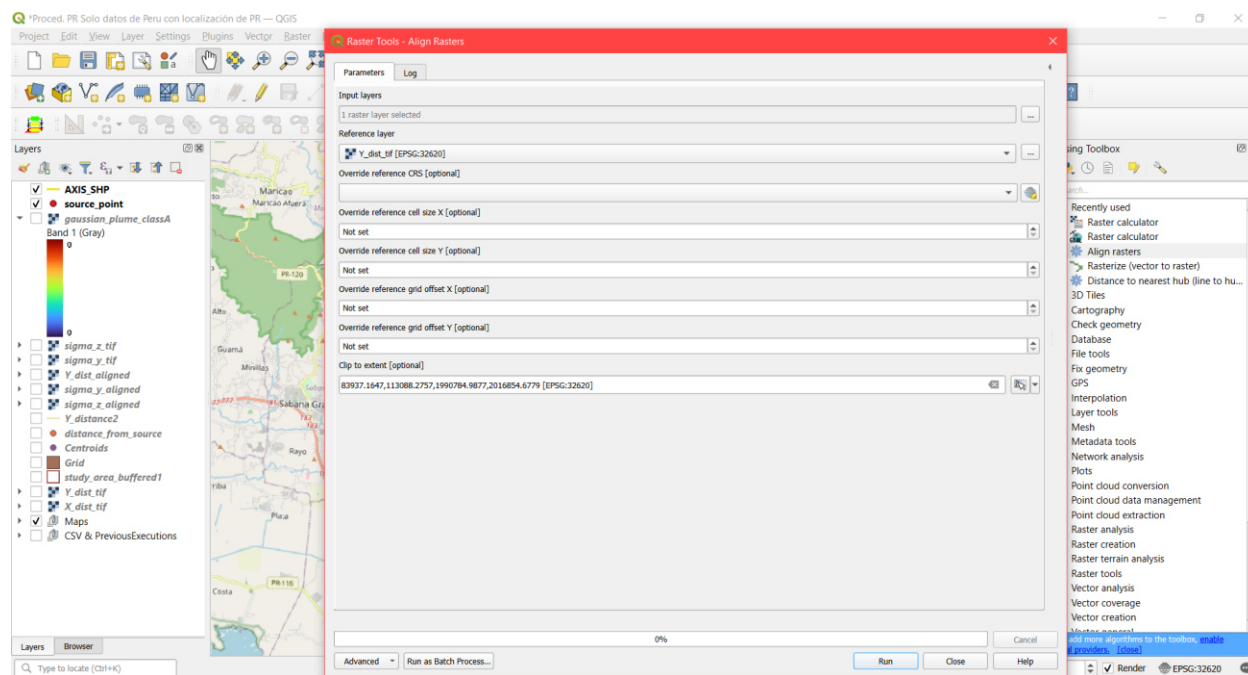
Continuación del Proceso. Creación de “X_dist_aligned.tif”. De la misma manera que se creó sigma y aligned y los anteriores



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 190

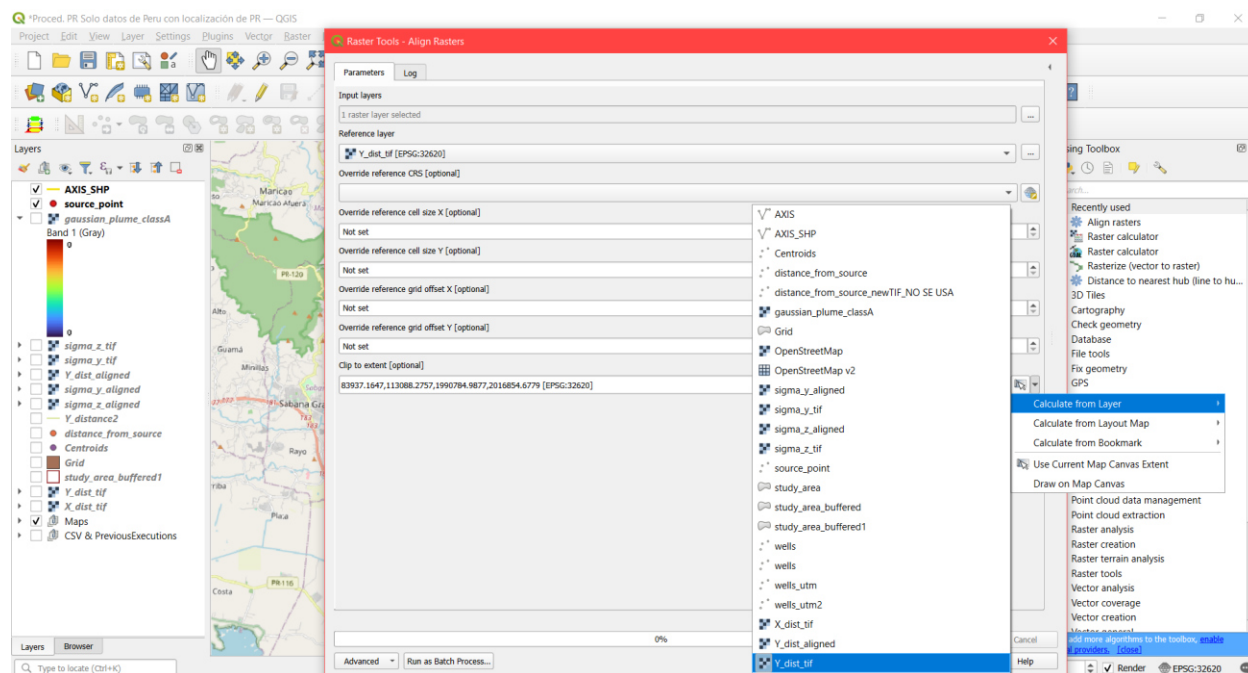
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 191

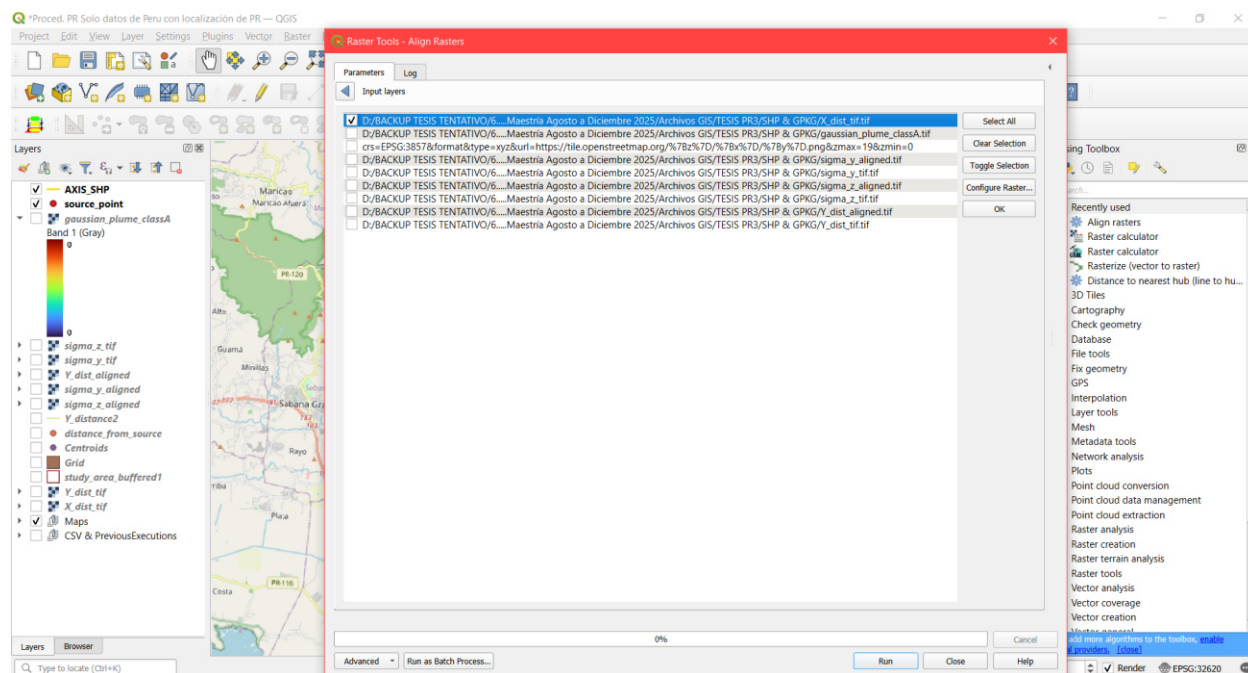
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 192

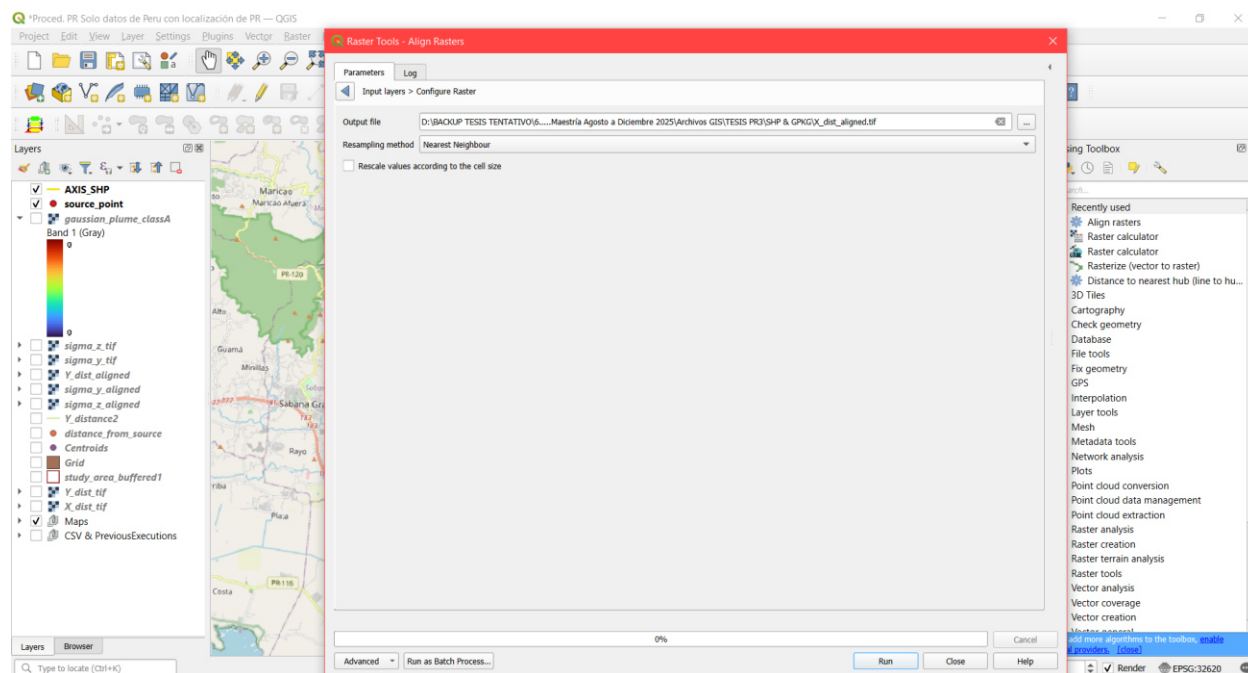
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 193

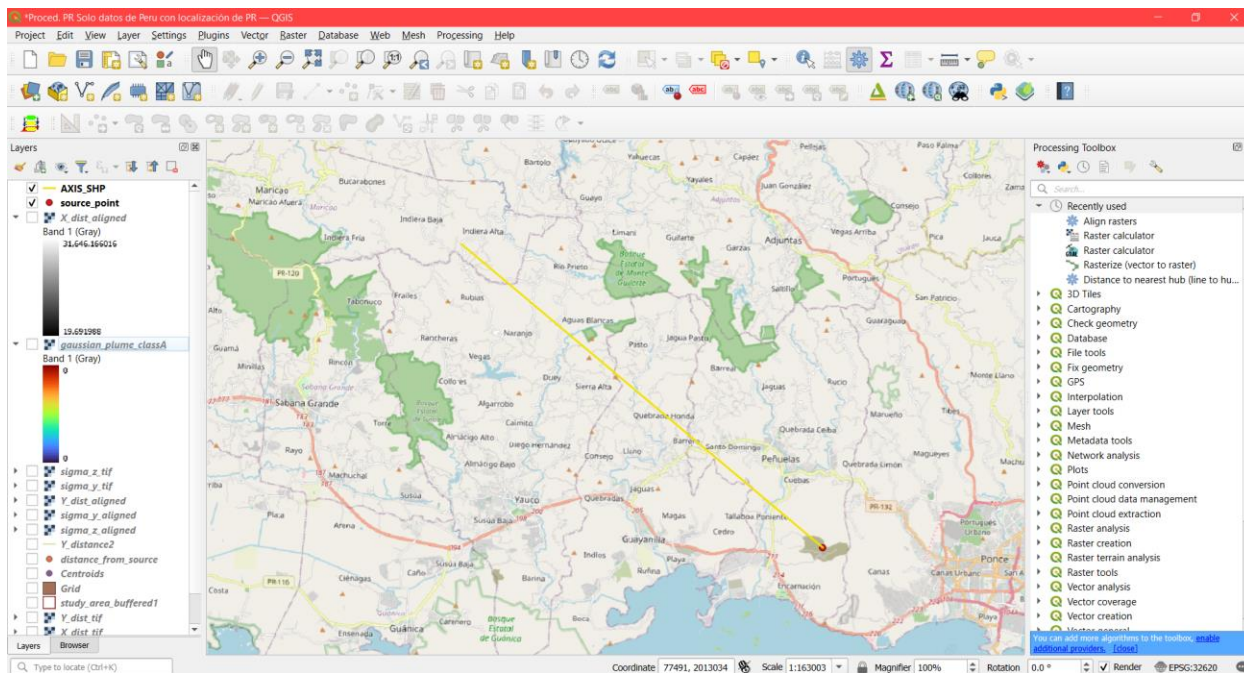
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 194

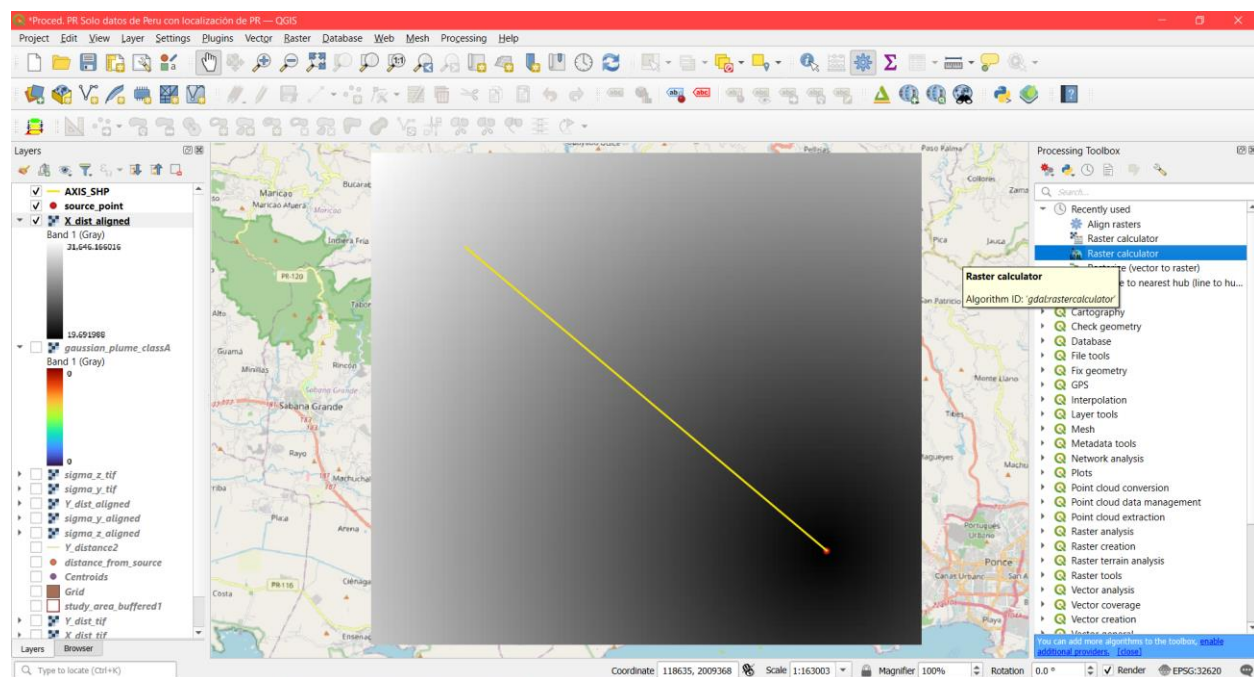
Continuación del Proceso. Como el “layer” no se visualizaba, se añadió desde la carpeta que se había guardado (add raster layer). Del cual se produjo una corrida exitosa, por tanto, a continuación, se procedió con la fórmula.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

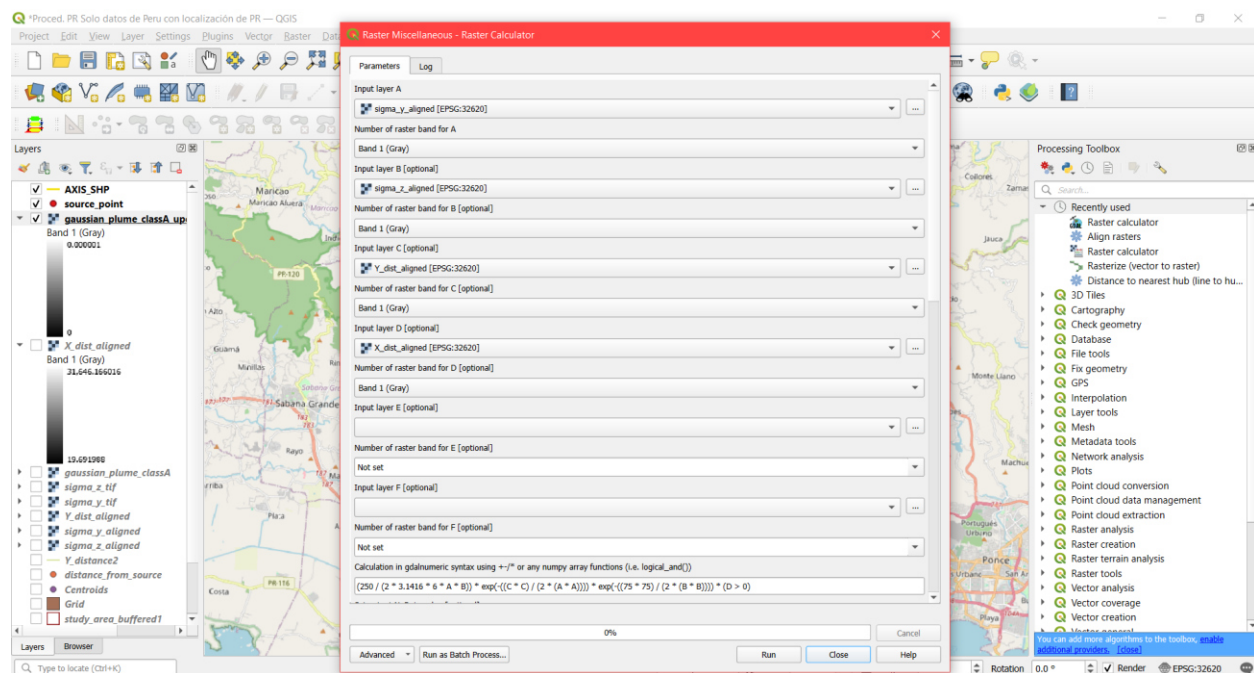
Figura 195

Corrida del modelo gaussiano (versión corregida con “X_dist_aligned” añadido)

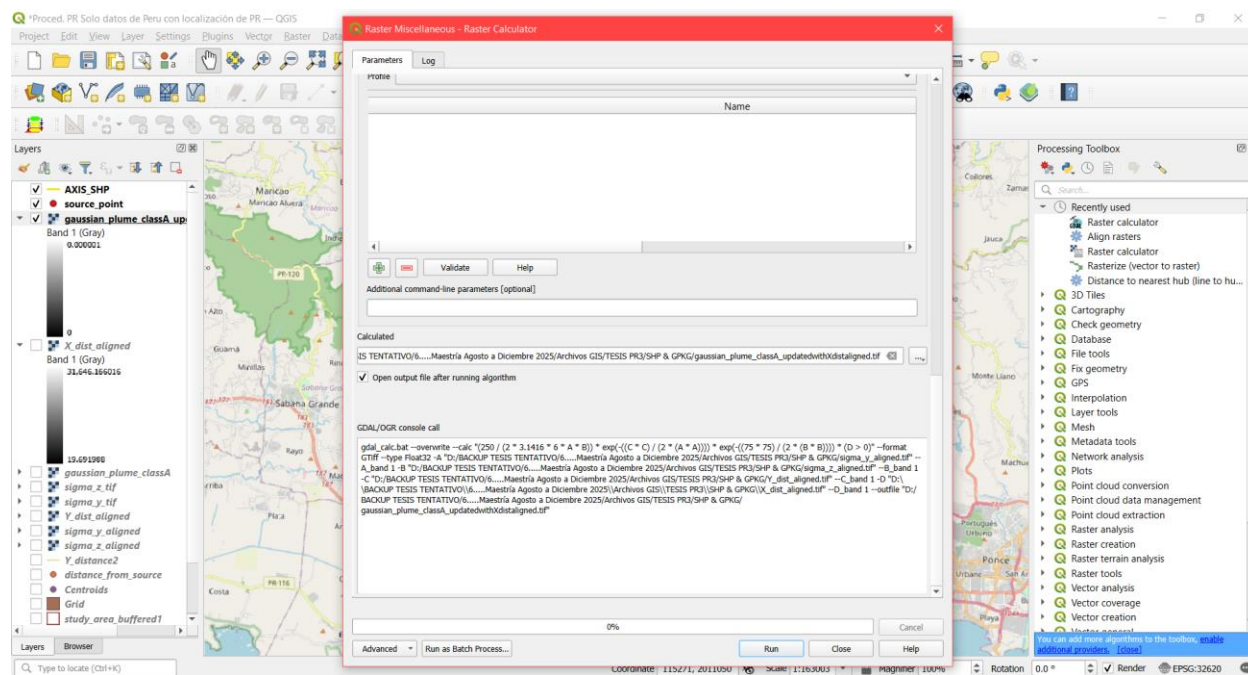


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 196

Continuación del Proceso

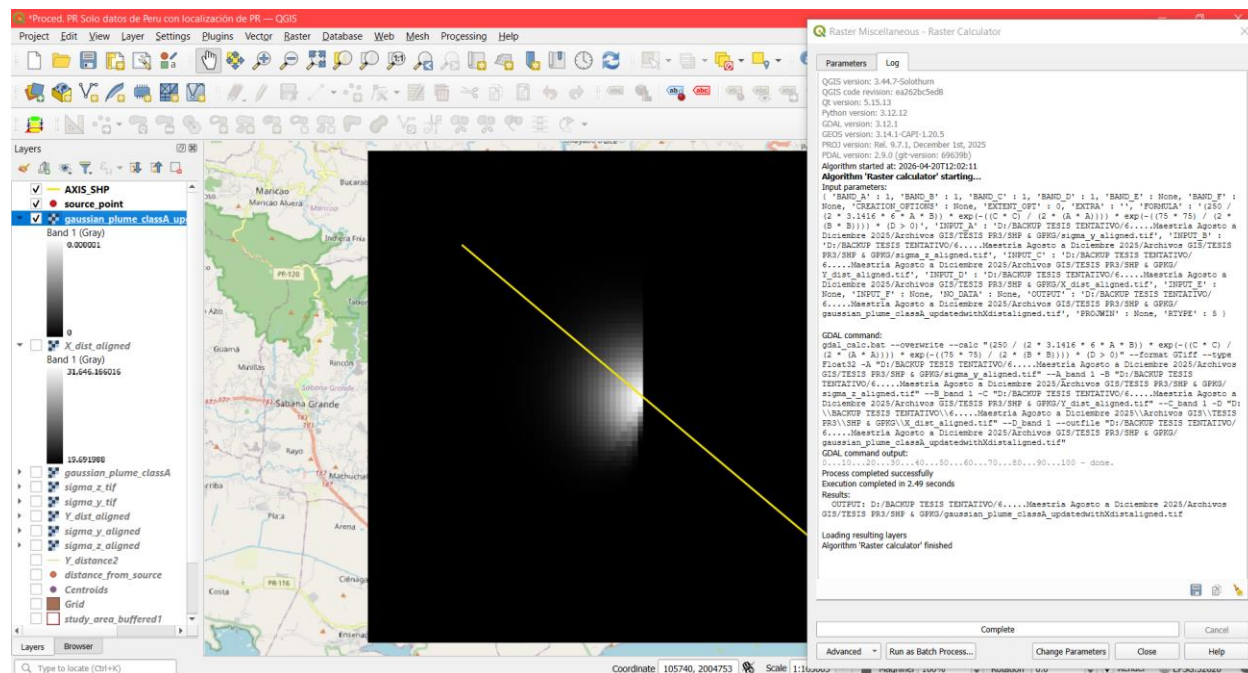
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 197*Continuación del Proceso*

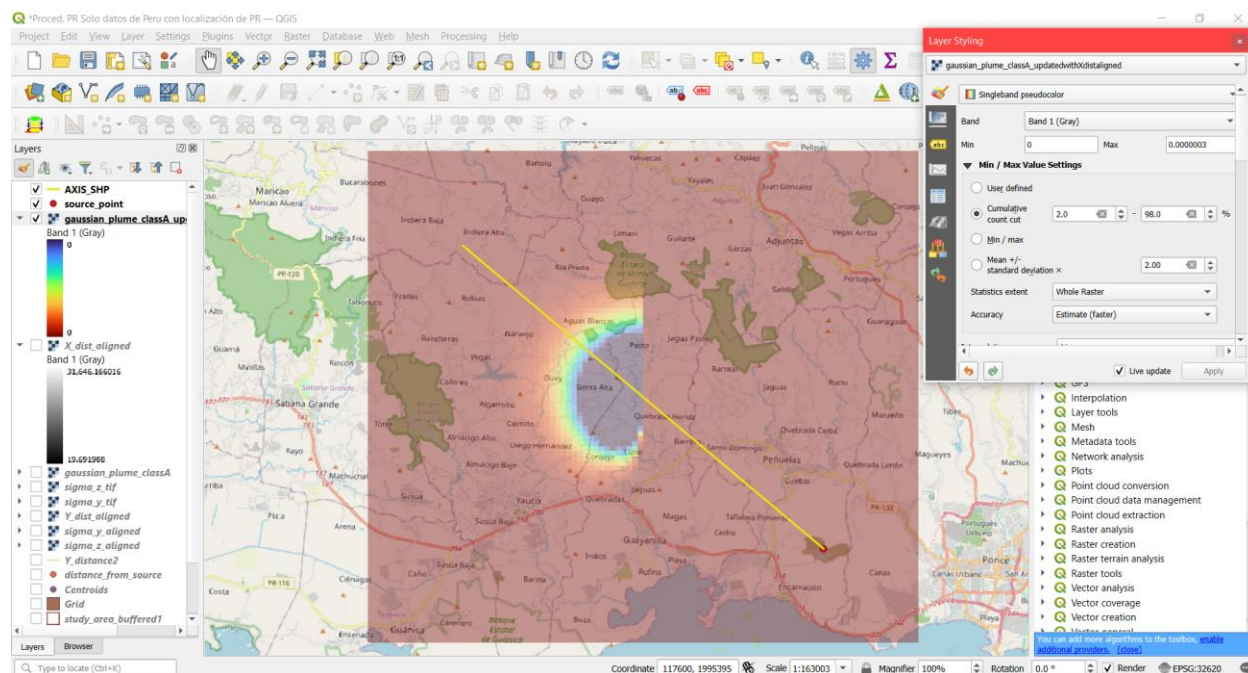
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 198

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 199*Continuación del Proceso*

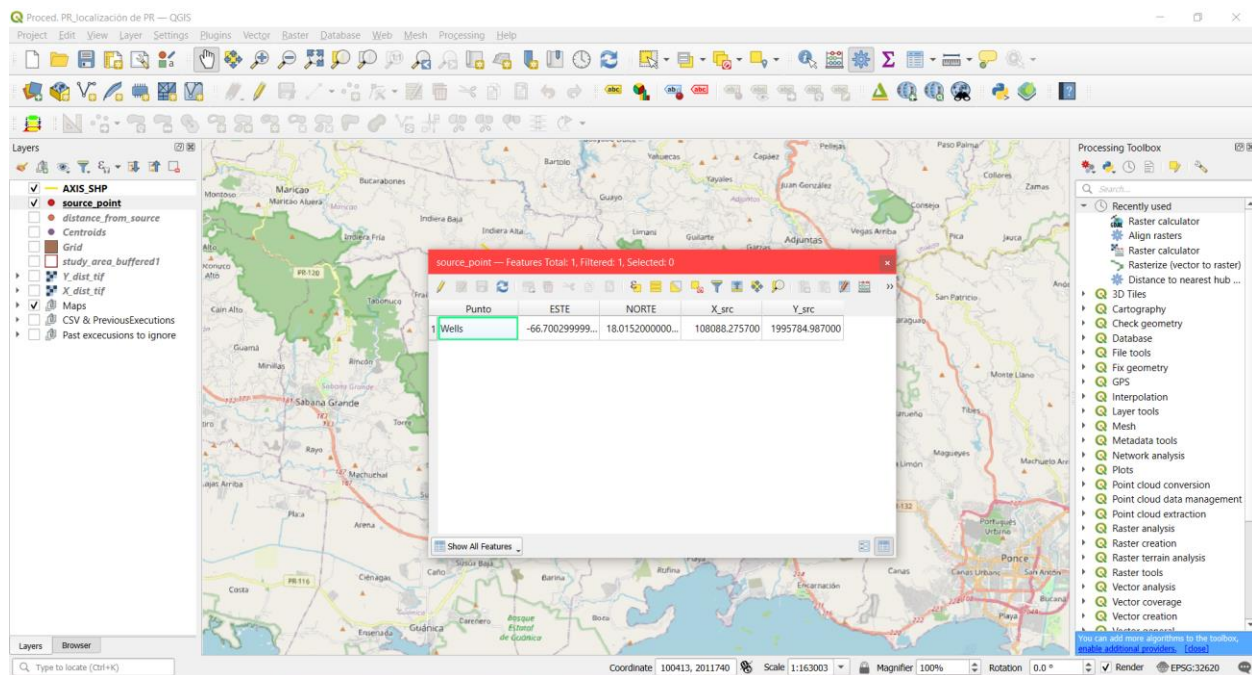
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Nota: Una vez se comprobó con los pasos anteriores que la ejecución funcionó, se procedió a actualizar los componentes físicos (sigmas y y z), para que el penacho de dispersión se visualizara de manera más realístico. Pero antes de proseguir y ya con conocimiento de cuales capas se debían actualizar, se procedió a incorporar la data real de PROTECO en las fórmulas de QGIS para ver la dispersión real.

Cambio a data real para clase A.

Figura 200

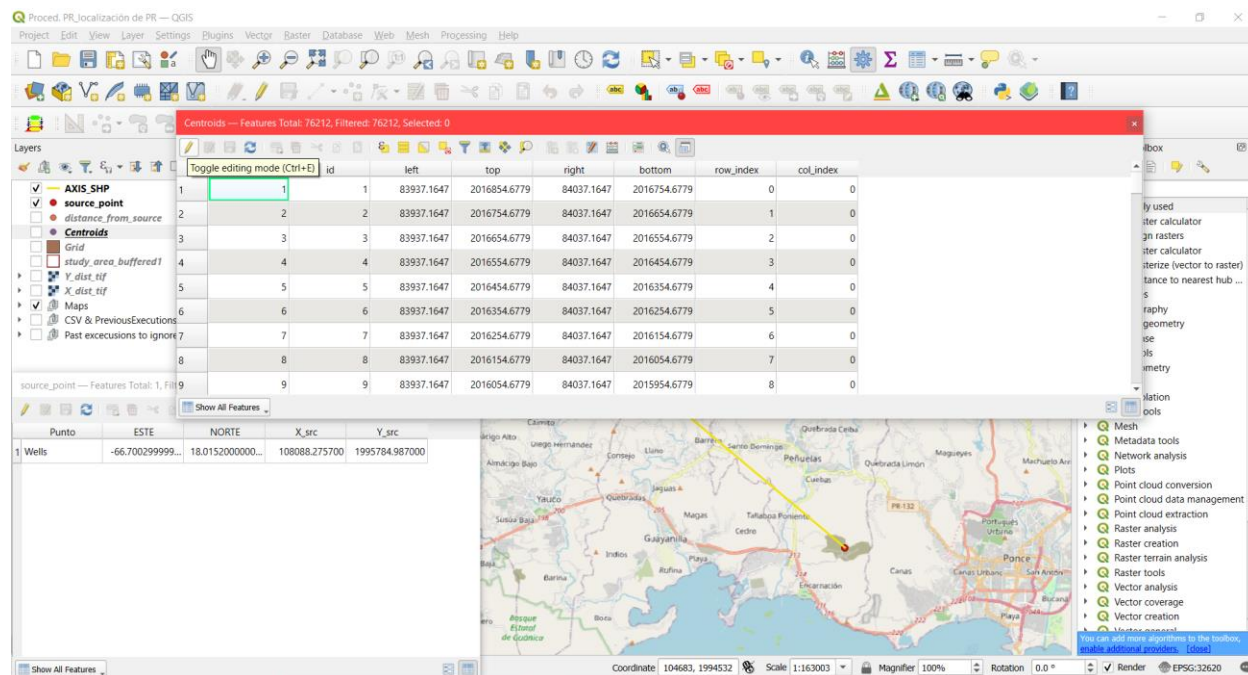
Paso 10. En este paso se procedió a añadir a un subgrupo a las capas que no se utilizaron para hacer el modelo con la data real. Luego se procedió a abrir la tabla de atributos del “source_point”, para anotar las coordenadas que se utilizaron en el próximo paso. $X = 108088.275700$ $Y = 1995784.987000$



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

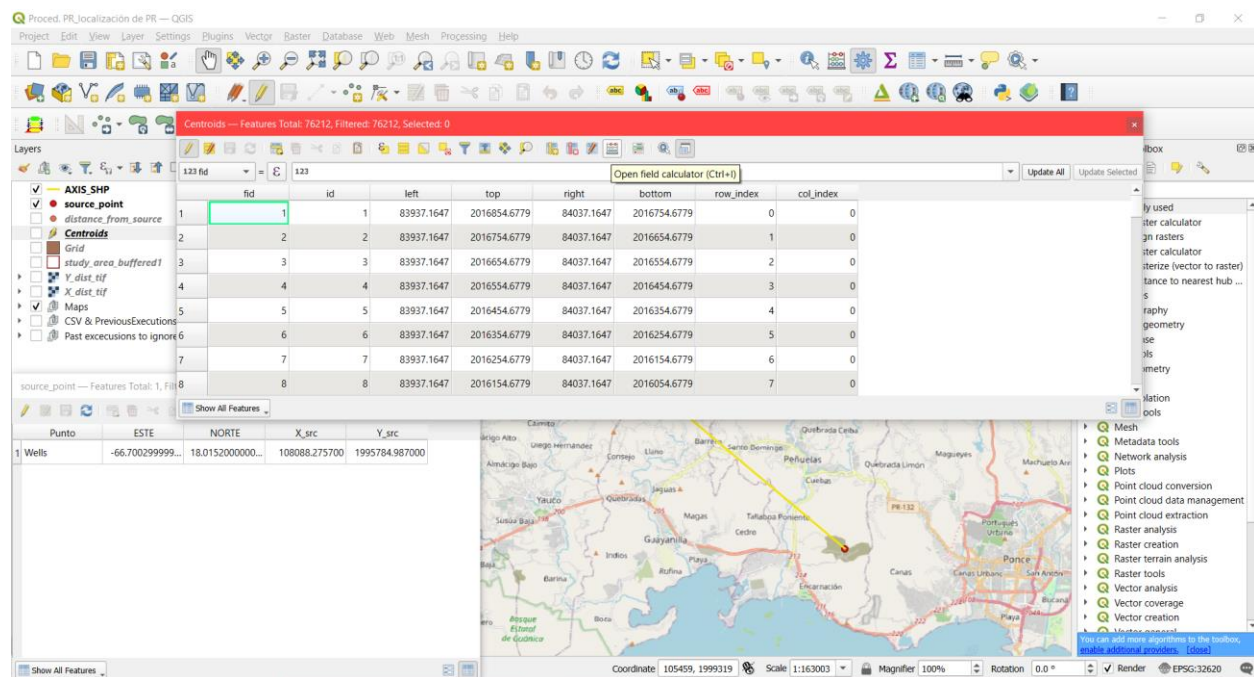
Figura 201

Paso 11. Una vez realizado lo anterior se procedió a abrir la tabla de atributos para los centroides y se añaden las distancias de X y Y de acuerdo con las coordenadas (nombrados dx y dy): Primero dx y luego dy



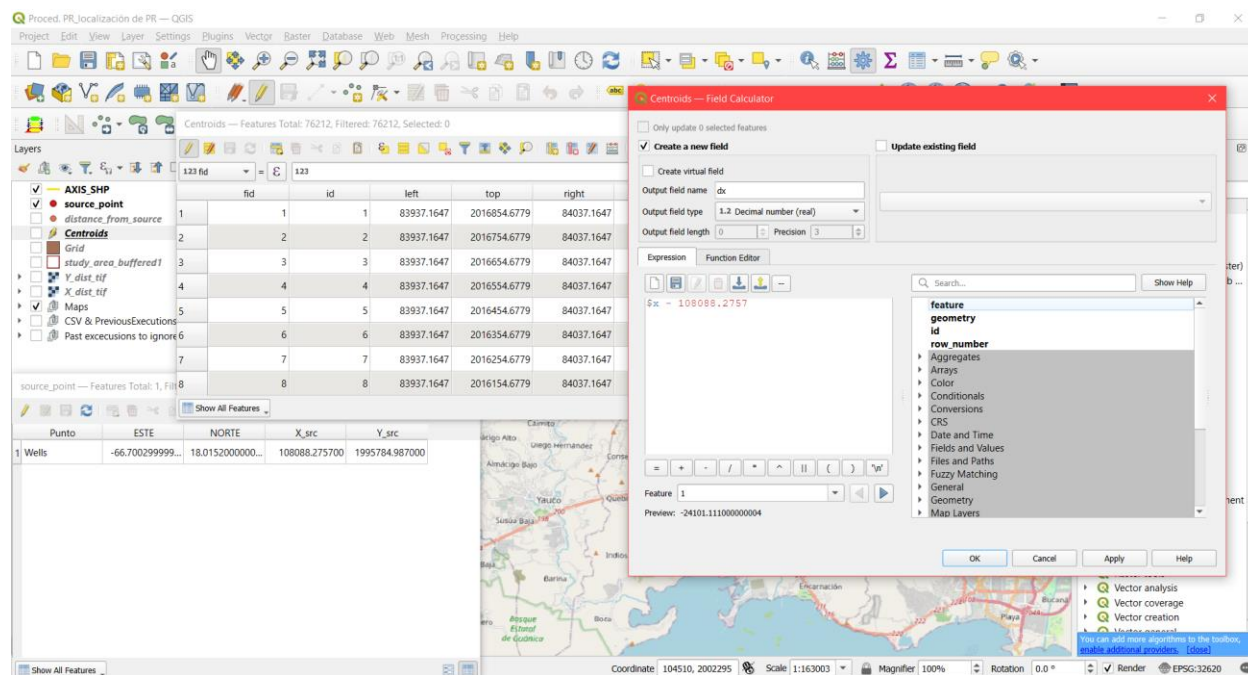
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Figura 202

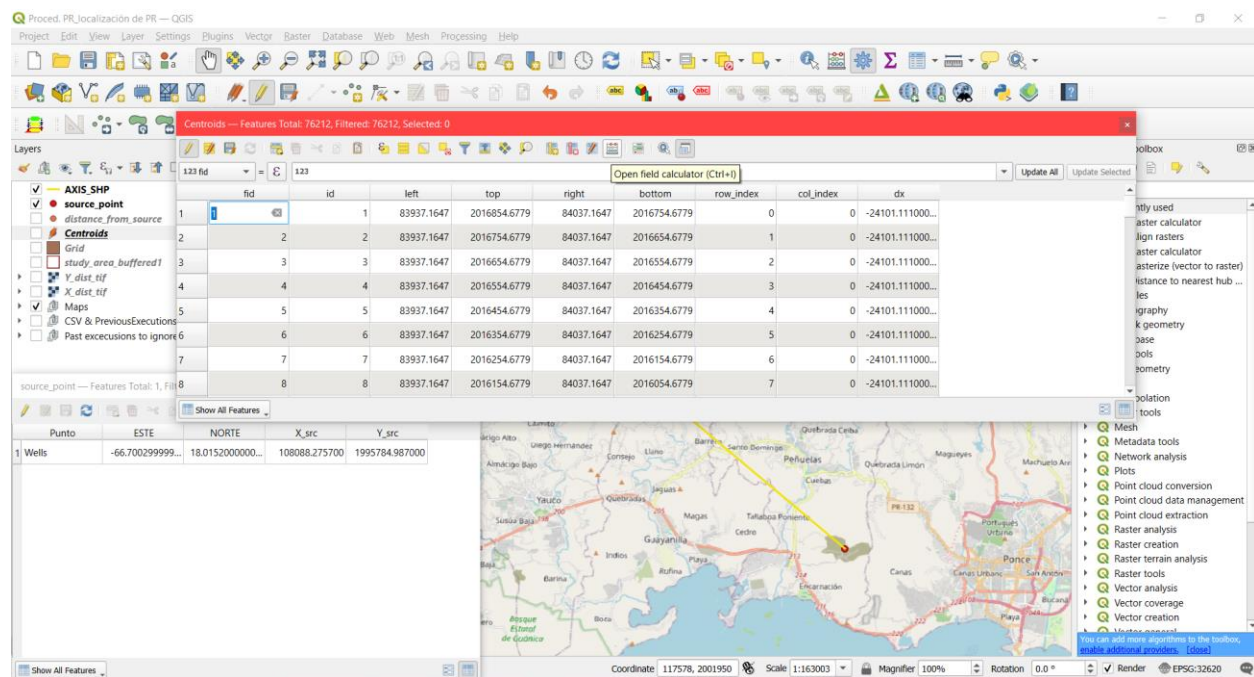
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 203

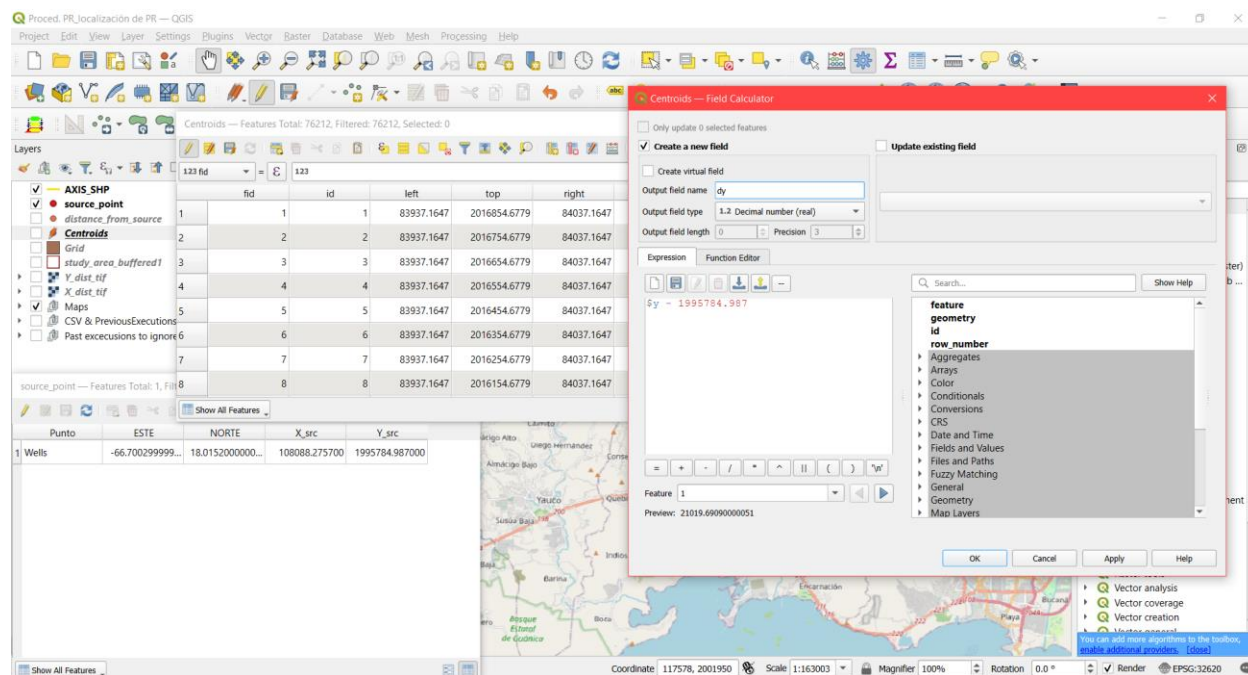
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 204*Continuación del Proceso*

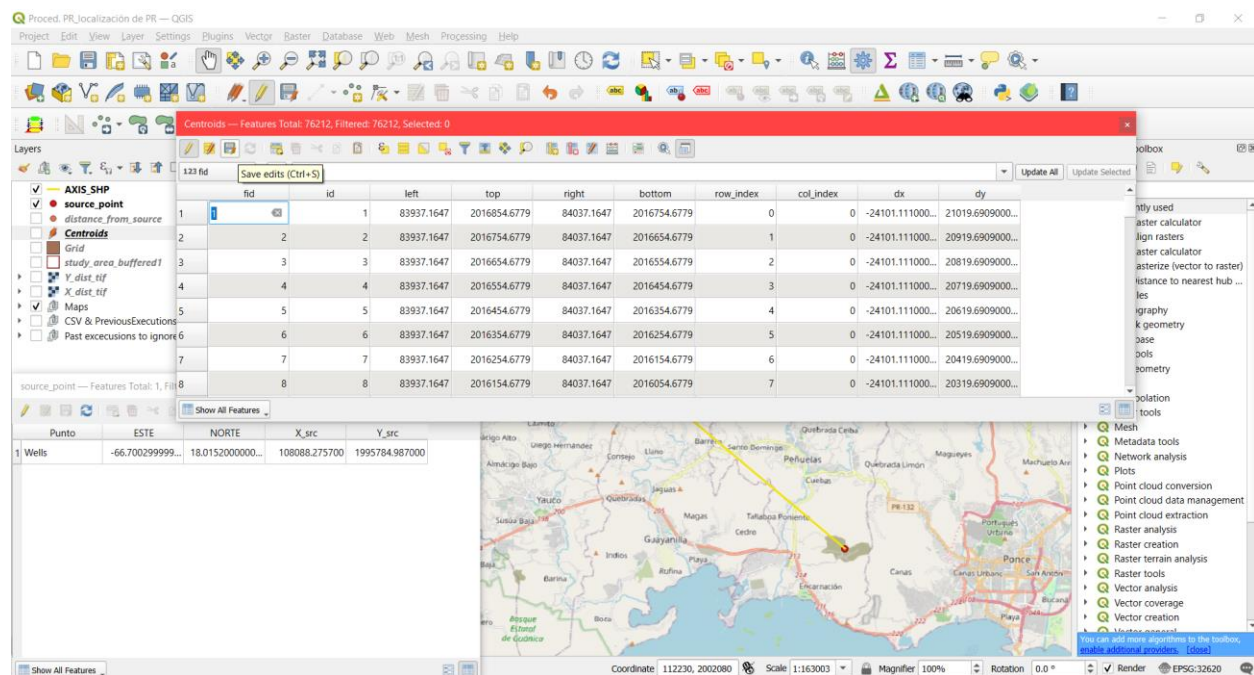
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solithurn” (2026).

Figura 205

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 206

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 207*Continuación del Proceso*

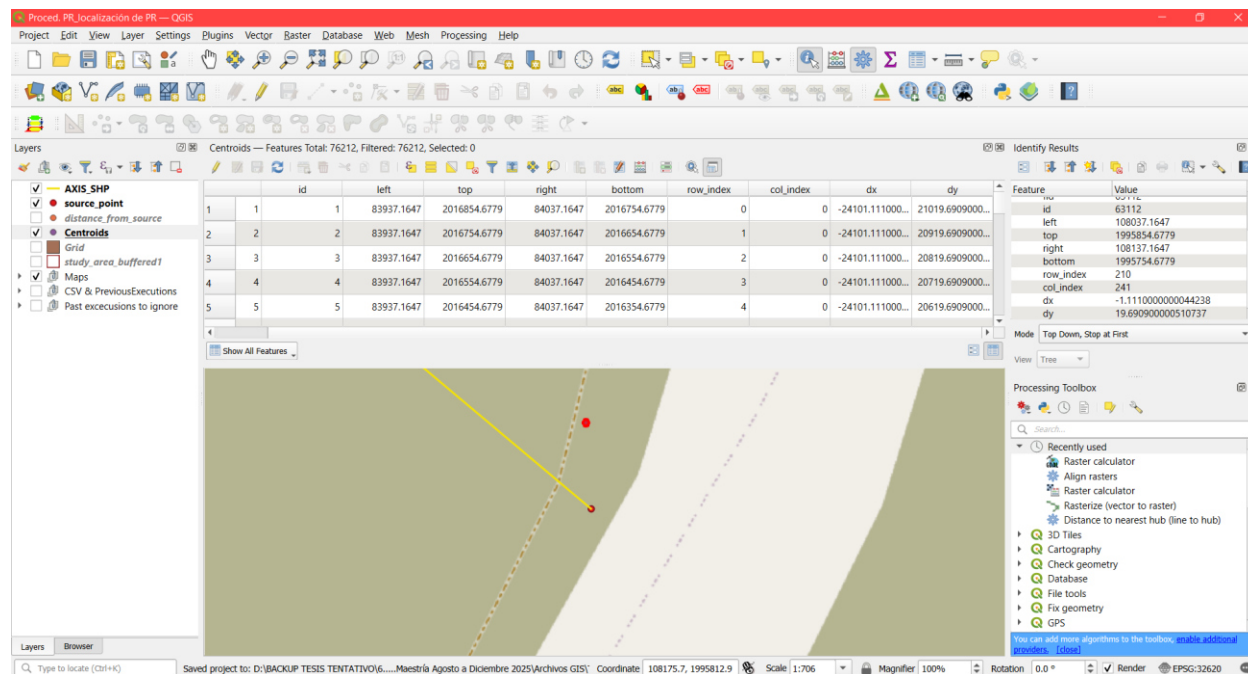
Centroids — Features Total: 76212, Filtered: 76212, Selected: 0

	id	left	top	right	bottom	row_index	col_index	dx	dy
1	1	83937.1647	2016854.6779	84037.1647	2016754.6779	0	0	-24101.111000...	21019.6909000...
2	2	83937.1647	2016754.6779	84037.1647	2016654.6779	1	0	-24101.111000...	20919.6909000...
3	3	83937.1647	2016654.6779	84037.1647	2016554.6779	2	0	-24101.111000...	20819.6909000...
4	4	83937.1647	2016554.6779	84037.1647	2016454.6779	3	0	-24101.111000...	20719.6909000...
5	5	83937.1647	2016454.6779	84037.1647	2016354.6779	4	0	-24101.111000...	20619.6909000...
6	6	83937.1647	2016354.6779	84037.1647	2016254.6779	5	0	-24101.111000...	20519.6909000...
7	7	83937.1647	2016254.6779	84037.1647	2016154.6779	6	0	-24101.111000...	20419.6909000...
8	8	83937.1647	2016154.6779	84037.1647	2016054.6779	7	0	-24101.111000...	20319.6909000...
9	9	83937.1647	2016054.6779	84037.1647	2015954.6779	8	0	-24101.111000...	20219.6909000...
10	10	83937.1647	2015954.6779	84037.1647	2015854.6779	9	0	-24101.111000...	20119.6909000...
11	11	83937.1647	2015854.6779	84037.1647	2015754.6779	10	0	-24101.111000...	20019.6909000...
12	12	83937.1647	2015754.6779	84037.1647	2015654.6779	11	0	-24101.111000...	19919.6909000...
13	13	83937.1647	2015654.6779	84037.1647	2015554.6779	12	0	-24101.111000...	19819.6909000...
14	14	83937.1647	2015554.6779	84037.1647	2015454.6779	13	0	-24101.111000...	19719.6909000...
15	15	83937.1647	2015454.6779	84037.1647	2015354.6779	14	0	-24101.111000...	19619.6909000...
16	16	83937.1647	2015354.6779	84037.1647	2015254.6779	15	0	-24101.111000...	19519.6909000...
17	17	83937.1647	2015254.6779	84037.1647	2015154.6779	16	0	-24101.111000...	19419.6909000...
18	18	83937.1647	2015154.6779	84037.1647	2015054.6779	17	0	-24101.111000...	19319.6909000...

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 208

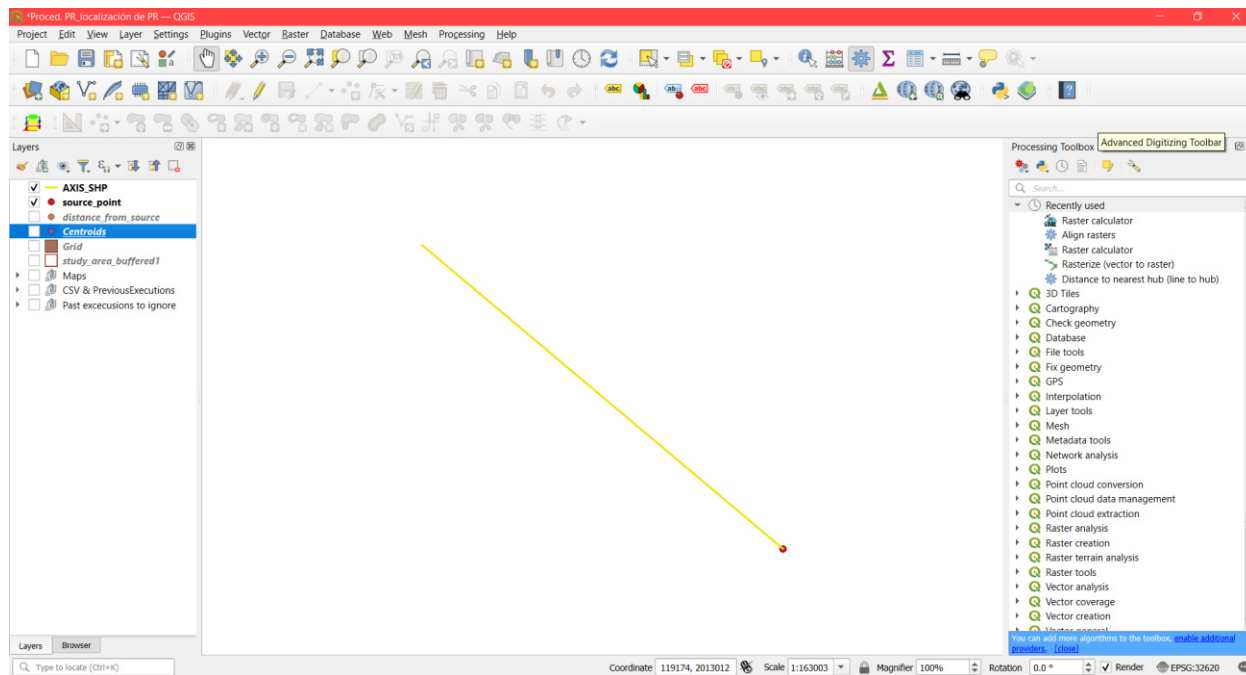
Continuación del Proceso. En el mapa se comprobó que las distancias (dx y dy) realizadas anteriormente estuvieran correctas (que no fueran =0). Un “ $dy \approx 19$ es normal, ya que el “source” no se encuentra exactamente en el centro de una celda del “grid”, lo cual en modelación en GIS es 100% aceptable.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 209

*Paso 12. Rotación: se **procedió a definir el ángulo del viento** (este es un nuevo paso visual, ya que no se utilizarán los sigma's anteriores, debido a que se calculara la dinámica de los sigma's desde X_w dentro de la fórmula, ya que este nuevo modelo contara con una física correcta). Este paso es más visual, ya que podemos ver que la línea de la dirección del viento va de NW→SE, lo cual corresponde a 135° (grados) en radianes; pero estos deben ser convertidos, ($\theta = \text{radians}(135^\circ)$) para que, si luego la dispersión va en la dirección equivocada, sea corregida. (135° vs 270° a 315°). La rotación se entiende en base a “Azimuth”. Esta ejecución se sustenta bajo los fundamentos de: Algebra, Trigonometría, Química Atmosférica, Física y Modelación Gaussiana.*

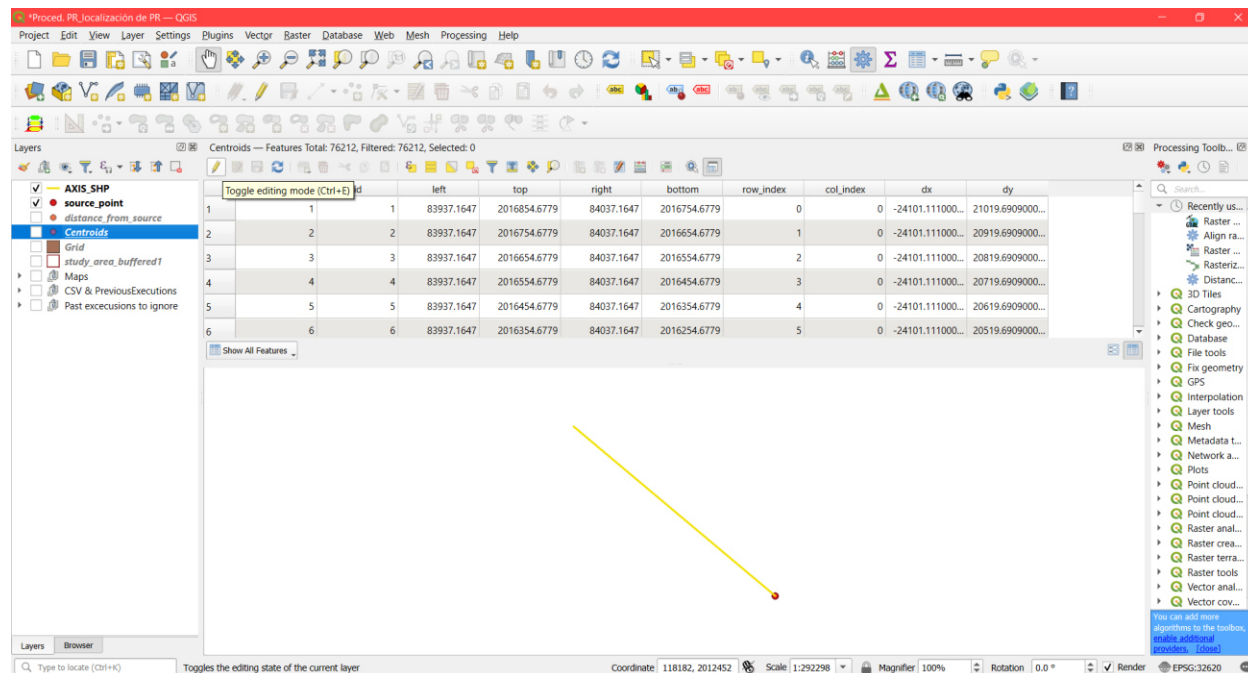


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 210

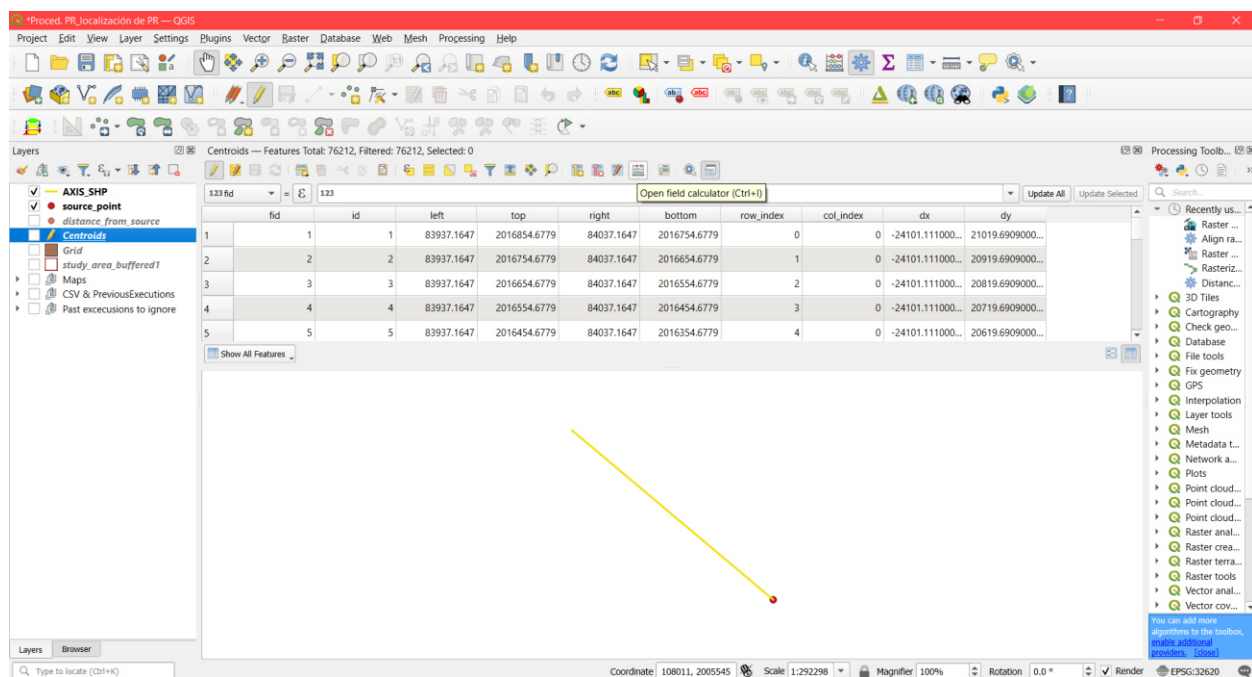
Paso 13. Creación de los X_w y Y_w . Estos se crean apartir de las distancias “dx y dy” creadas previamente, lo que se debe realizar con ellas es simplemente rotarlas.

Primero se procedió a crear a X_w .



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 211

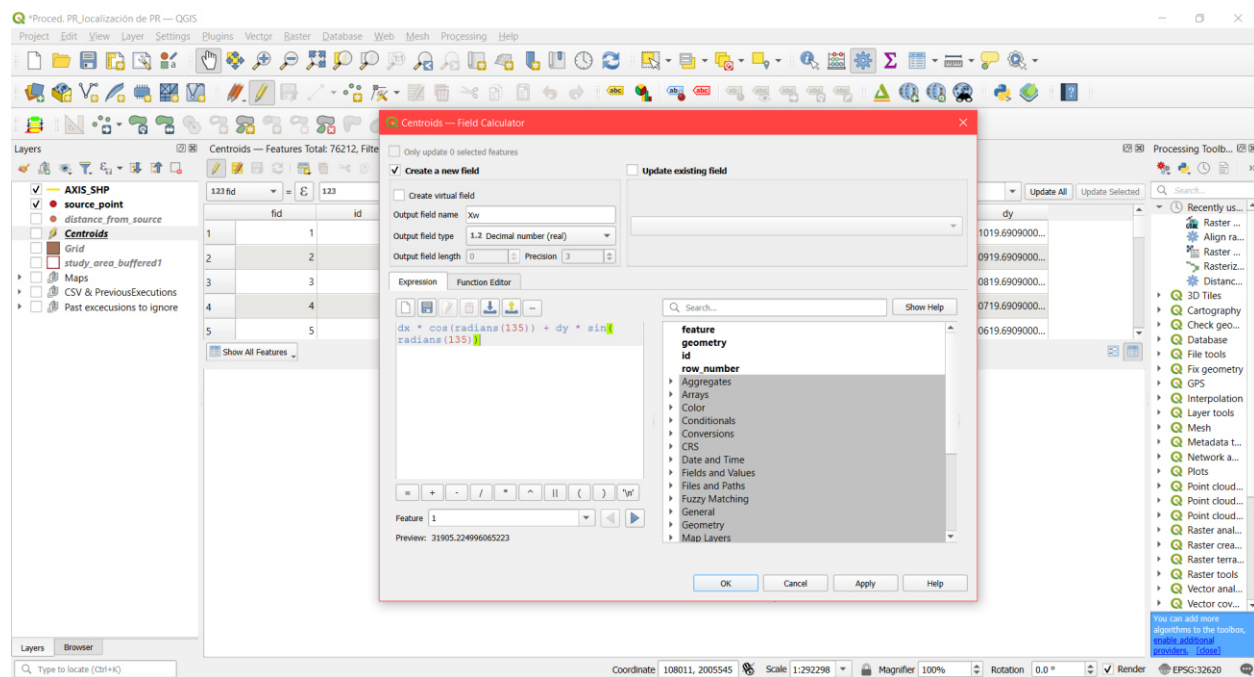
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 212

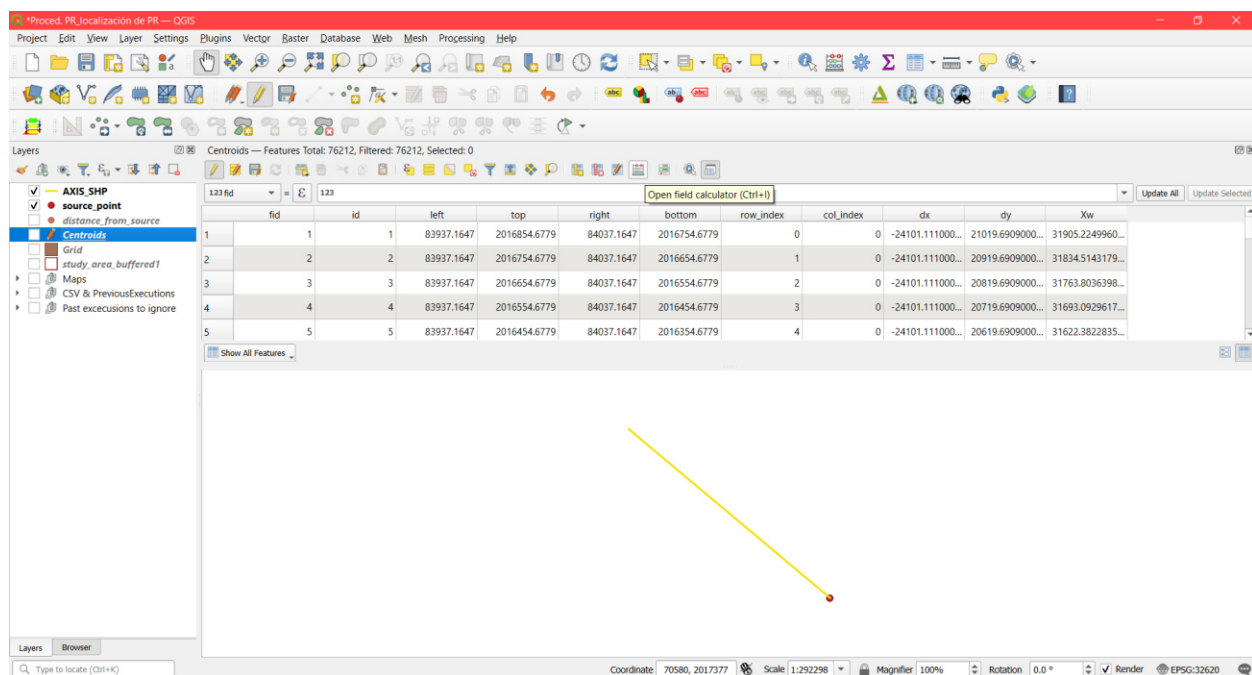
Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.

Fórmula: $dx * \cos(\text{radians}(135)) + dy * \sin(\text{radians}(135))$



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 213

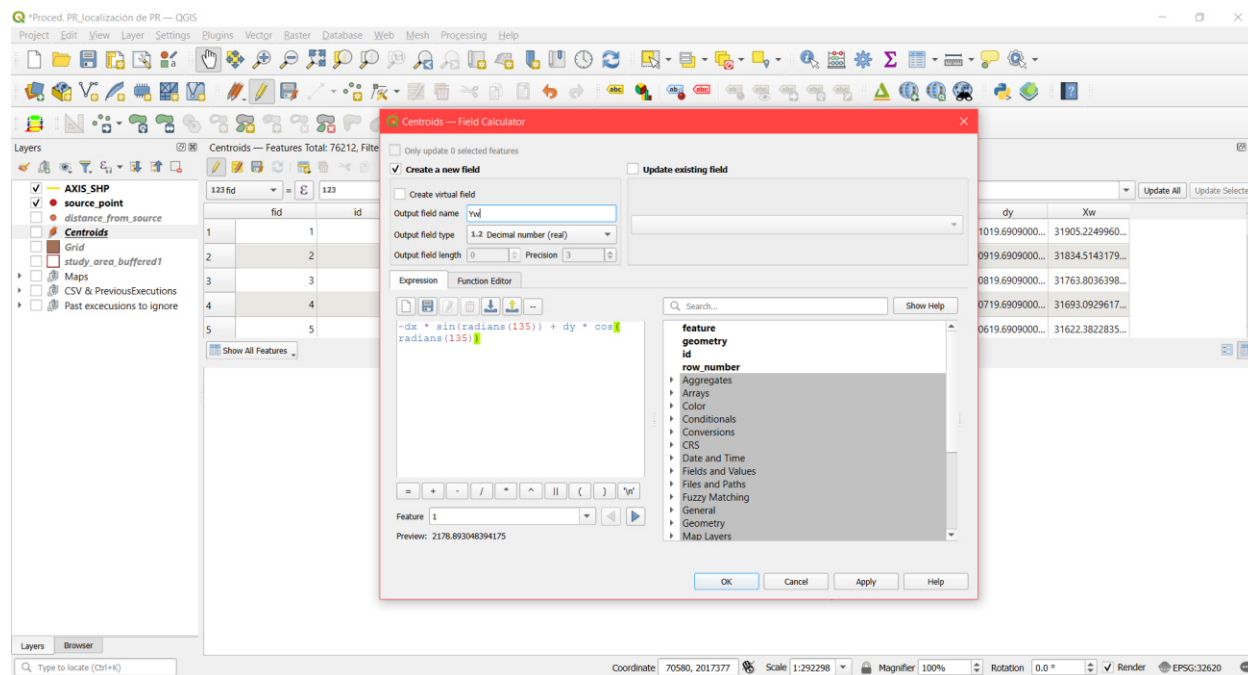
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 214

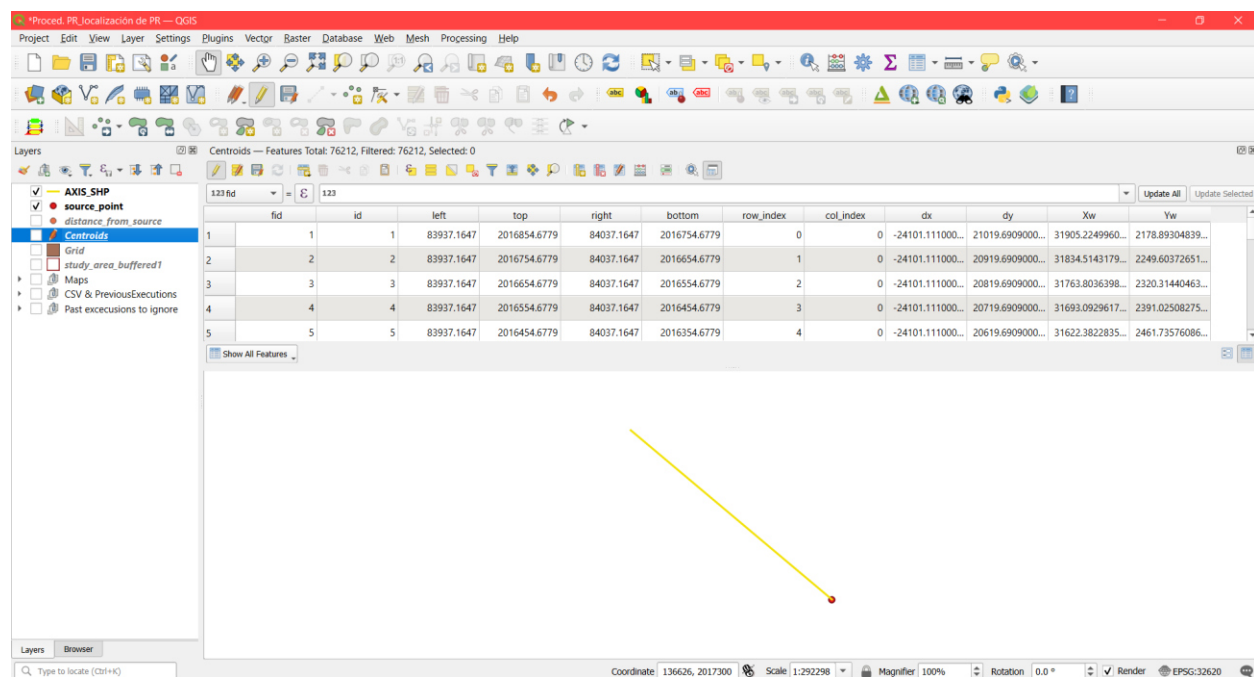
Continuación del Proceso. Ya con el paso anterior realizado, se procedió con Yw. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla

Fórmula: $-dx * \sin(\text{radians}(135)) + dy * \cos(\text{radians}(135))$



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

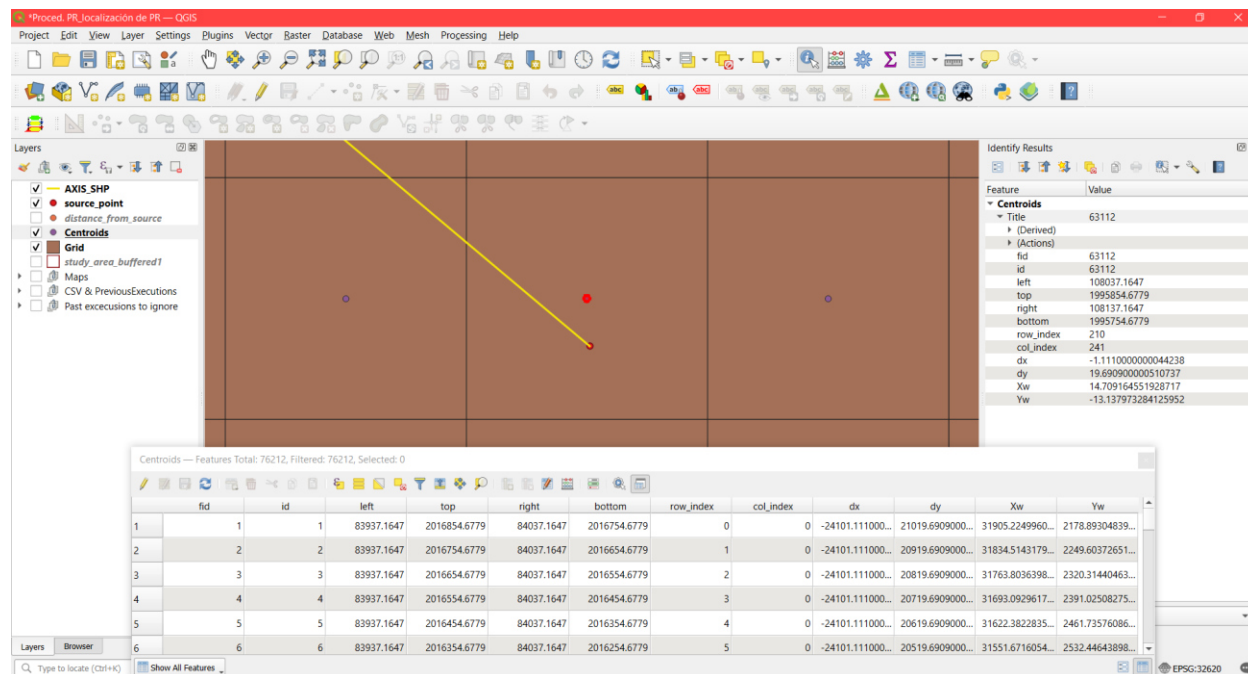
Figura 215

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 216

Continuación del Proceso. Los resultados que se observan: $X_w \approx 14.7m$ y $Y_w \approx -13.1m$, son los valores que más cerca se encuentran del “source point” y están correctos debido a la cercanía y que son valores pequeños (esto resulto ser así ya que el “grid cell” no cae justo en el “source point”).

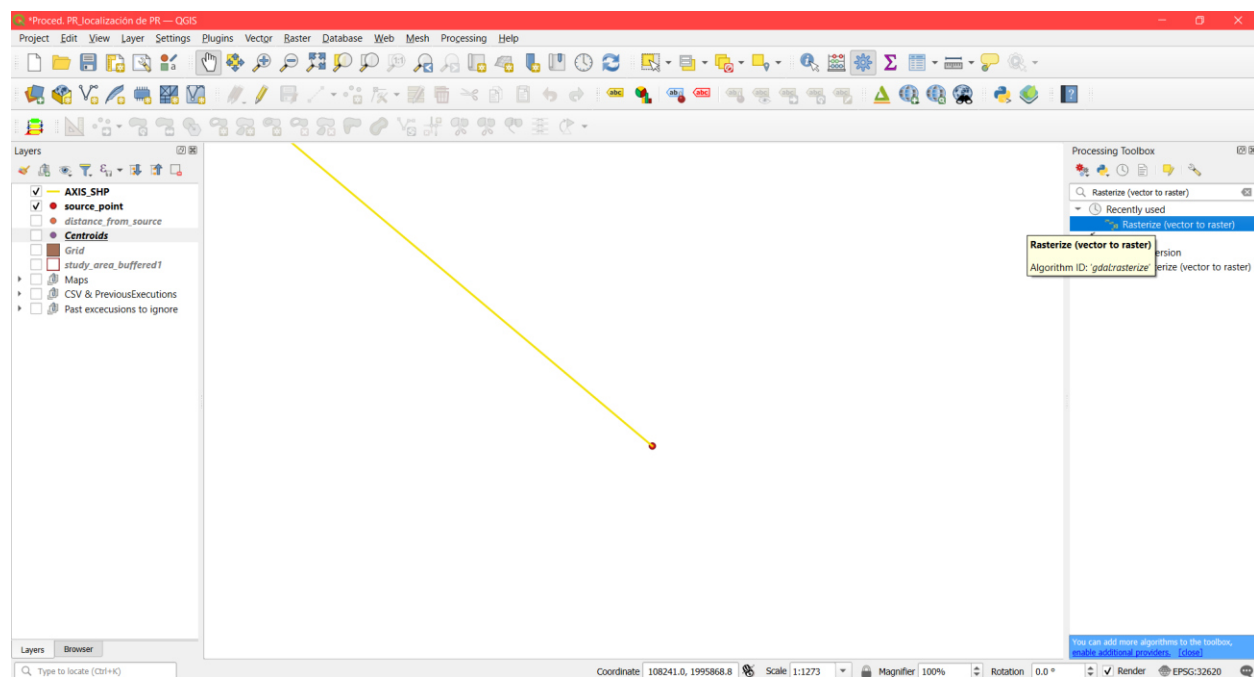


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Hasta este punto se cuenta con: un sistema de coordenadas, rotación del viento, y matemáticas correctas; lo que lleva a el modelo a ser físicamente valido.

Figura 217

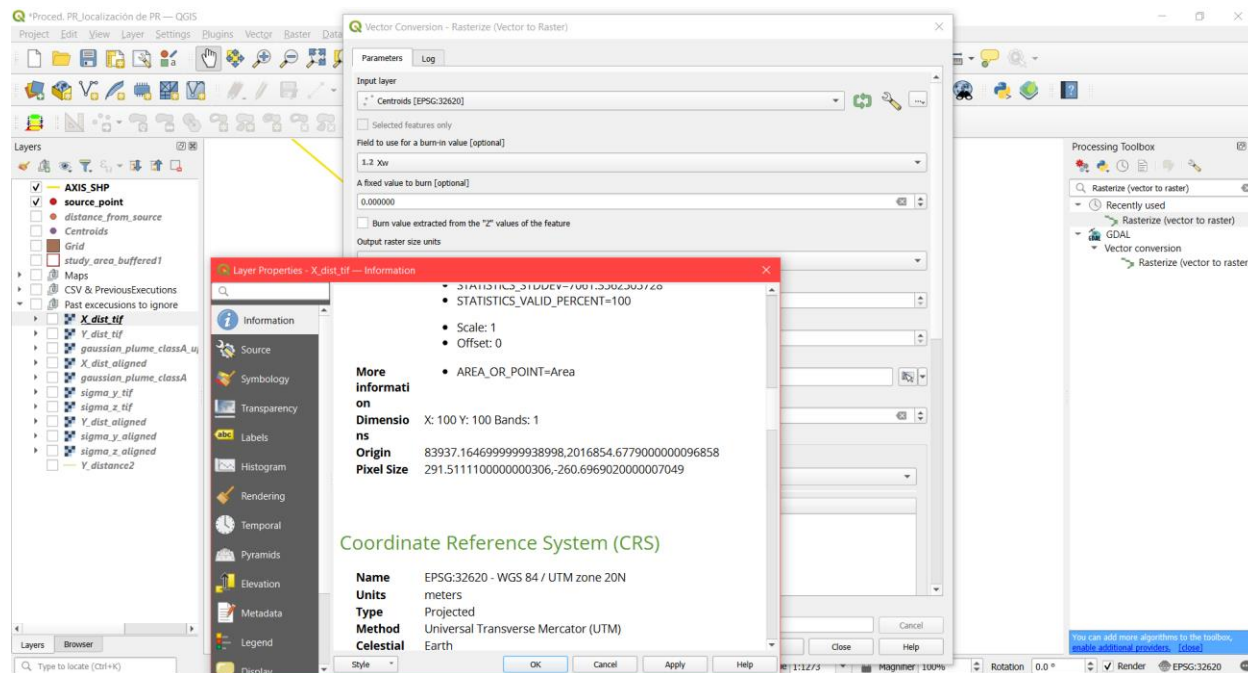
Paso 14. “Rasterizar” a “Xw y Yw” (convertirlos a “raster”). Primero Xw.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

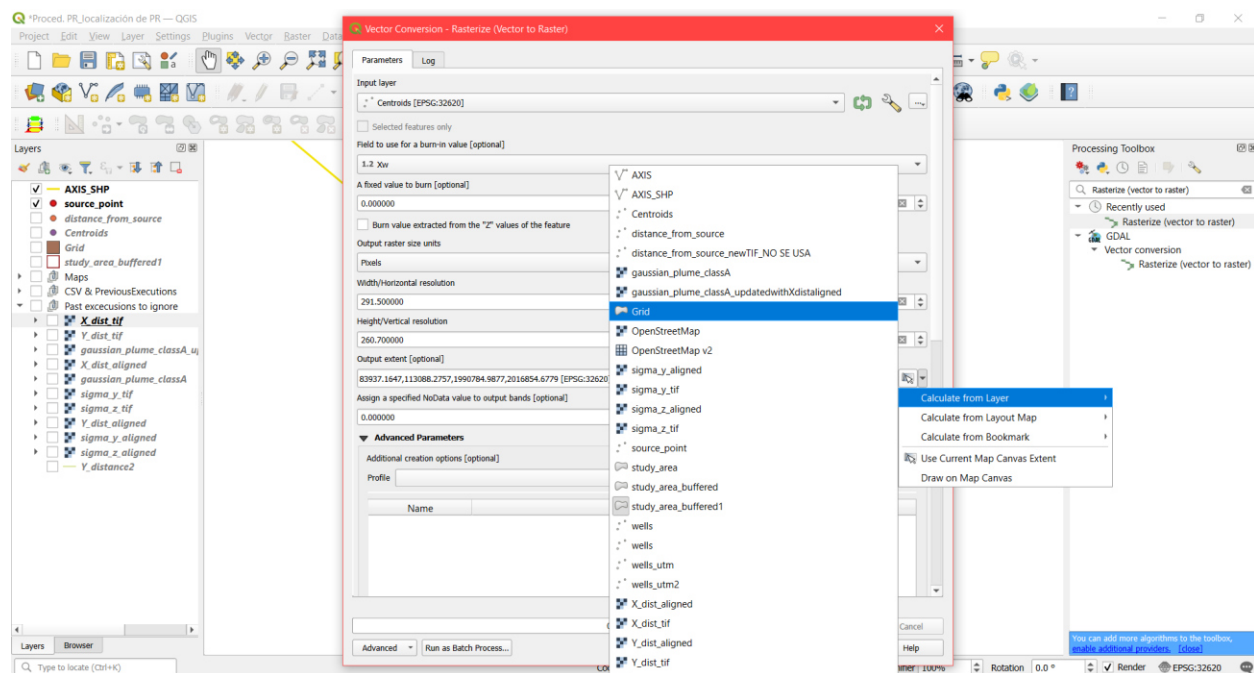
Figura 218

Continuación del Proceso. Se procedió a verificar el tamaño de los pixeles de las capas realizadas anteriormente.



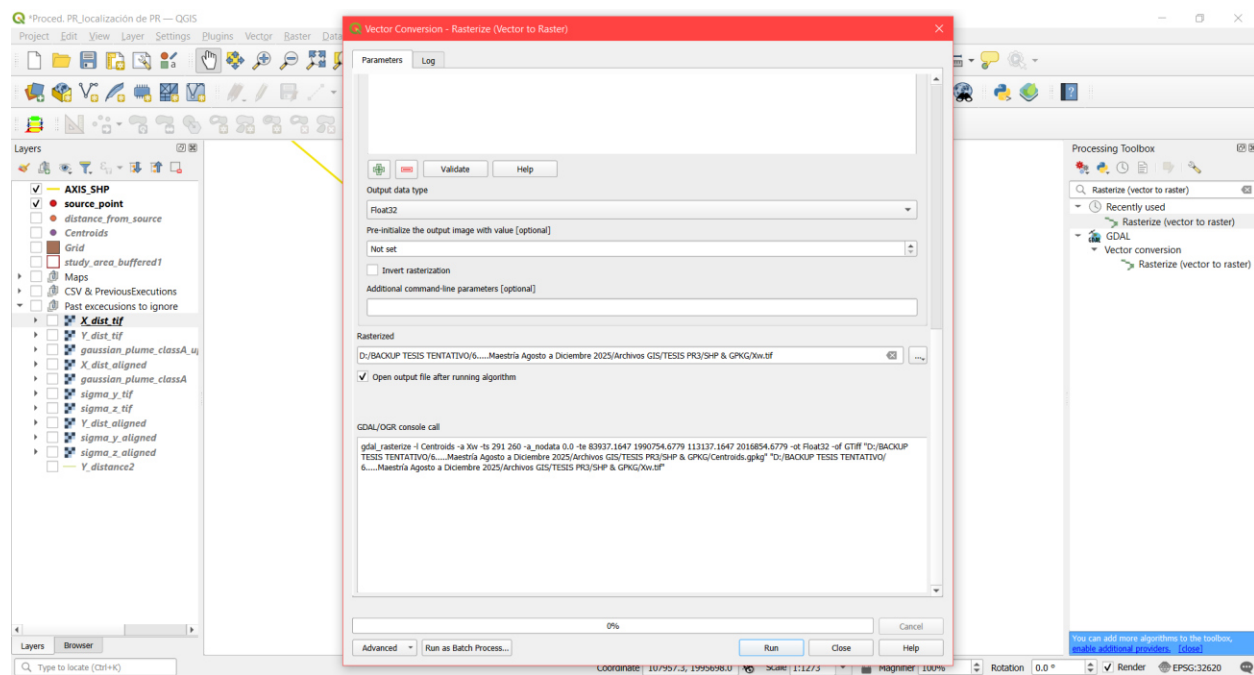
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 219

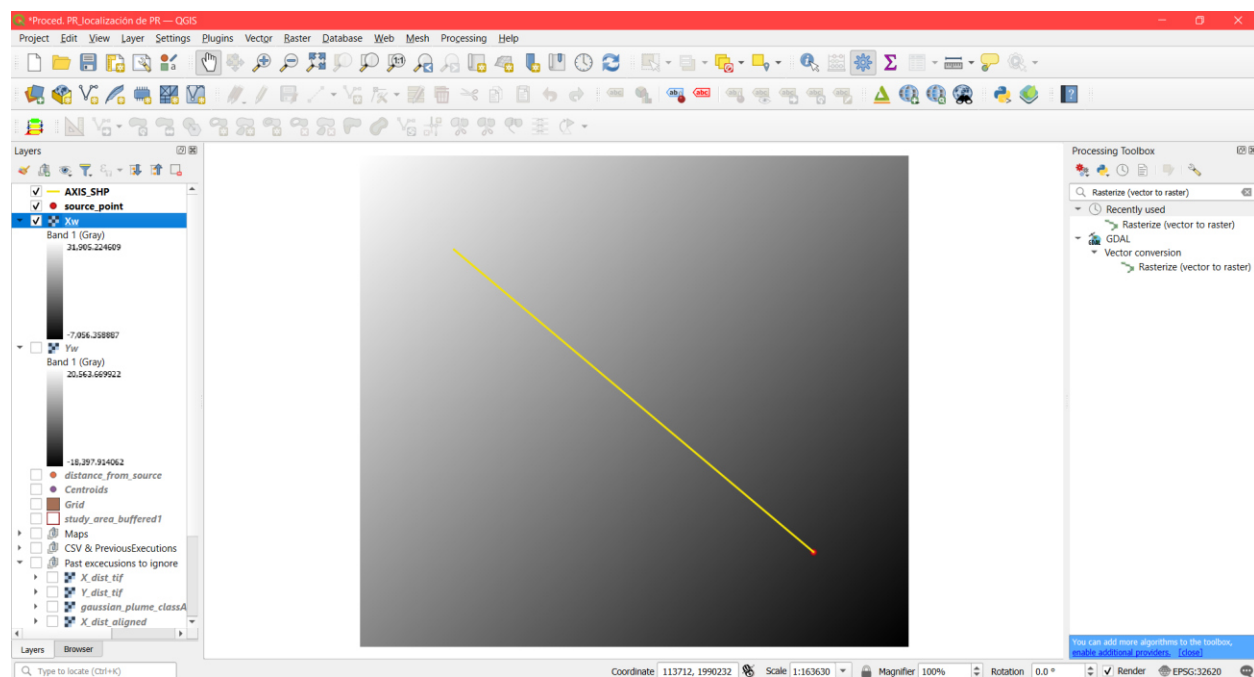
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 220

Continuación del Proceso

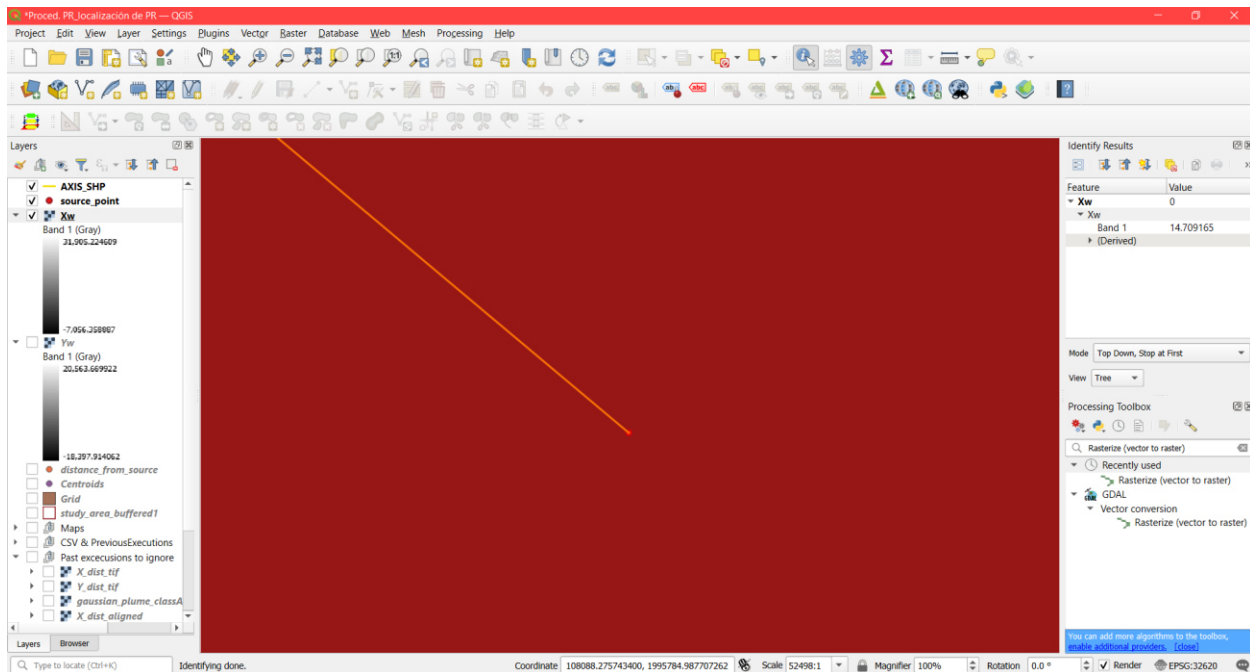
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 221*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 222

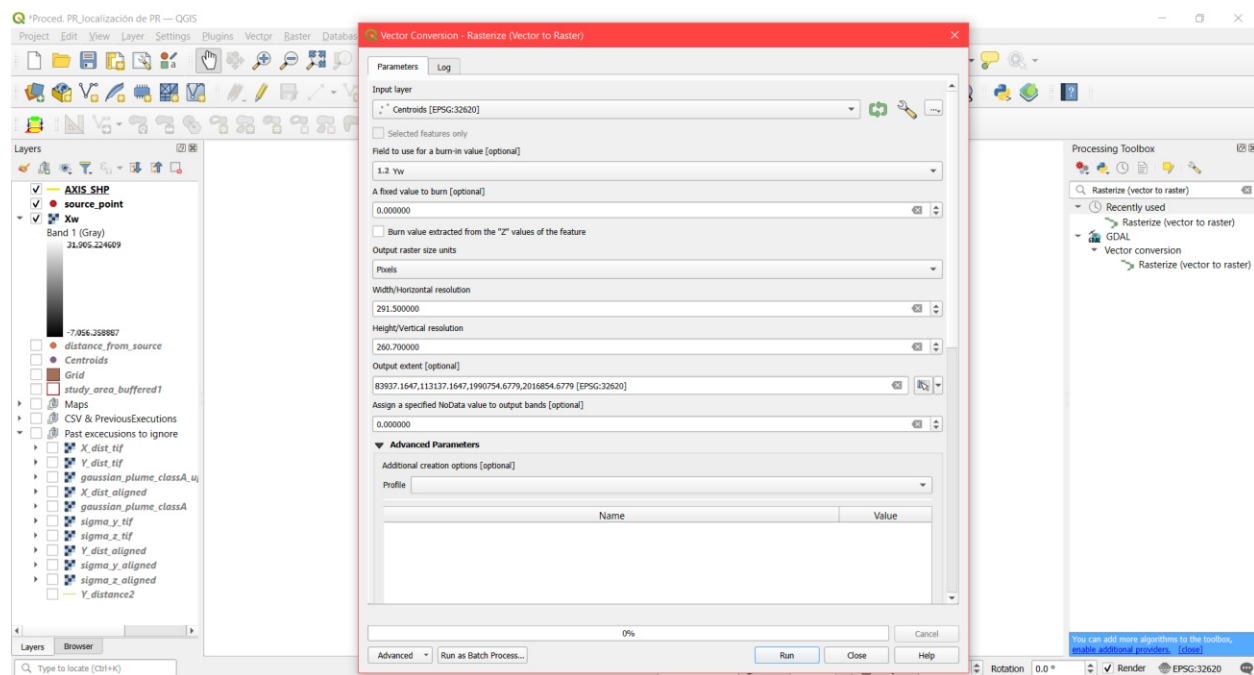
Continuación del Proceso. Verificación de que el “raster” este correcto. (Se debe recordar que antes de oprimir para la info., se debió haber realizado un zoom completo del “source point” en la capa). El valor de $X_w = 14.7$ es aceptable debido al tamaño de los pixeles, por tanto, el valor nunca será exactamente cero (estará en un rango de ± 150 metros, que es totalmente valido).



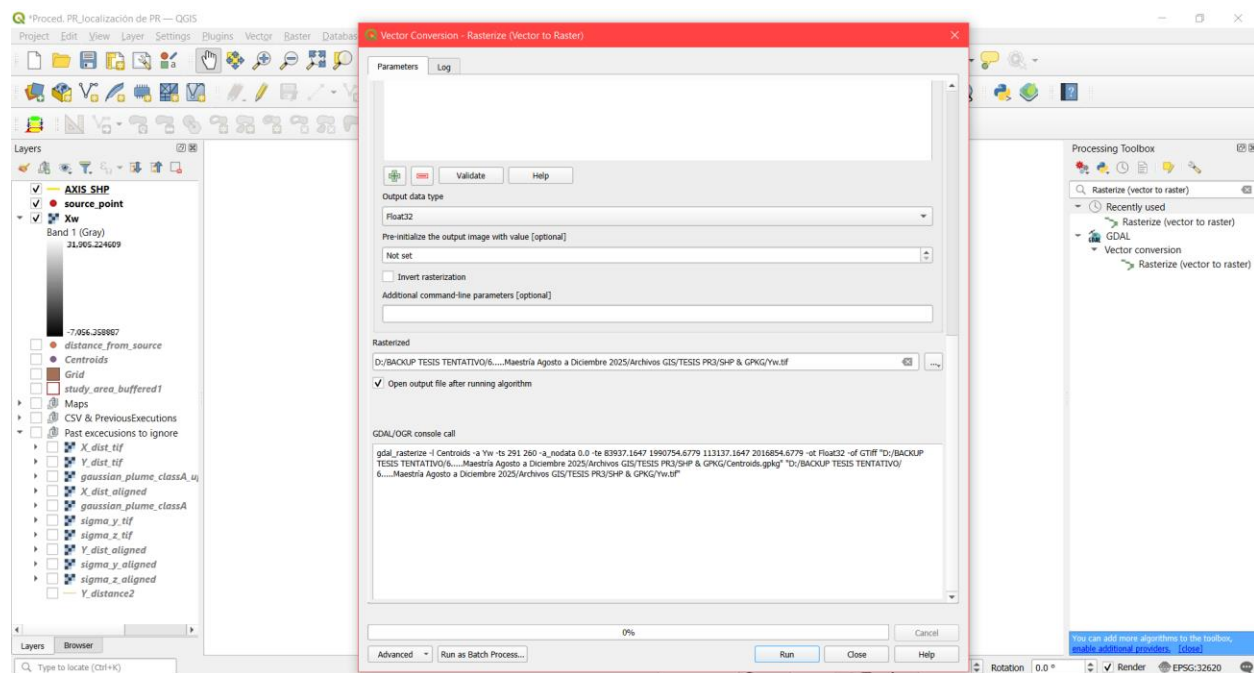
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 223

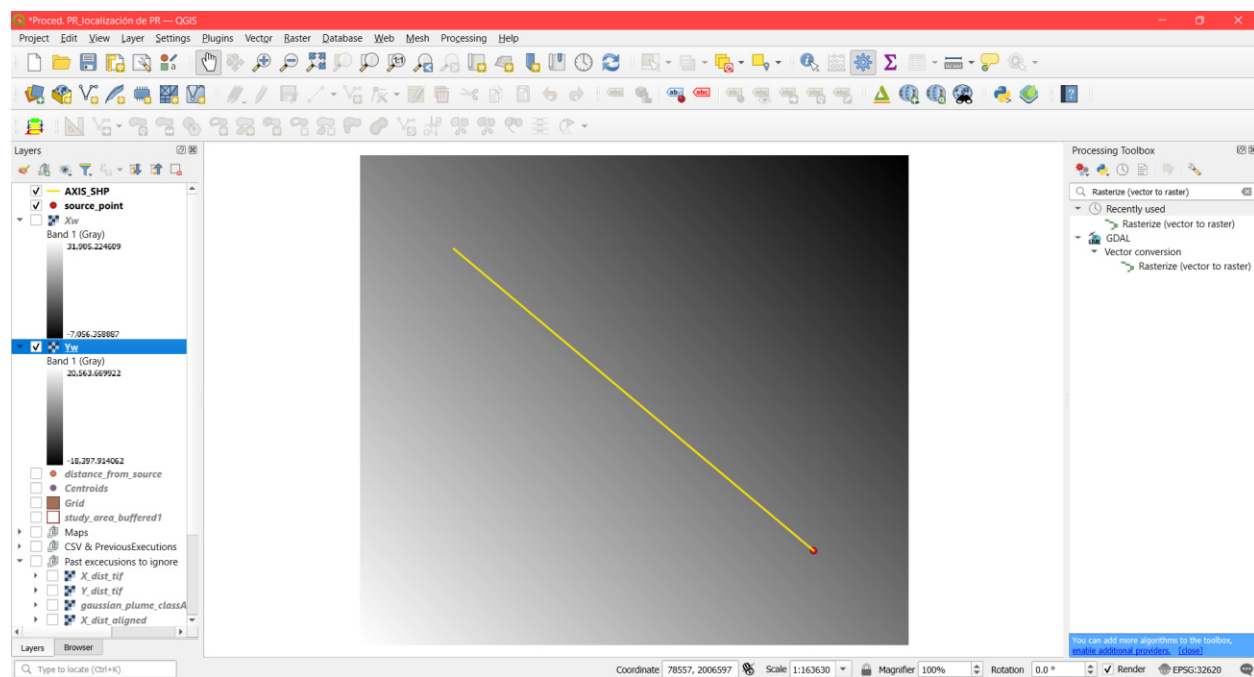
Continuación del Proceso para Yw. (solo se cambia el field y el output name)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 224*Continuación del Proceso*

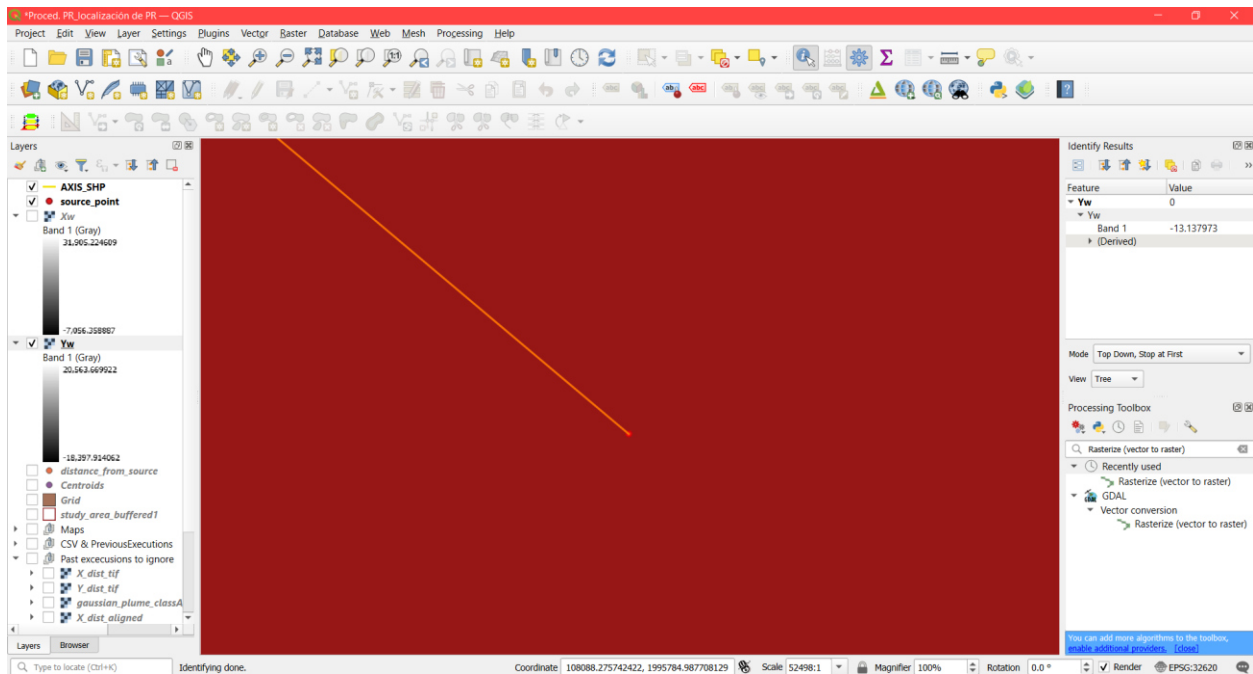
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 225*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 226

Continuación del Proceso. Verificación de que el “raster” este correcto. (Se debe recordar que antes de oprimir para la info., se debió haber realizado un zoom completo del “source point” en la capa). El valor de Yw = -13.1 es aceptable debido al tamaño de los pixeles, por tanto, el valor nunca será exactamente cero (estará en un rango de ± 150 metros, que es totalmente valido).

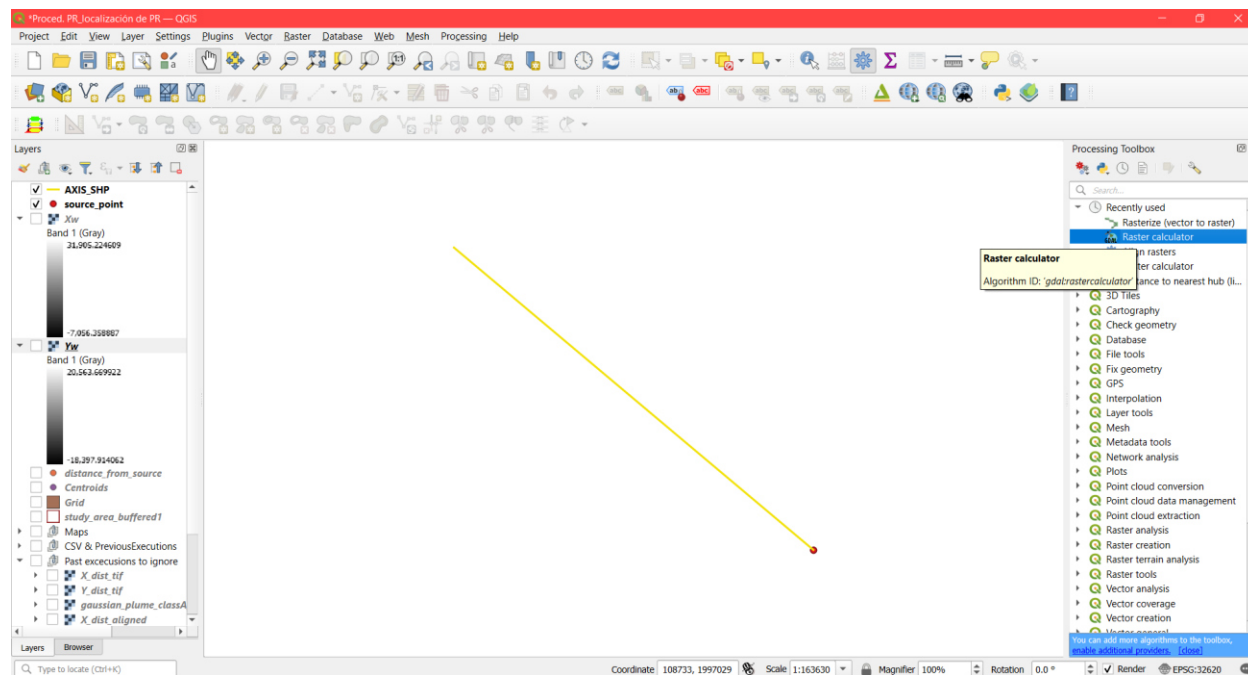


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Nota aclaratoria: Es importante recalcar que antes de que se procediera con el próximo paso, se tomó en consideración lo anteriormente realizado para: el cálculo de Q y la comparación de la fórmula original de la referencia de Perú con la fórmula a utilizarse para Puerto Rico. Descrito en la **Parte 7.3 Listado o registro de Contaminantes y/o Selección de Muestras (Niveles de concentración de los contaminantes).**

Figura 227

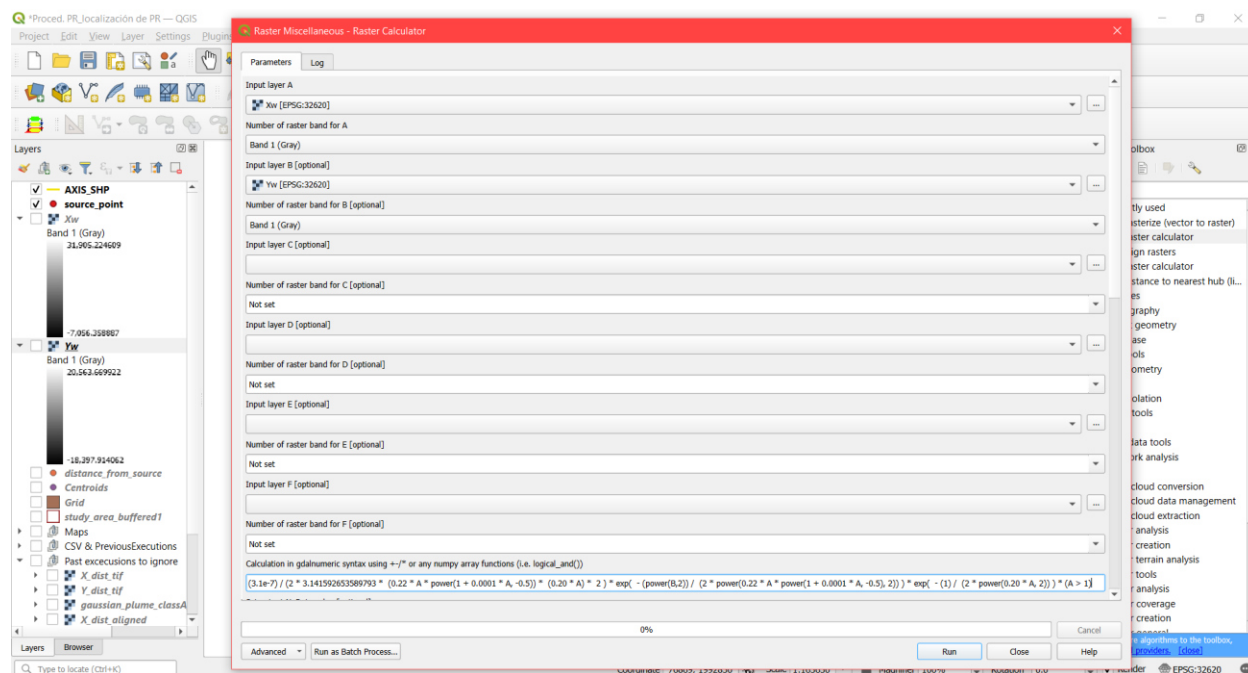
Paso 15. Con estos pasos previos realizados, se procedió a correr el modelo gaussiano final (con la fórmula corregida).



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 228

Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.

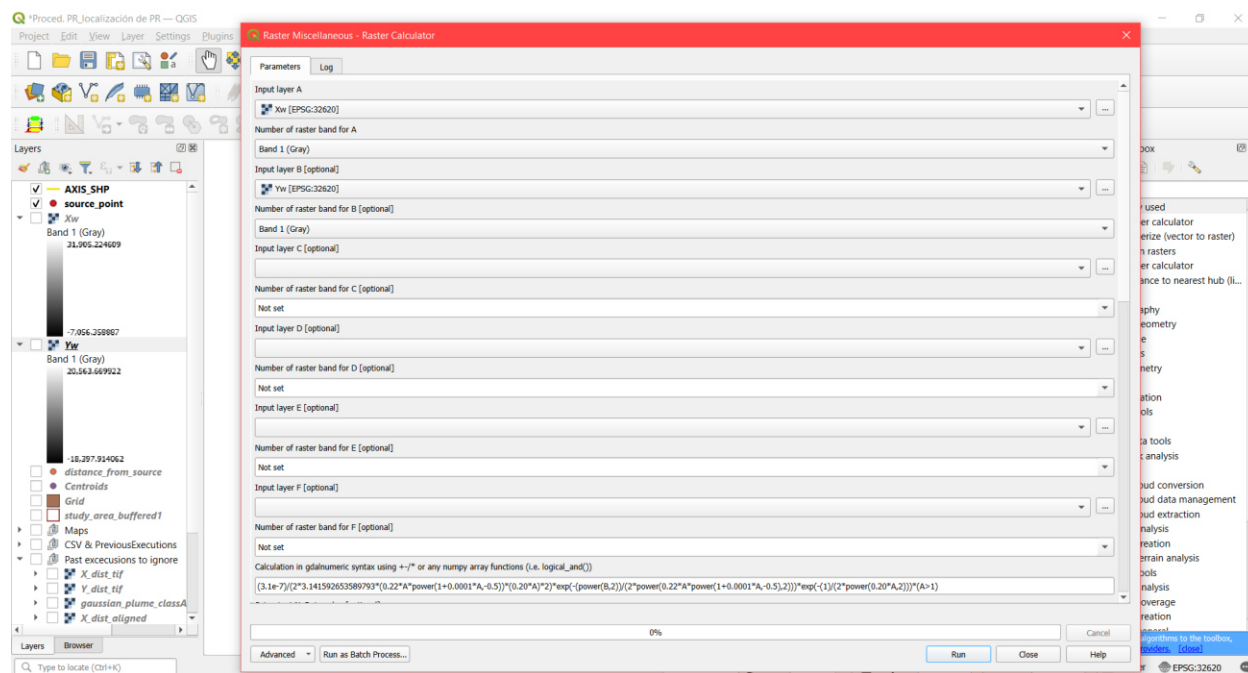


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Error en sintaxis de la fórmula, se procedió a arreglarlo (permaneció el nombre para el output ya que el mismo no se produjo).

Figura 229

Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.



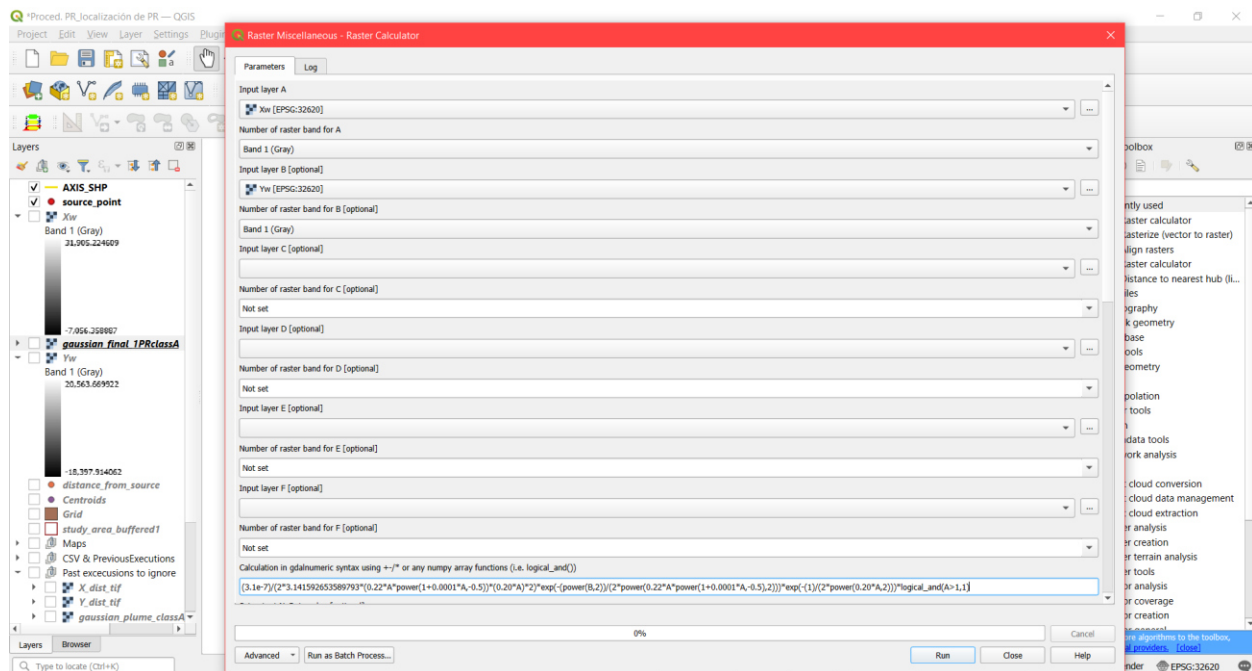
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Error en sintaxis de la fórmula nuevamente, se procedió a arreglarlo (se cambia el nombre del output).

Figura 230

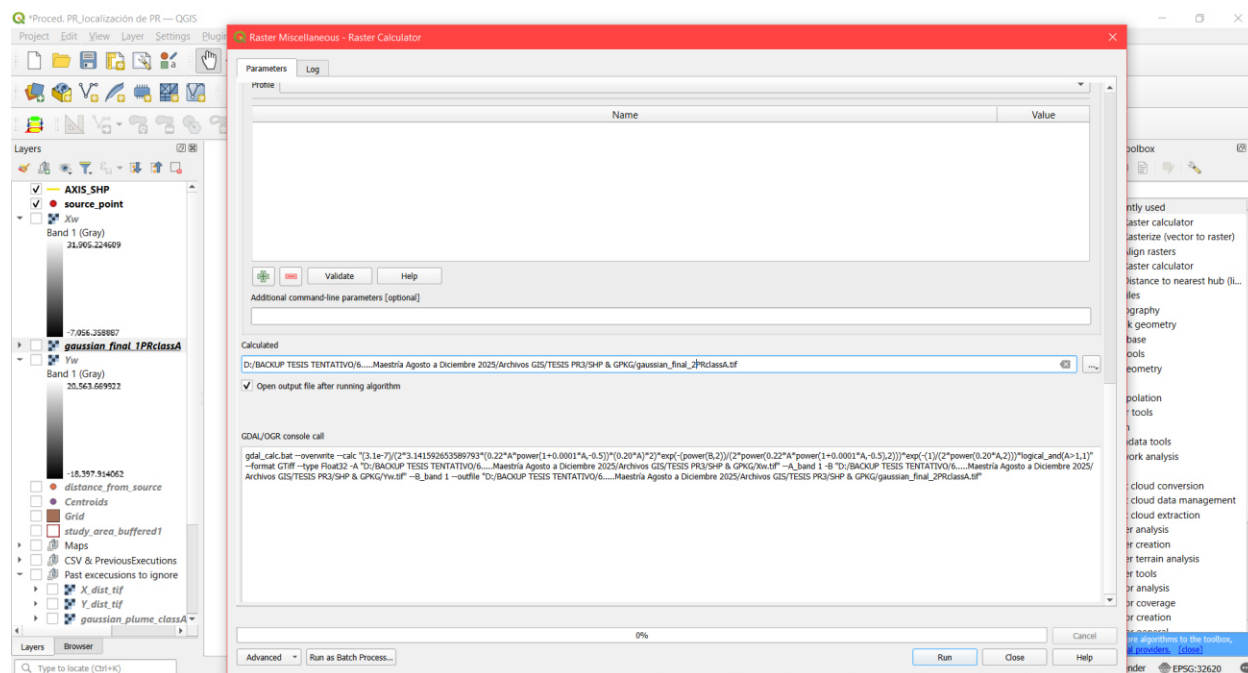
Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla, se realizó un ajuste con matemática y física completa

Fórmula: $(3.1e-7)/(2*3.141592653589793*(0.22*A*power(1+0.0001*A,-0.5))*(0.20*A)^2)*exp(-(power(B,2))/(2*power(0.22*A*power(1+0.0001*A,-0.5),2)))*exp(-(1)/(2*power(0.20*A,2)))*logical_and(A>1,1)$



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

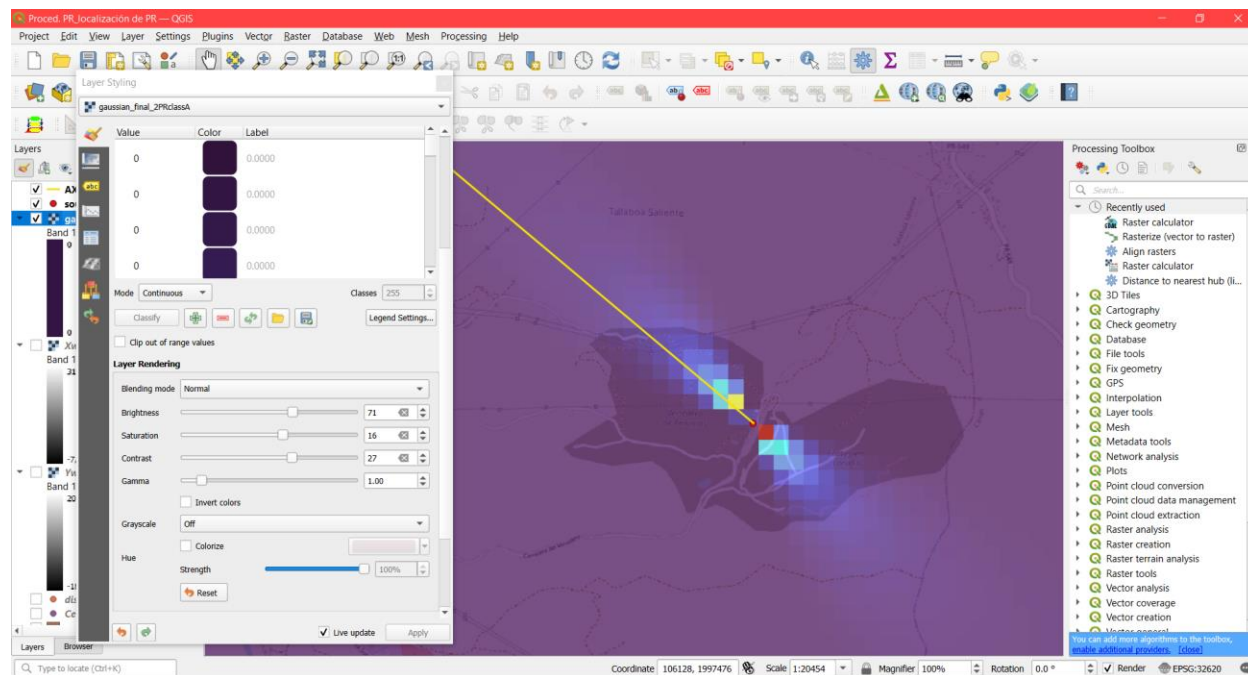
Figura 231

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

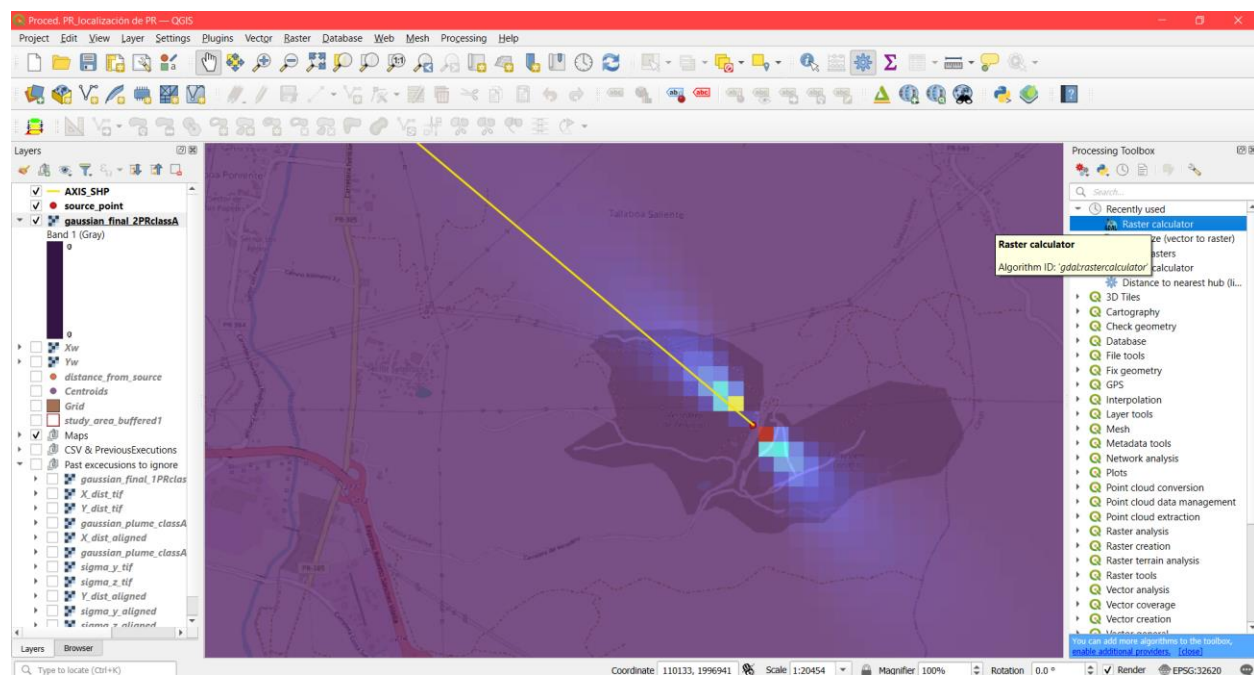
Figura 233

Continuación del Proceso. Visualización ajustada con la simbología y “zoom”



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

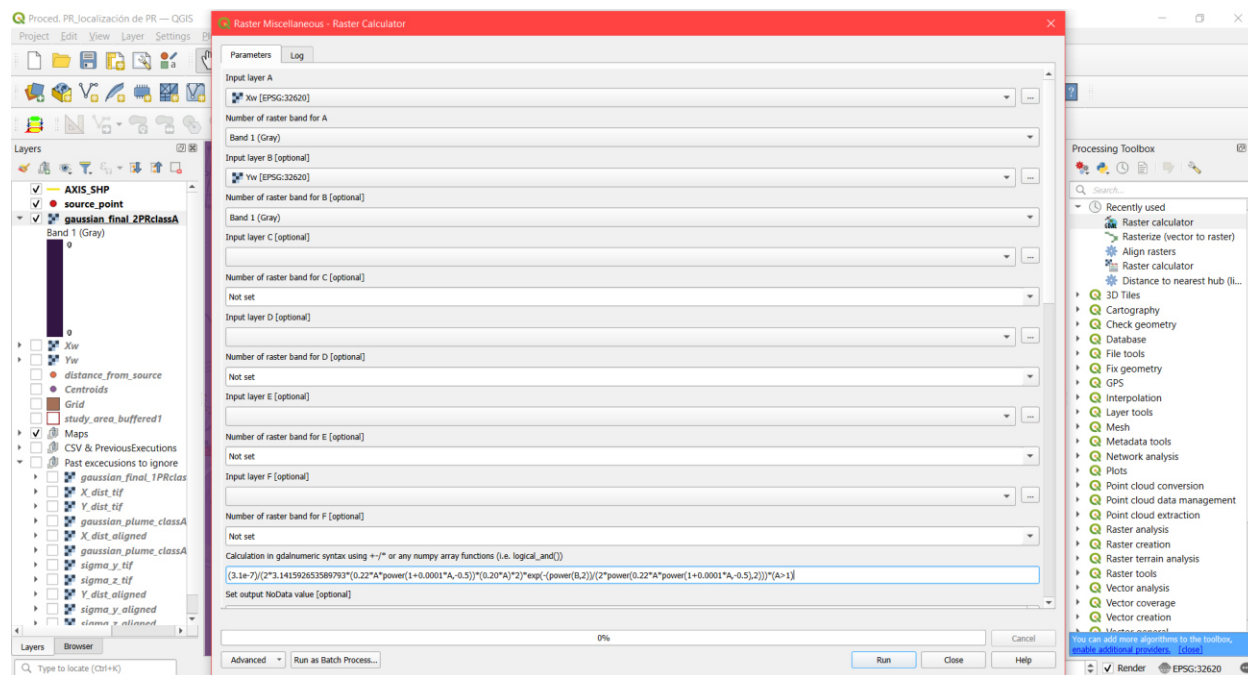
Al parecer los valores de la dispersión son muy pequeños (muy pequeños para la precisión de la computadora), hay que recordar que la ejecución que se realizó al momento está bien matemáticamente hablando, pero como los números son demasiado pequeños es numéricamente invisible. Por tanto, se procedió a realizar los próximos pasos para mejor visualización y/o estabilizar el modelo. (En esta parte se va a remover de manera temporal el término que provoca decaimiento vertical (los exponentes)) $\exp(-(1)/(2*\text{power}(0.20*A,2)))$ para reemplázalo como se verá a continuación.

Figura 234*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

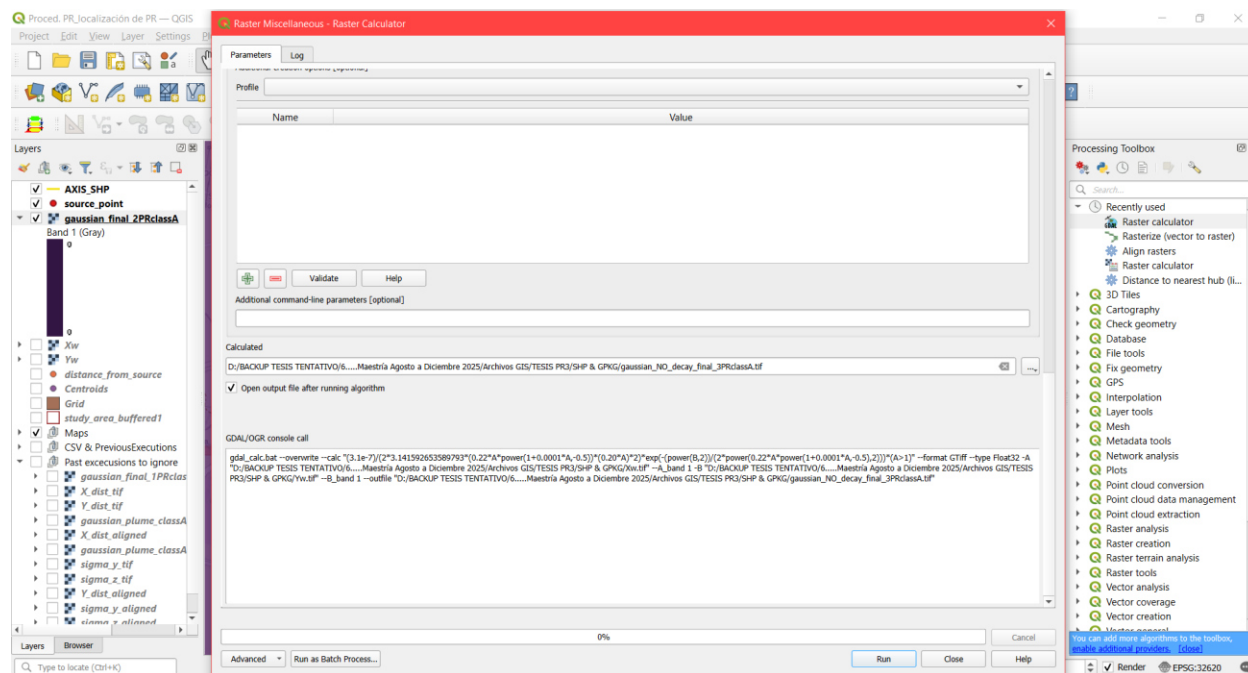
Figura 235

Continuación del Proceso. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

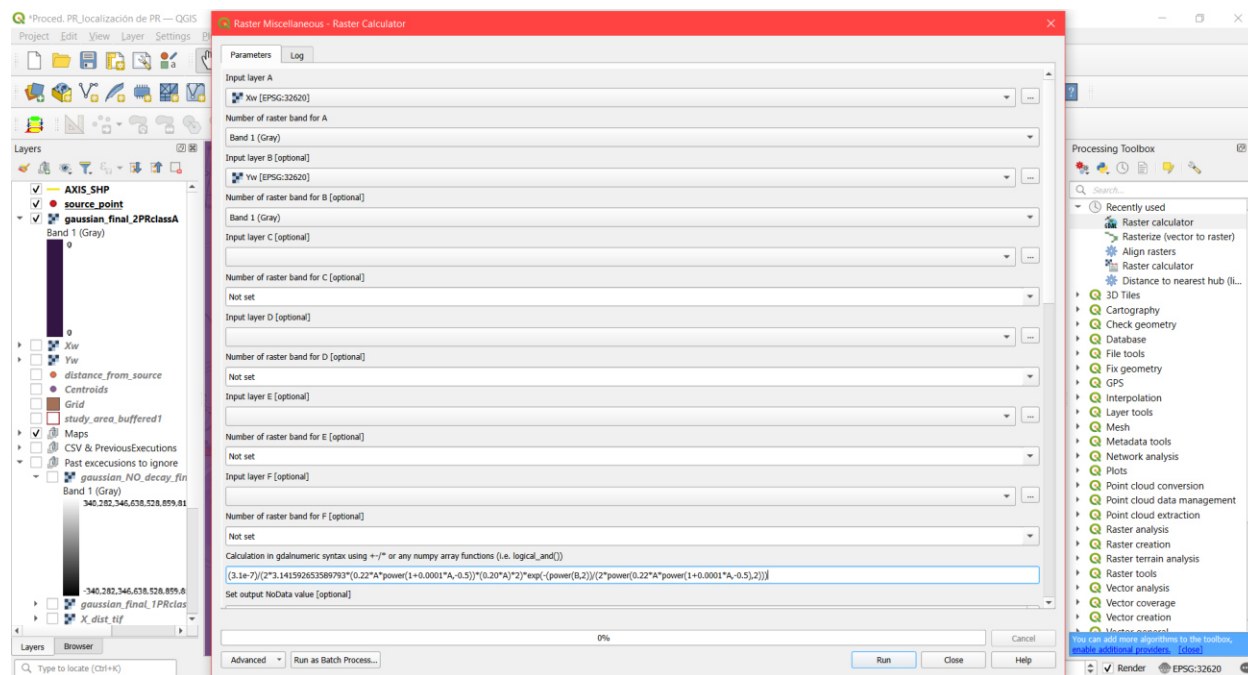
Figura 236

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Se produjo error en la sintaxis de la fórmula, se procedió a arreglarlo.

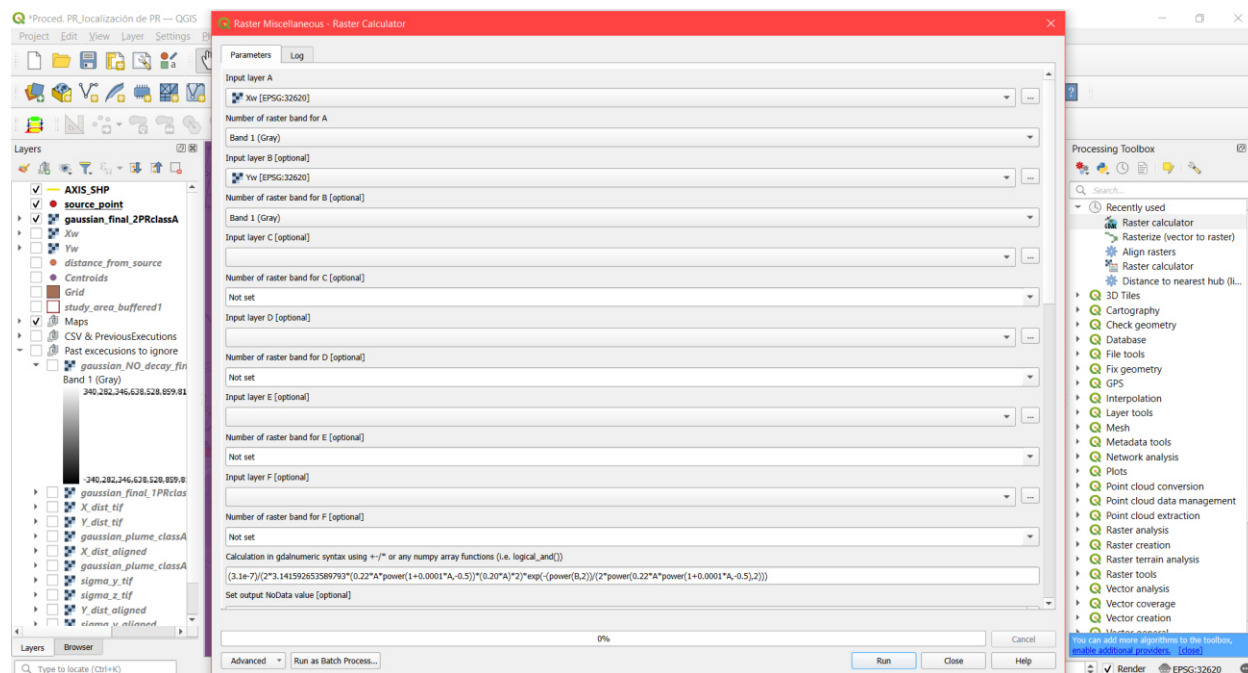
Figura 237

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

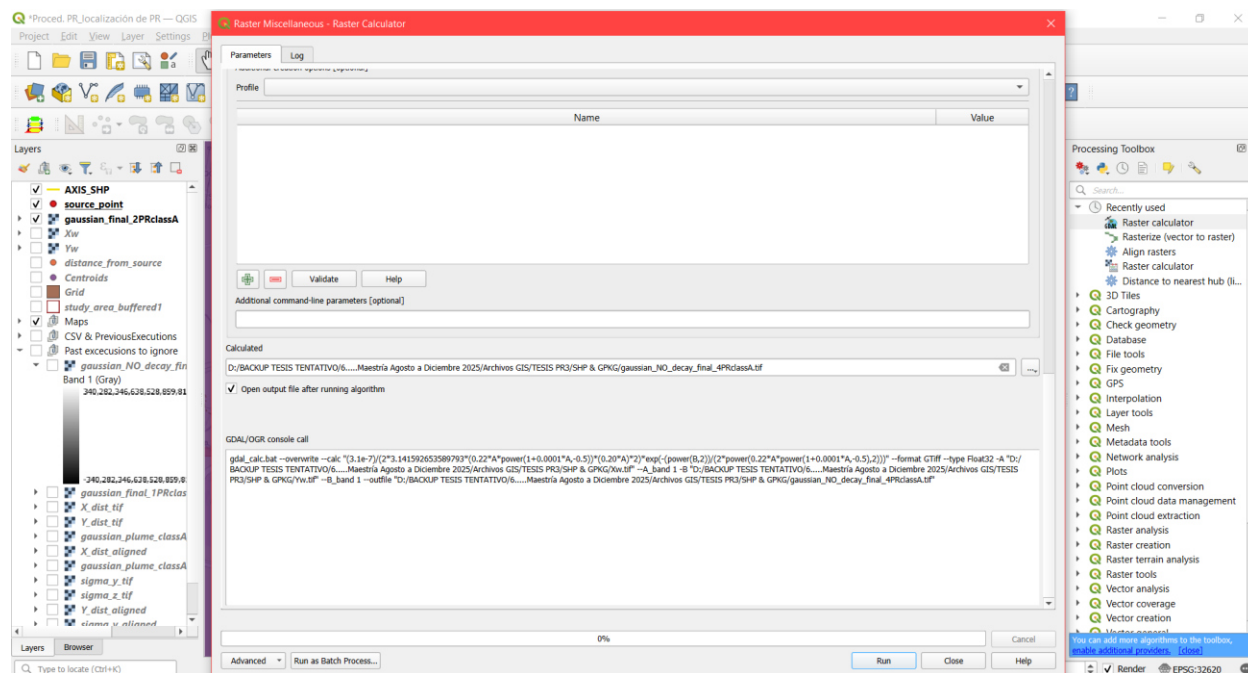
Se produjo un error en ejecución debido a que el nombre del output ya estaba siendo utilizado como capa en el proyecto, se procedió a arreglar el nombre y volver a correrlo. Se puede observar la fórmula en la captura de pantalla.

Figura 238

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

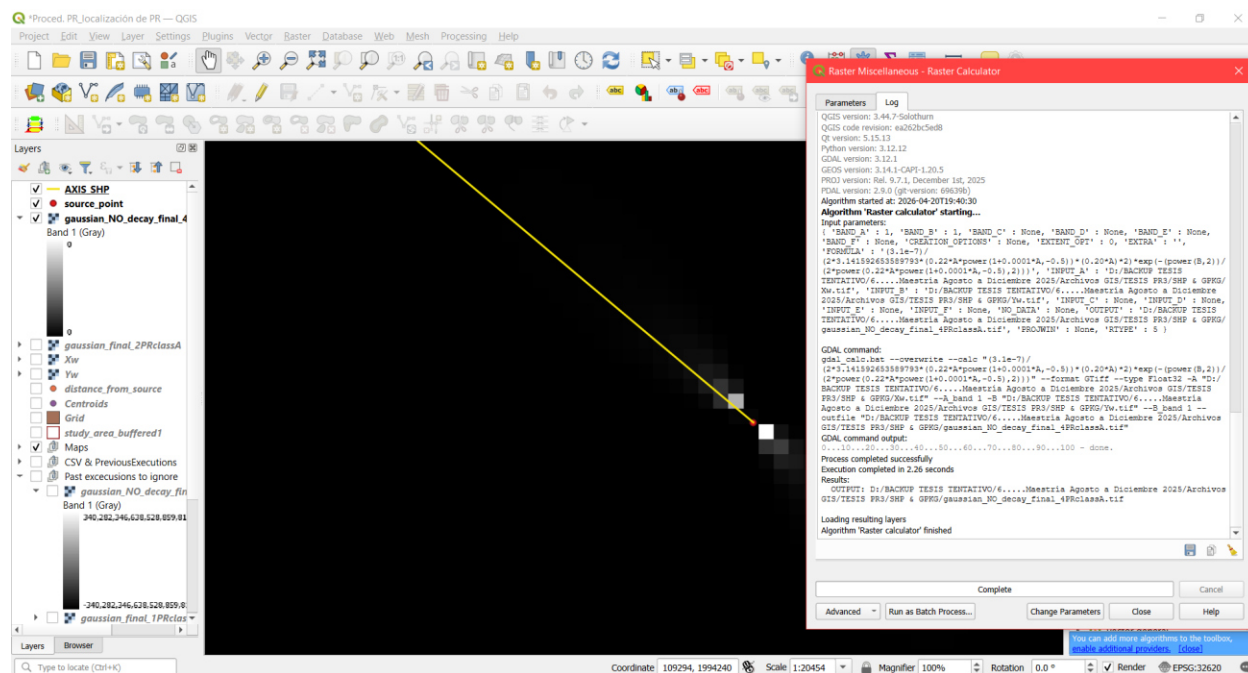
Figura 239

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 240

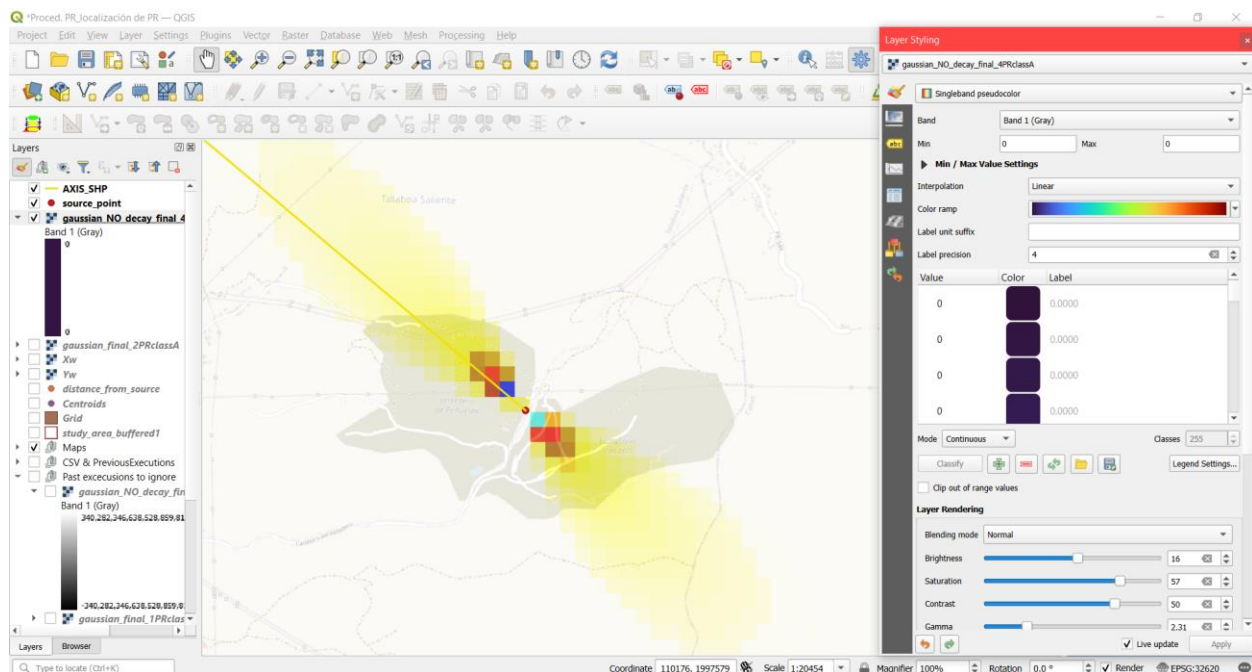
Continuación del Proceso. Se visualizó la corrida exitosa.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 241

Continuación del Proceso. Visualización con la simbología aplicada, es importante aclarar lo siguiente, físicamente esta visualización es la correcta para un modelo gaussiano. Si el autor espera que se vea el penacho en una sola dirección, eso es cuestión de una decisión de “filtrado direccional” (no de matemáticas, no de física). Se ve de esta manera, ya que hay simetría en Y, y esto no es un error. Se puede arreglar con simbología, lo cual se intentó, pero no funciona ya que los valores son muy bajos o “forzar” el penacho a que exista de un solo lado, pero haciendo esto, ya deja de ser un penacho o dispersión gaussiana real y solo quedaría siendo una suposición.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

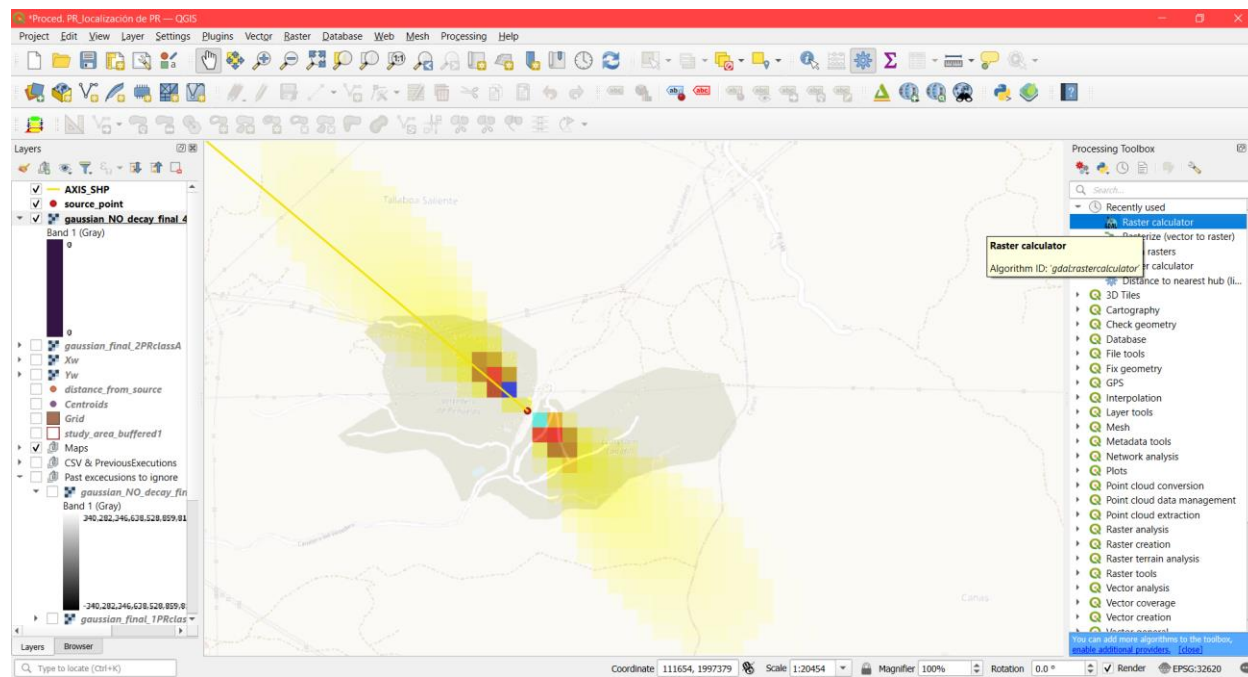
Realizar un ajuste o modificación a la simetría de Y, es una acción que no se debe tomar, ya que, no se debe hacer a menos de que este justificado. Por otra parte, realizar esta acción puede provocar errores futuros (tomando en consideración la matemática que se aplicaría) en los siguientes factores: que el penacho no se vea en el eje, que el penacho vaya a la deriva (se desvíe), o que la expansión de la dispersión sea desigual, entre otros errores que se podrían presentar.

Aun así, a continuación, se puede ver que se intentó filtrar, mediante fórmulas la parte simétrica de espejo hacia el sureste que se ve en el modelo, pero tras múltiples intentos de calculadoras y fórmulas, se concluyó que presentar el modelo original o actual (presentado previamente y que se explica que es arriesgado modificar), es sin duda lo más apropiado. Como las acciones a continuación en busca de filtrar la mitad de la simetría no son parte del procedimiento y el mismo se culmina en este punto, lo que verán a continuación como **Paréntesis** puede ser ignorado, hasta el **Paso 16** donde se verá el procedimiento para la obtención de datos.

(Comienza Paréntesis)

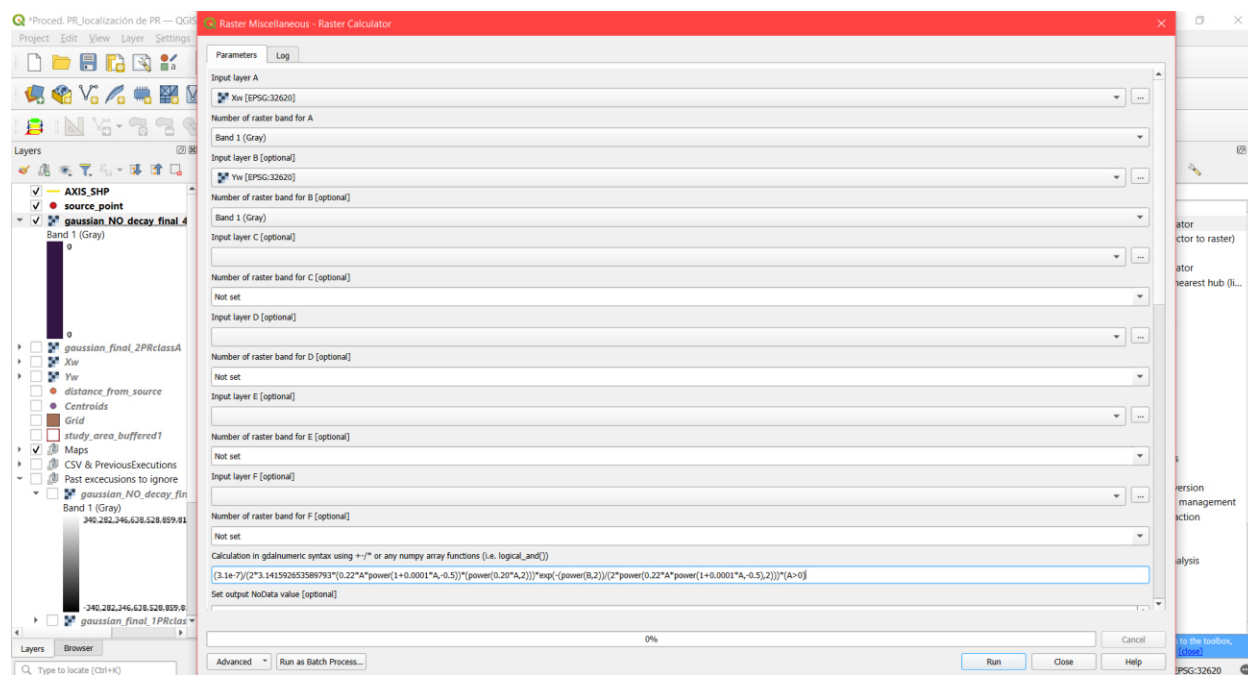
Figura 242

Continuación del Proceso. Se procedió a realizar un ajuste para que el penacho deje el comportamiento simétrico de espejo.



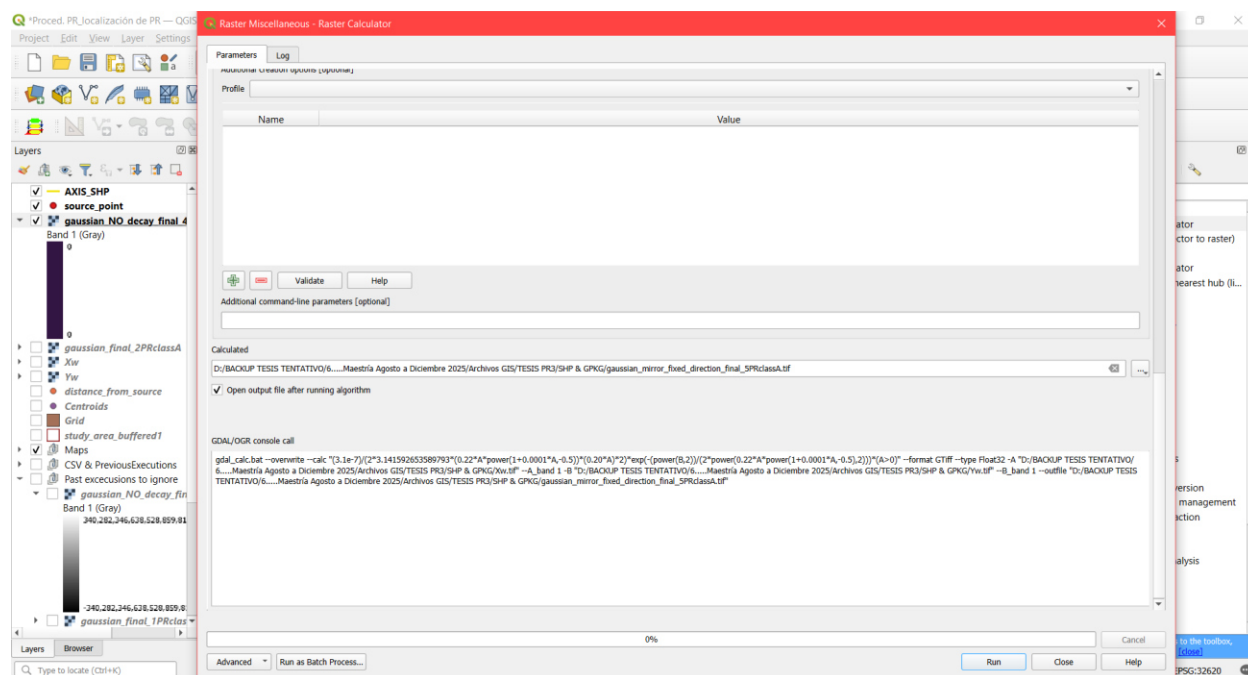
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 243

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

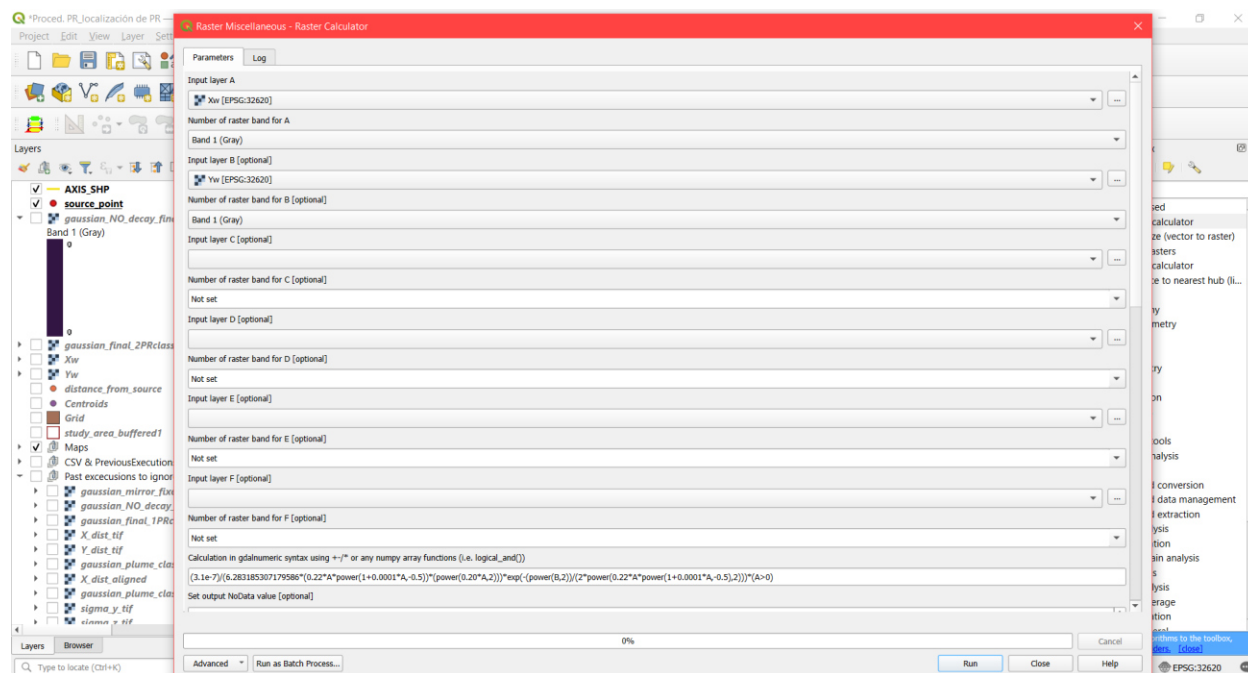
Figura 244

Continuación del Proceso

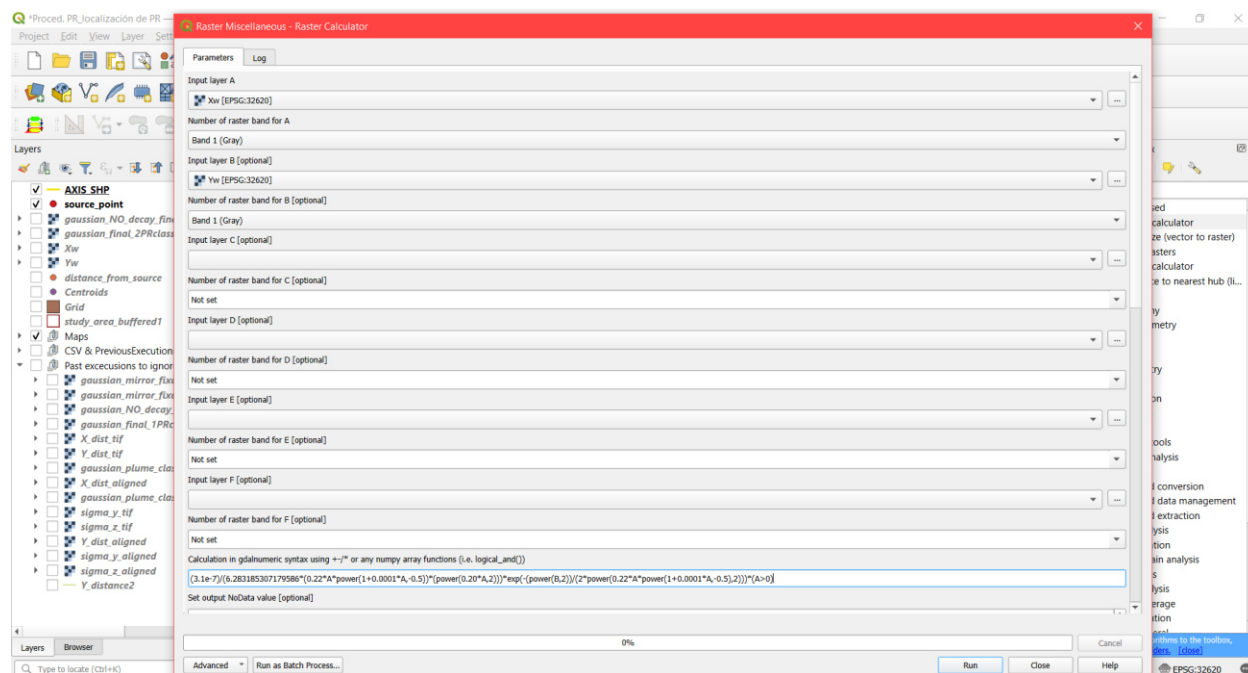
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Error en la fórmula, se procedió a arreglarla (se multiplica el π).

Figura 245

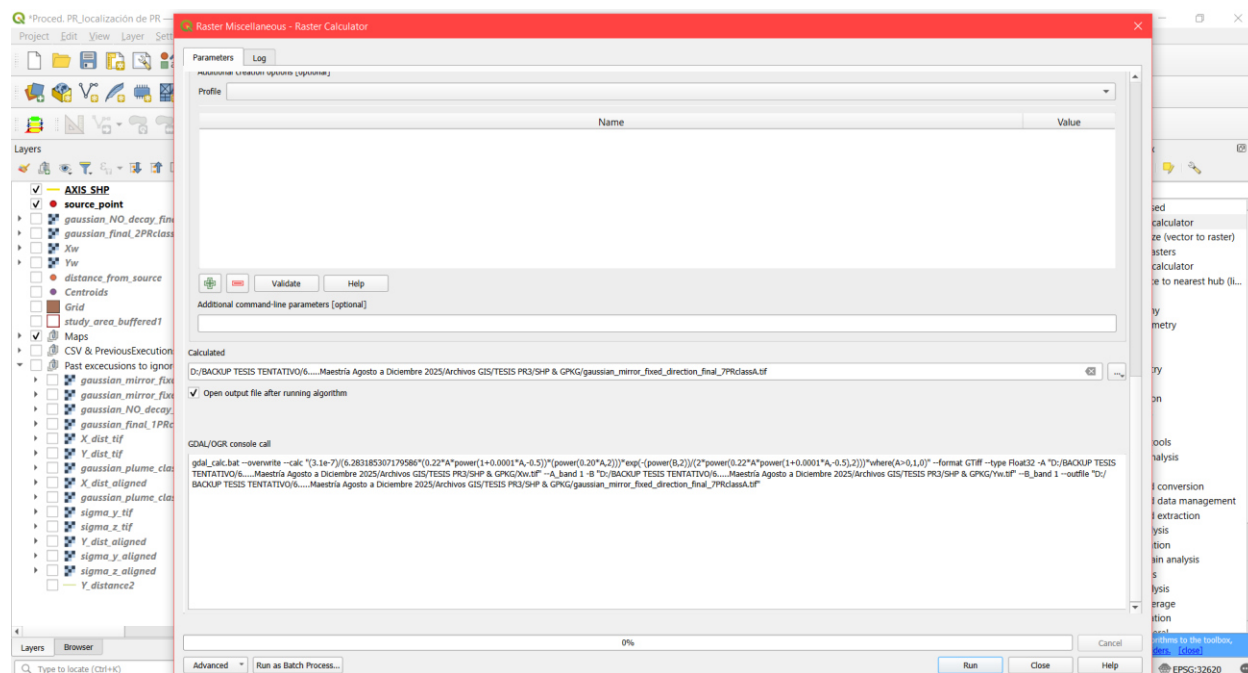
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 247*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

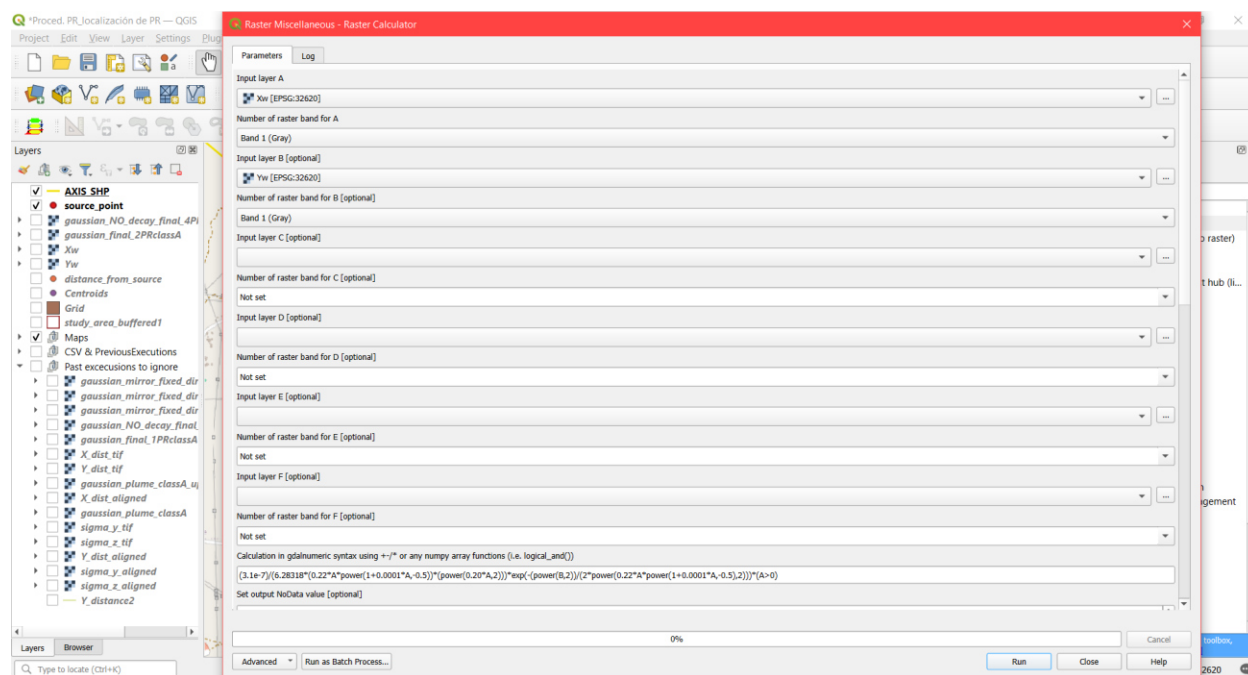
Figura 248

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

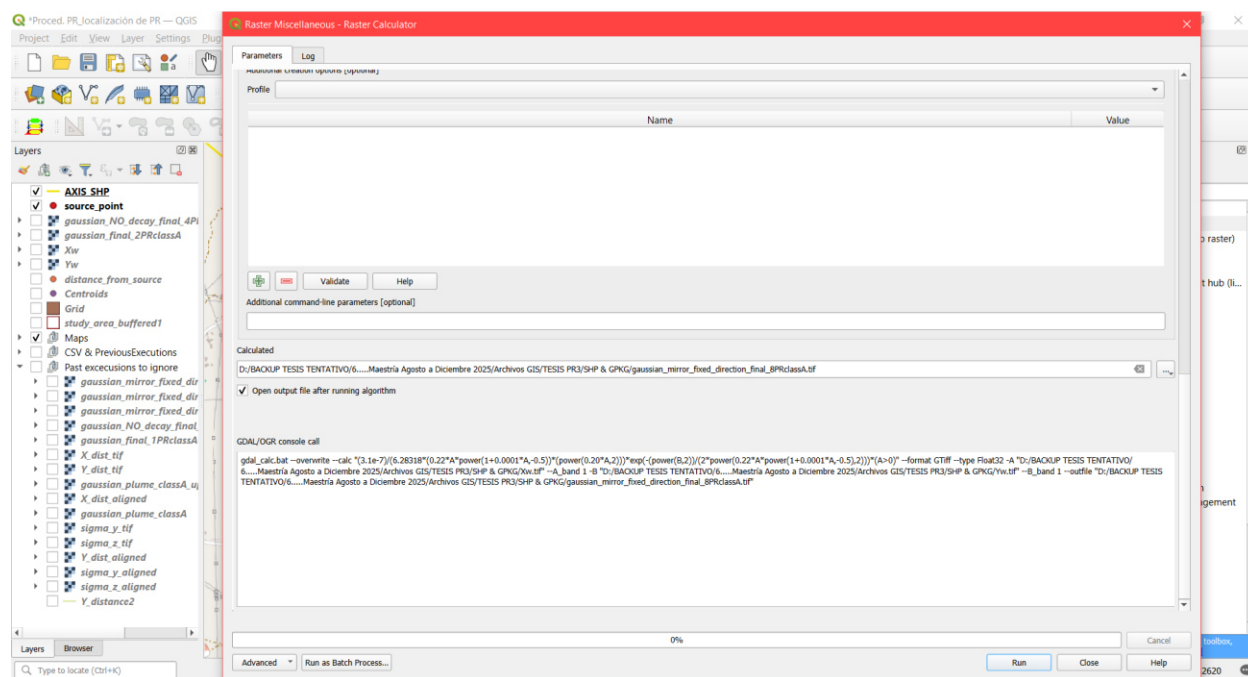
Error en sintaxis, se procedió a arreglarlo nuevamente.

Figura 249

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 250

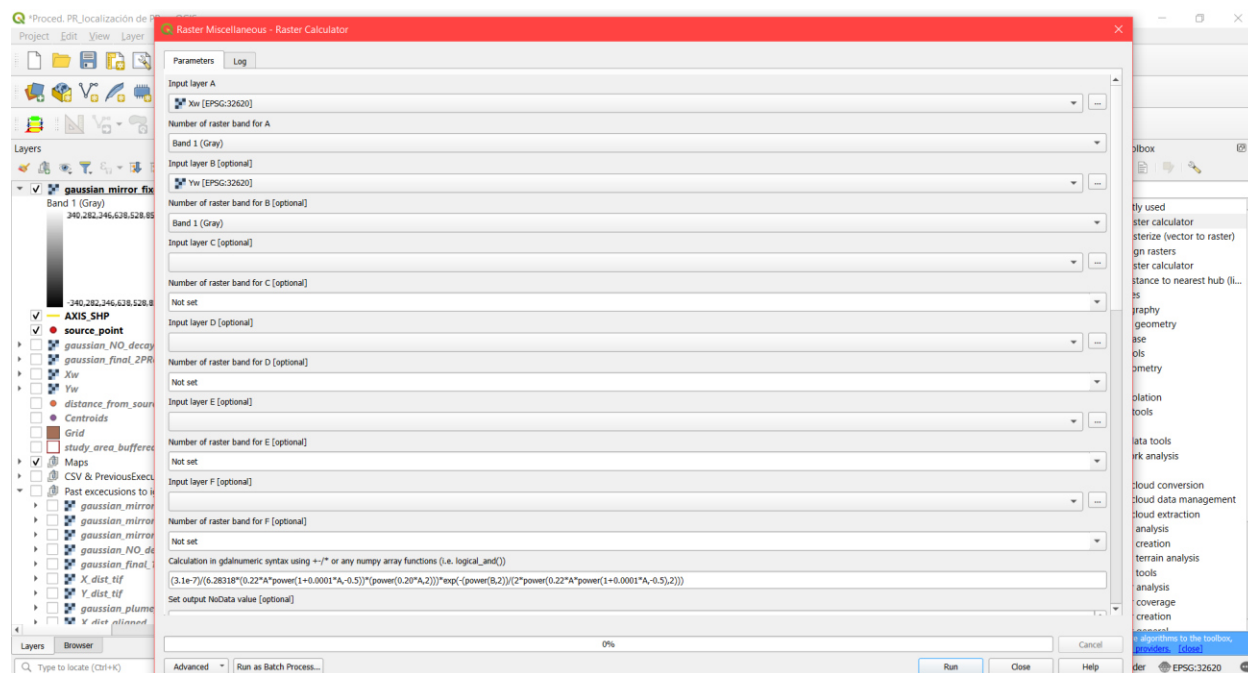
Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

Para asegurarse de que el modelo corra se procedió a dividir la ecuación en dos partes. Primero, correr el modelo con la fórmula sin la dirección (parte 1).

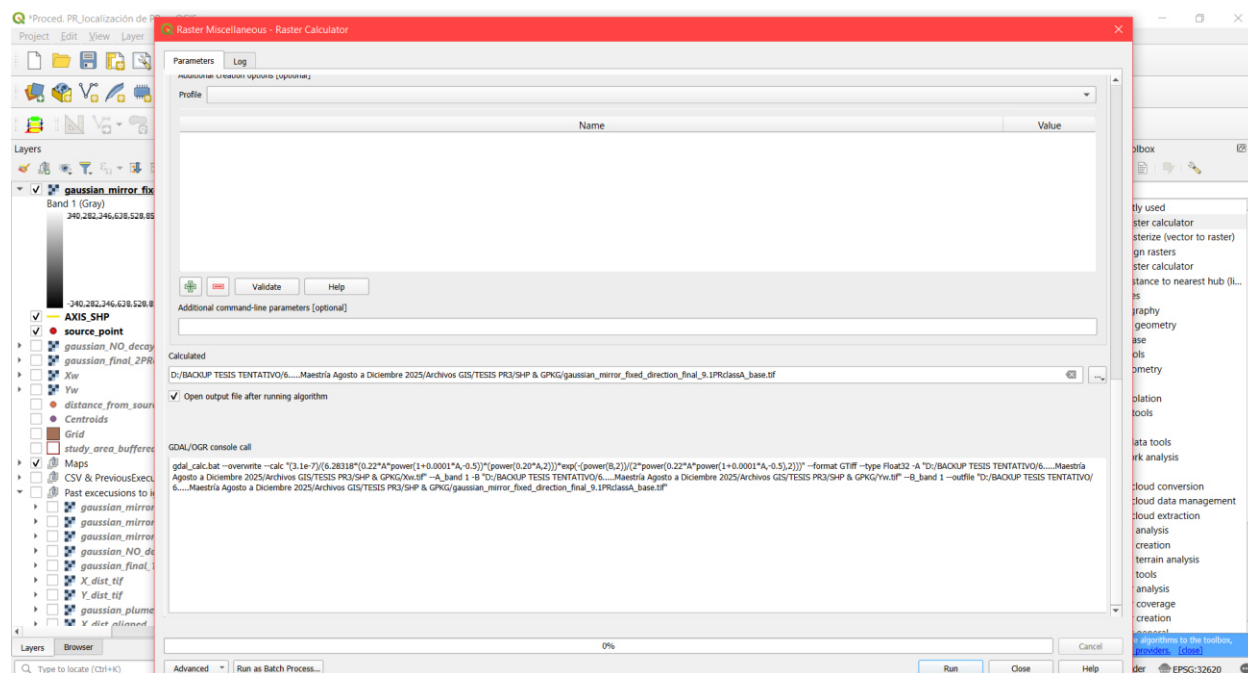
Figura 251

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

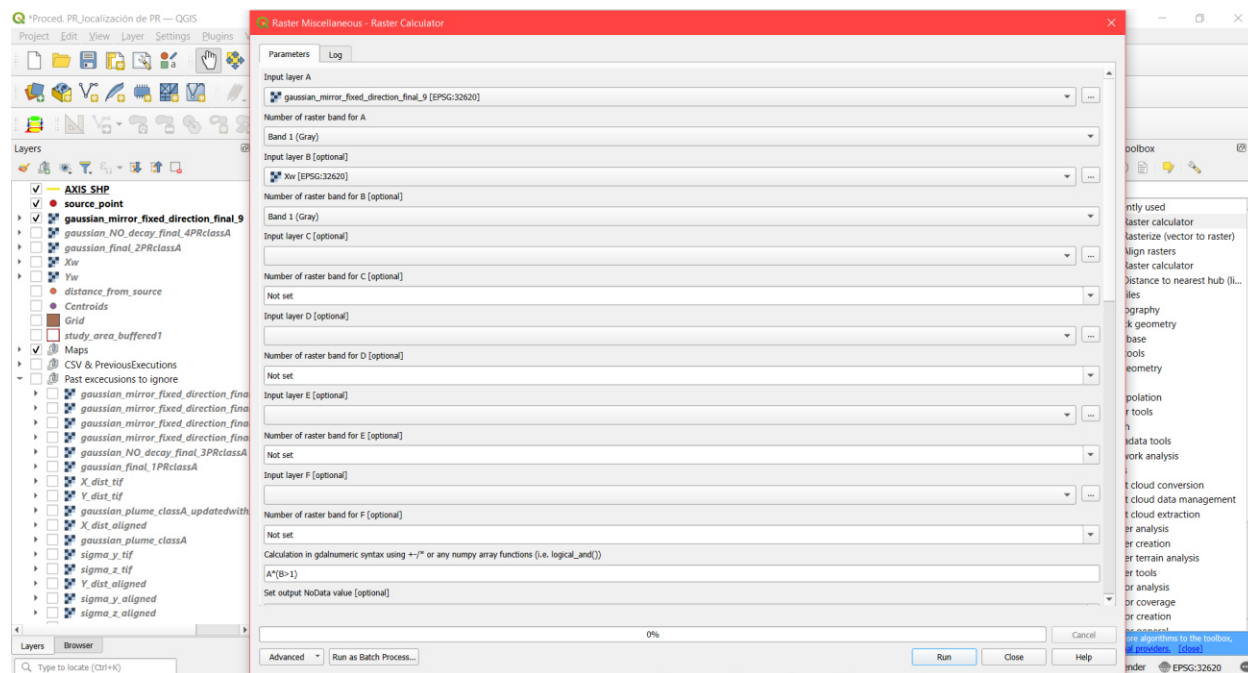
Figura 252

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

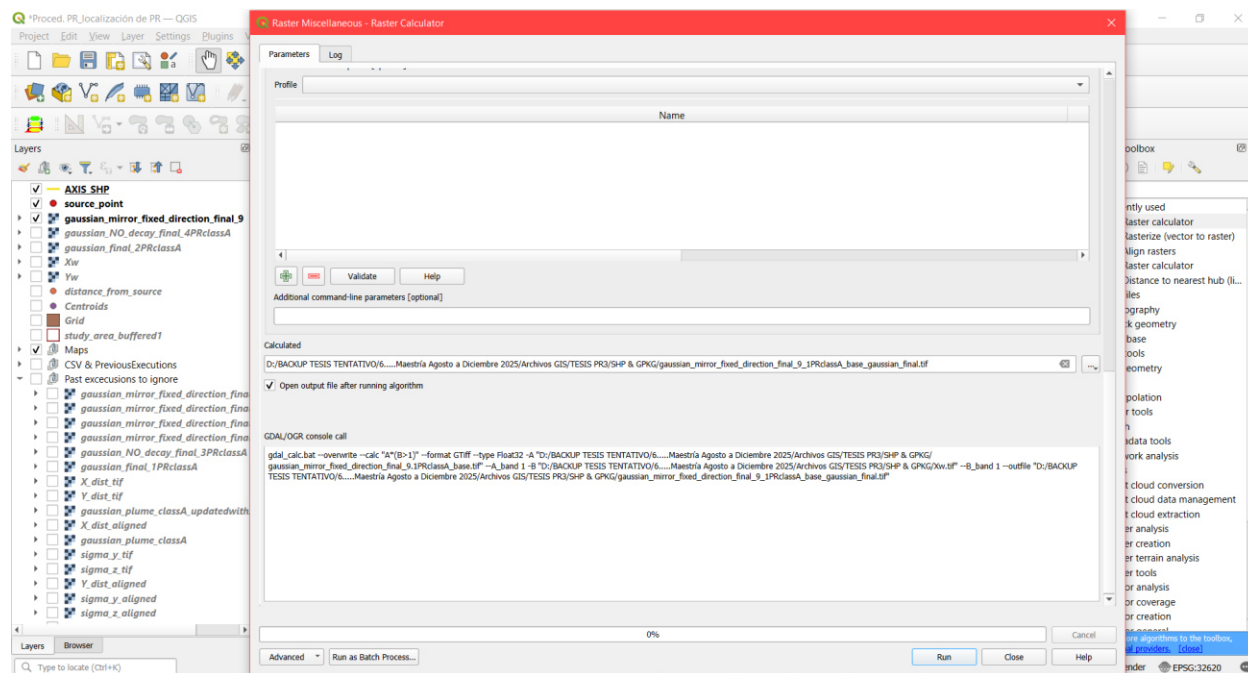
La corrida fue exitosa, se procedió con la segunda parte, que sería, añadir la distancia, esto arregla el problema de dos direcciones.

Figura 253

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solithurn” (2026).

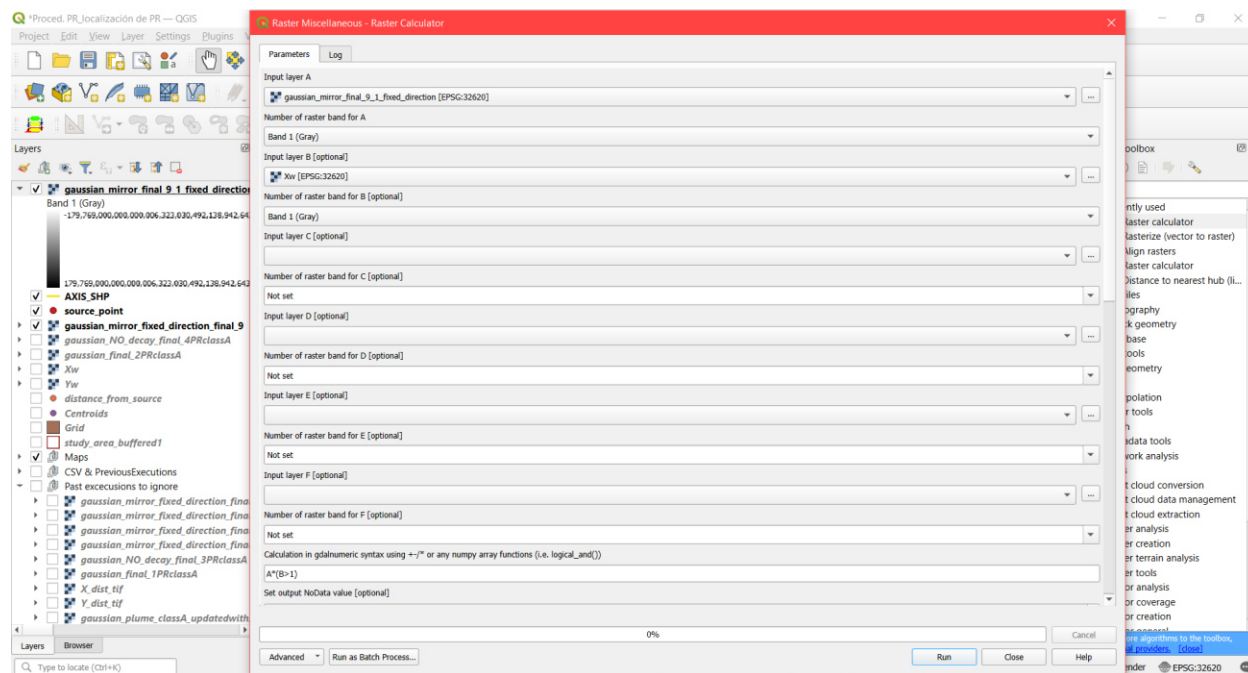
Figura 254

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

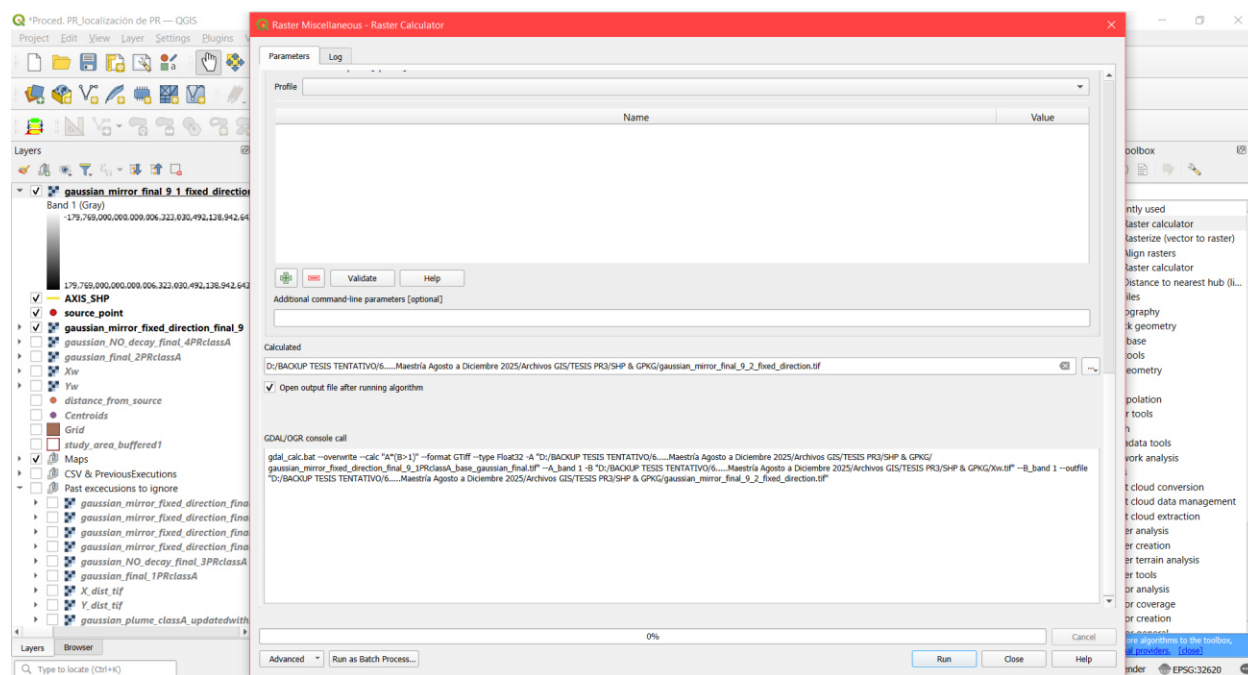
La fórmula no corrió debido a la manera en que se guardó la capa anterior se procedió a arreglarla y correrlo nuevamente.

Figura 255

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

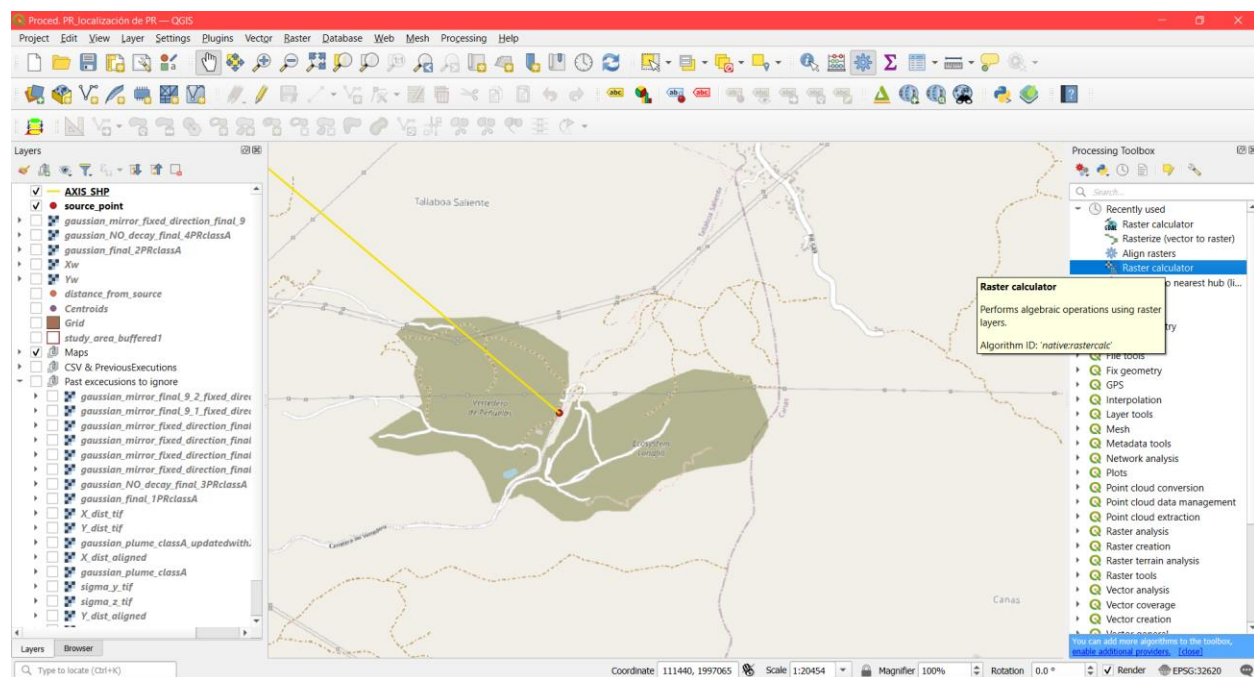
Figura 256

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.4.7 “Solothurn” (2026).

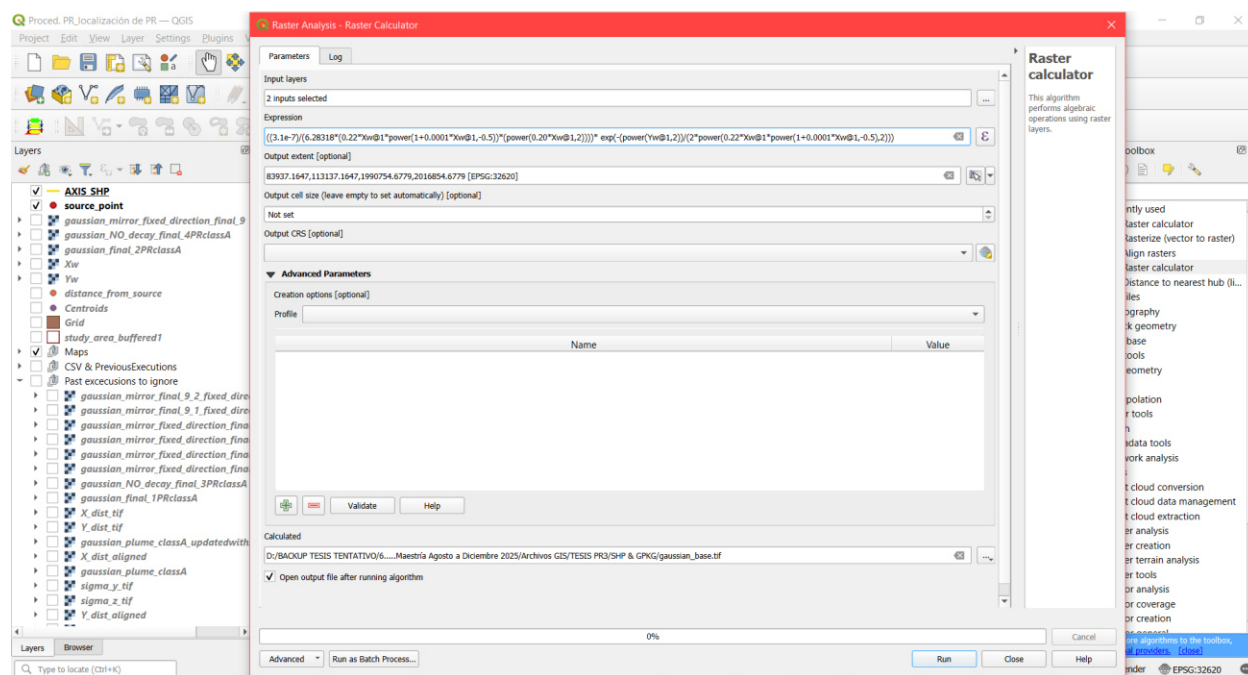
Se procedió a cambiar de calculadora para lograr que el modelo se realizara (se mantuvo la idea de dividir la fórmula en dos partes para asegurar el procedimiento).

Figura 257

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 258

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Se obtuvo otro error en sintaxis de la fórmula y se reconoce que se puede continuar intentando arreglarlo, pero se analizó lo producido anteriormente en forma de espejo; y se entendió que la ejecución del procedimiento dividiendo las fórmulas, a futuro puede seguir produciendo errores. Por tanto, considerando lo que se menciona anteriormente sobre que la simetría no es un error, se procedió a presentar de la forma de espejo original que se vio anteriormente.

(Culmina Paréntesis)

Paso 16. Presentar y evaluar los resultados numéricamente.

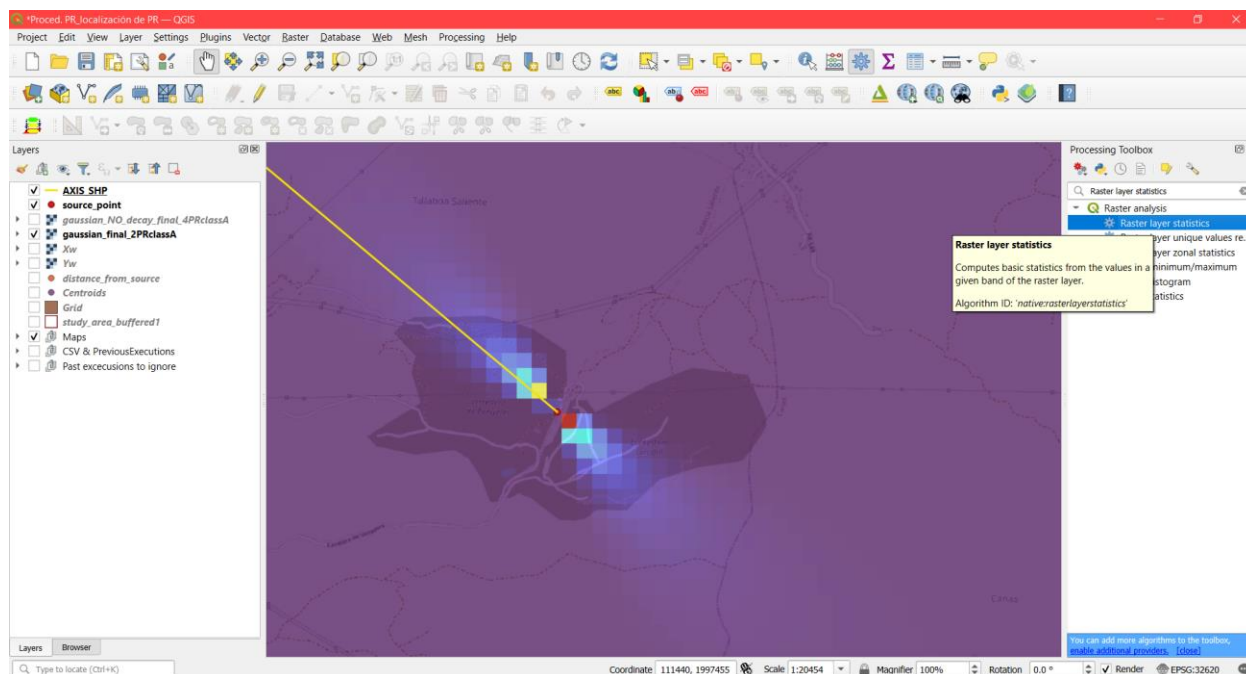
Anteriormente se visualizó los resultados de la dispersión en el mapa con la simbología aplicada.

Ahora, se procedió a buscar los mismos dentro de QGIS.

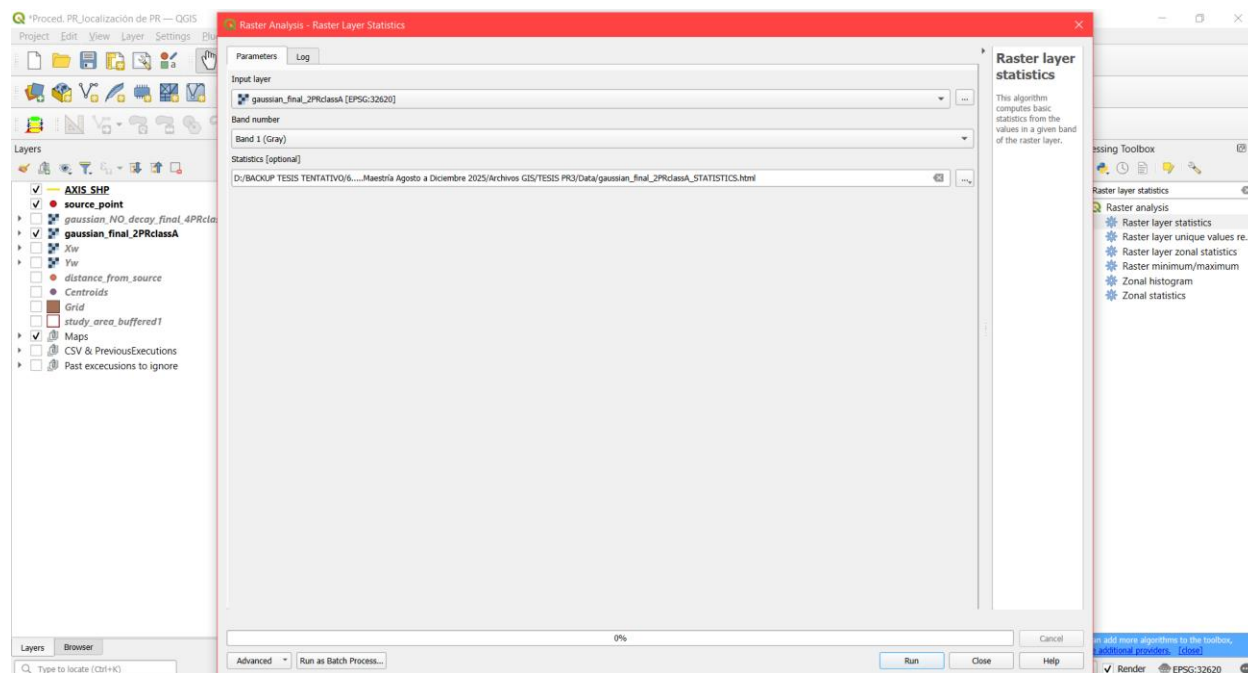
Extracción de resultados numéricos (tablas) para “gaussian_final_2PRclassA”:

Figura 259

A. Obtención de máximo / mínimo / promedio (estadísticas globales).

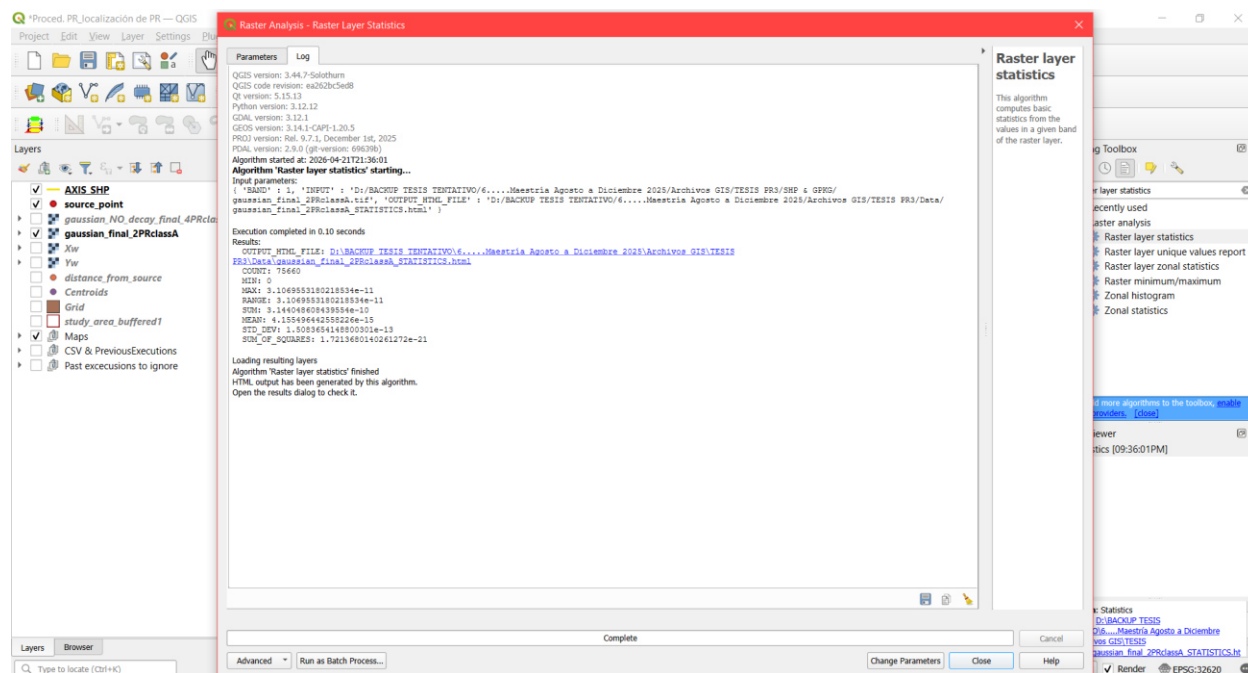


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 260*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

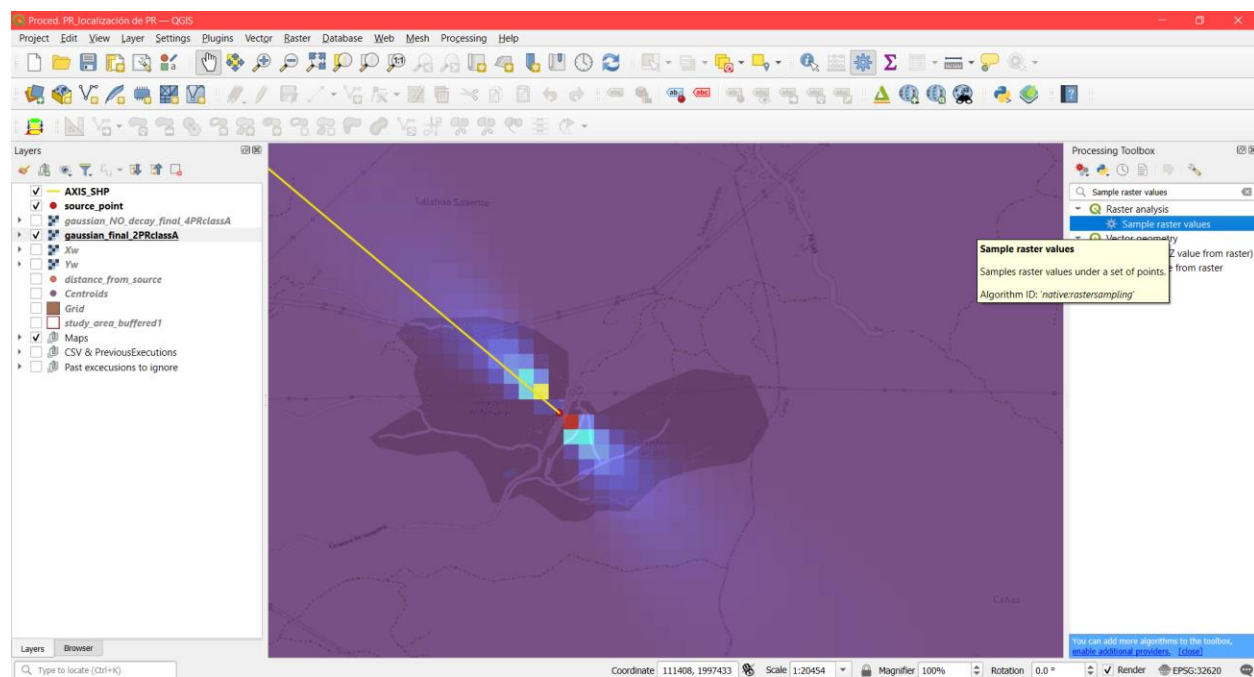
Figura 261

Continuación del Proceso

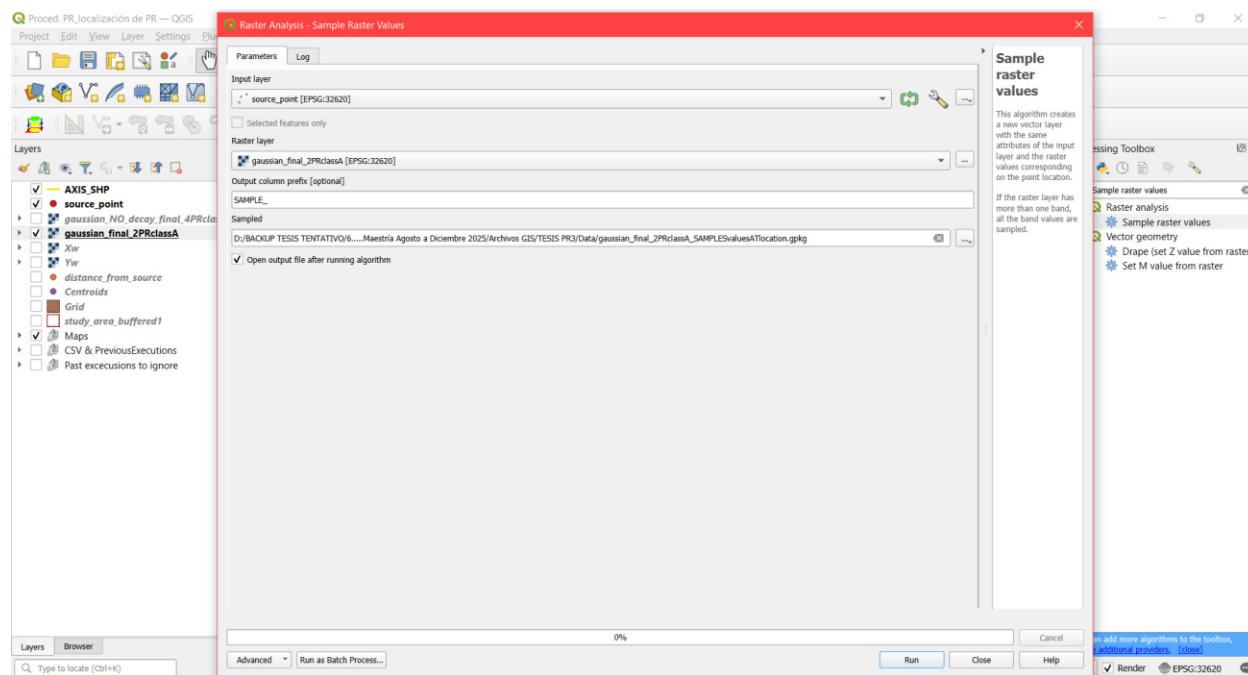
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 262

B. Valor de las muestras en la localización (pozos/receptores).

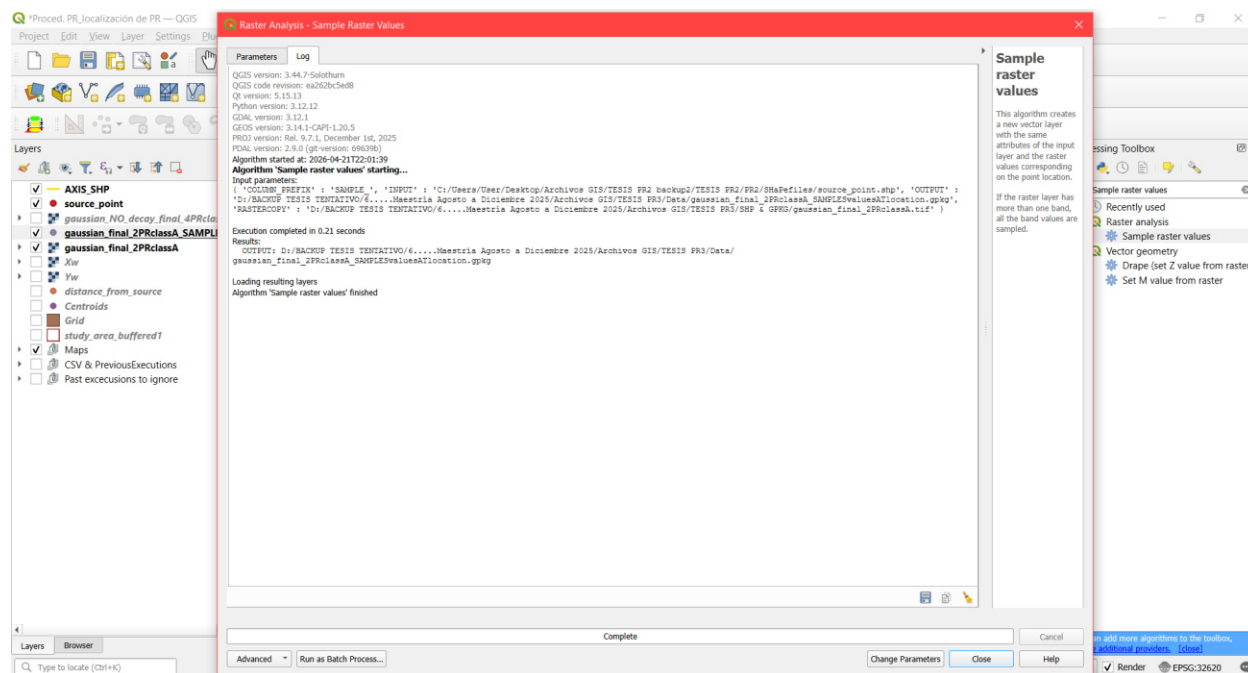


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 263*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

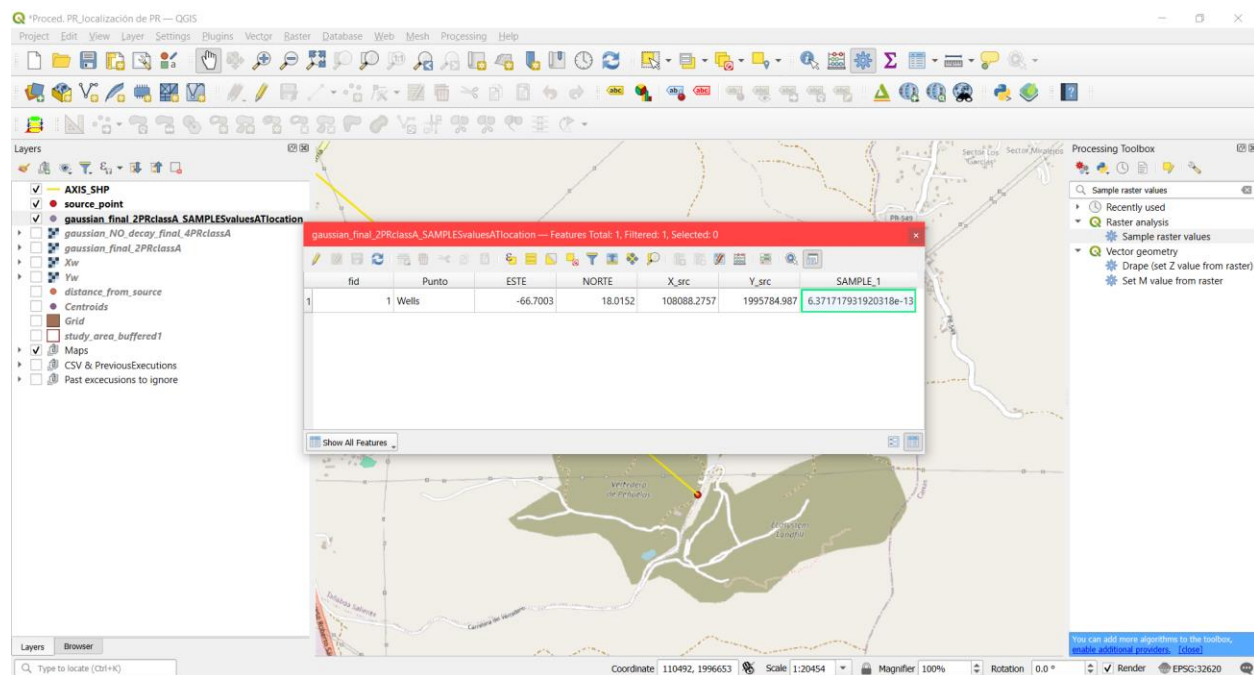
Figura 264

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 265

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

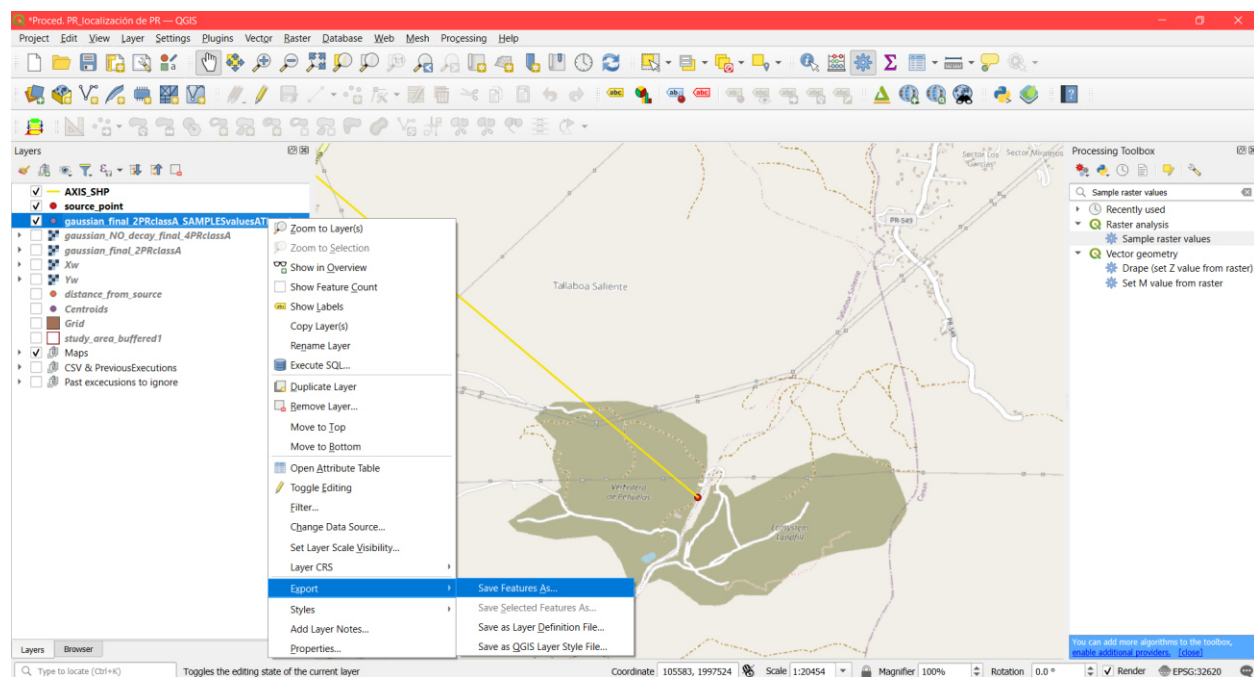
Tabla 5*Resultados numéricos.*

Extracción de resultados numéricos:	
A. Obtención de estadísticas globales.	
COUNT	75660
MIN	0 g/m ³
MAX	3.11x10 ⁻¹¹ g/m ³
RANGE	3.11 x10 ⁻¹¹
SUM	3.14 x10 ⁻¹⁰
MEAN	4.16 x10 ⁻¹⁵ g/m ³
STD_DEV	1.51 x10 ⁻¹³ g/m ³
SUM_OF_SQUARES	1.72 x10 ⁻²¹
B. Valor de las muestras en la localización.	
Receptores	6.37 x10 ⁻¹³ g/m ³
(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)	

Nota. Se muestra las concentraciones modeladas en rango de X a Y, con un promedio de valor de Z dentro de las condiciones de clase A de Pasquill y las concentraciones previstas en la ubicación del receptor oscilan entre 6.371717931920318e-13

Figura 266

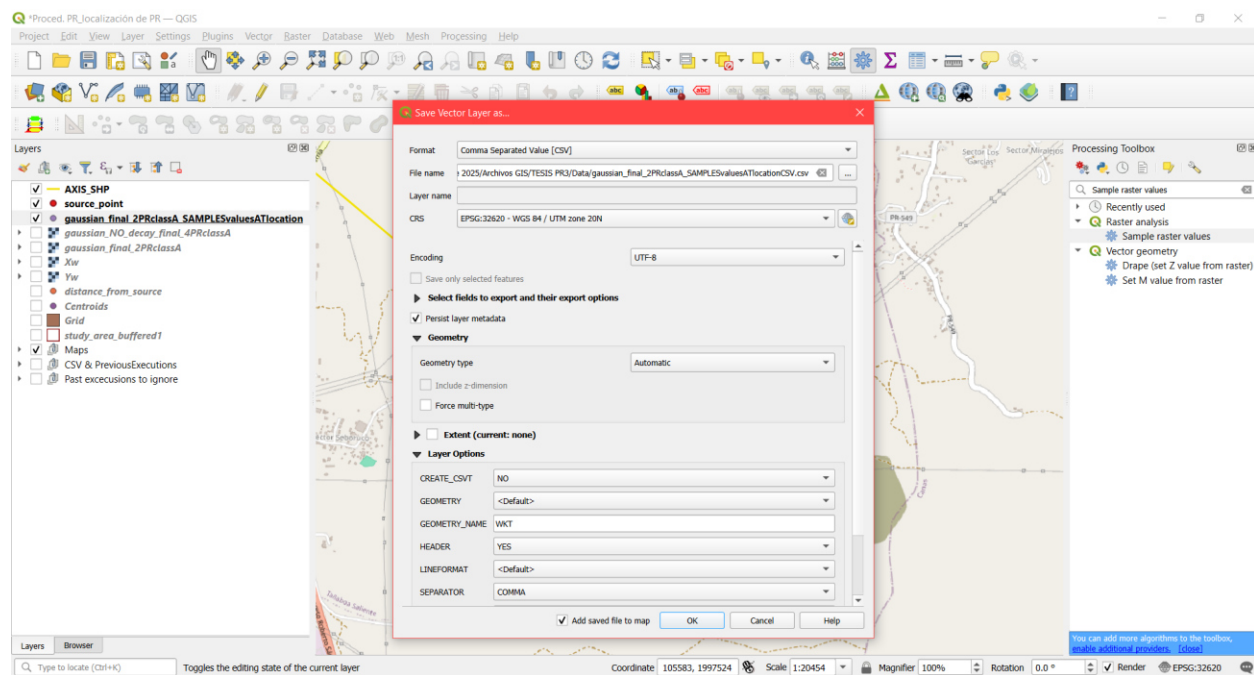
Continuación del Proceso. Se procedió a exportar la tabla como CSV.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

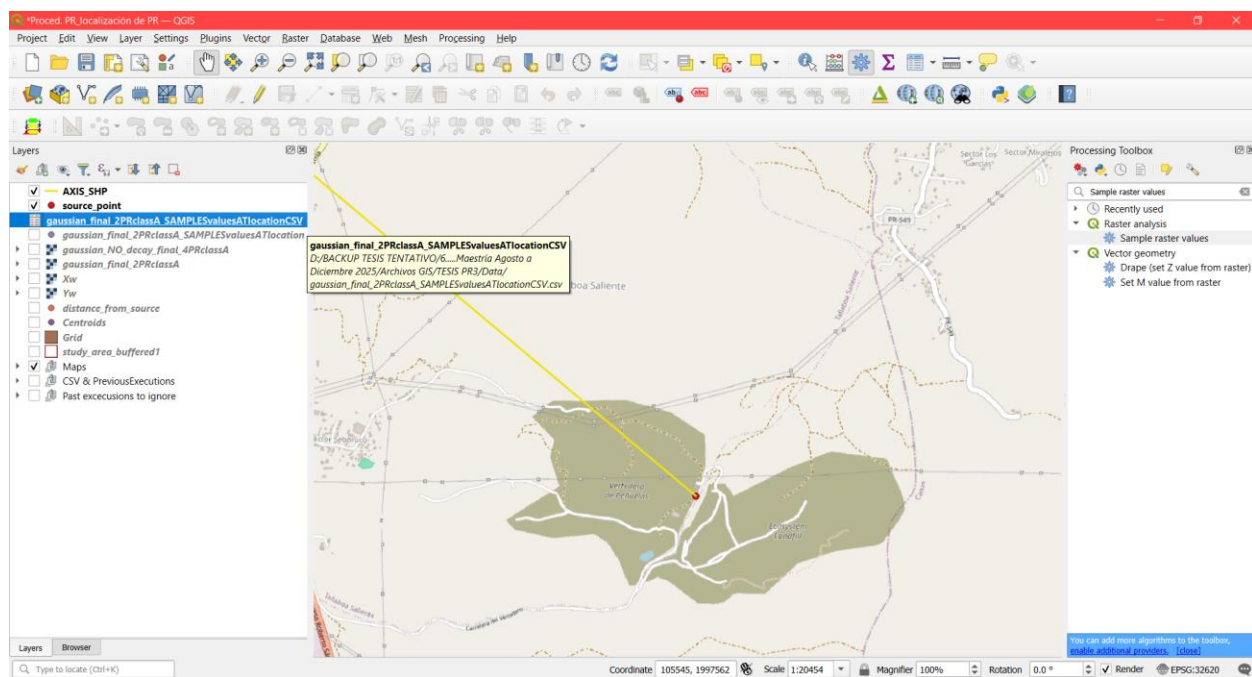
Figura 267

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

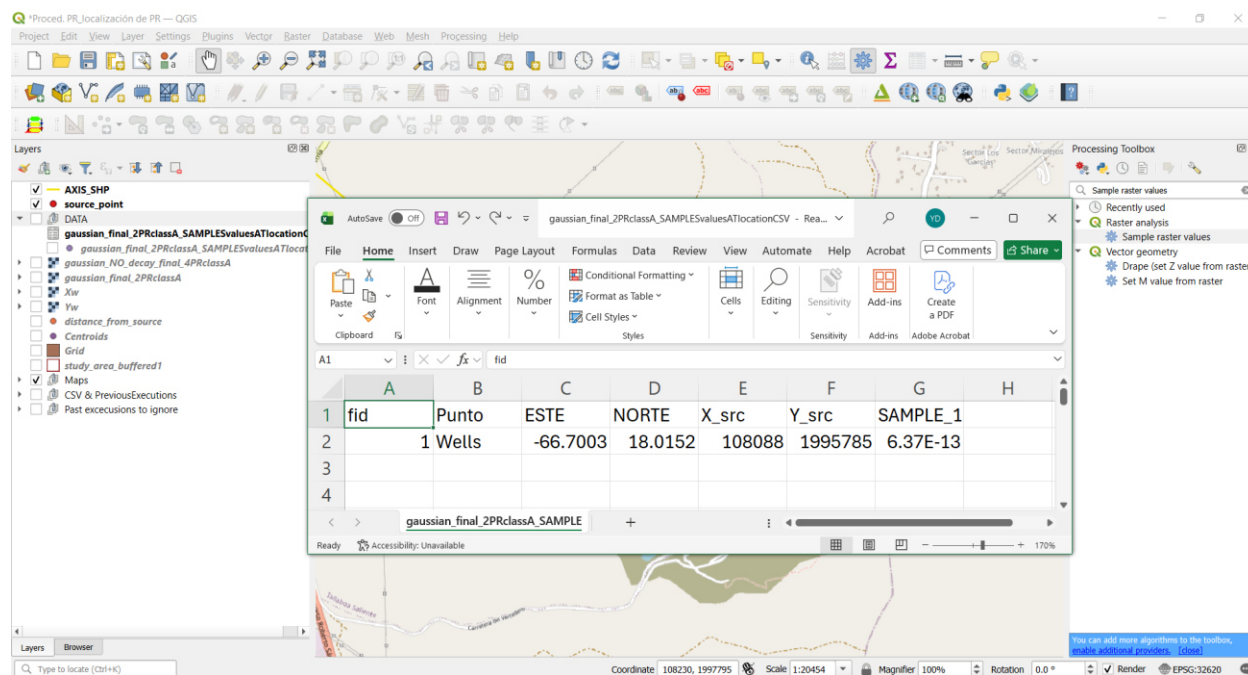
Figura 268

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 269

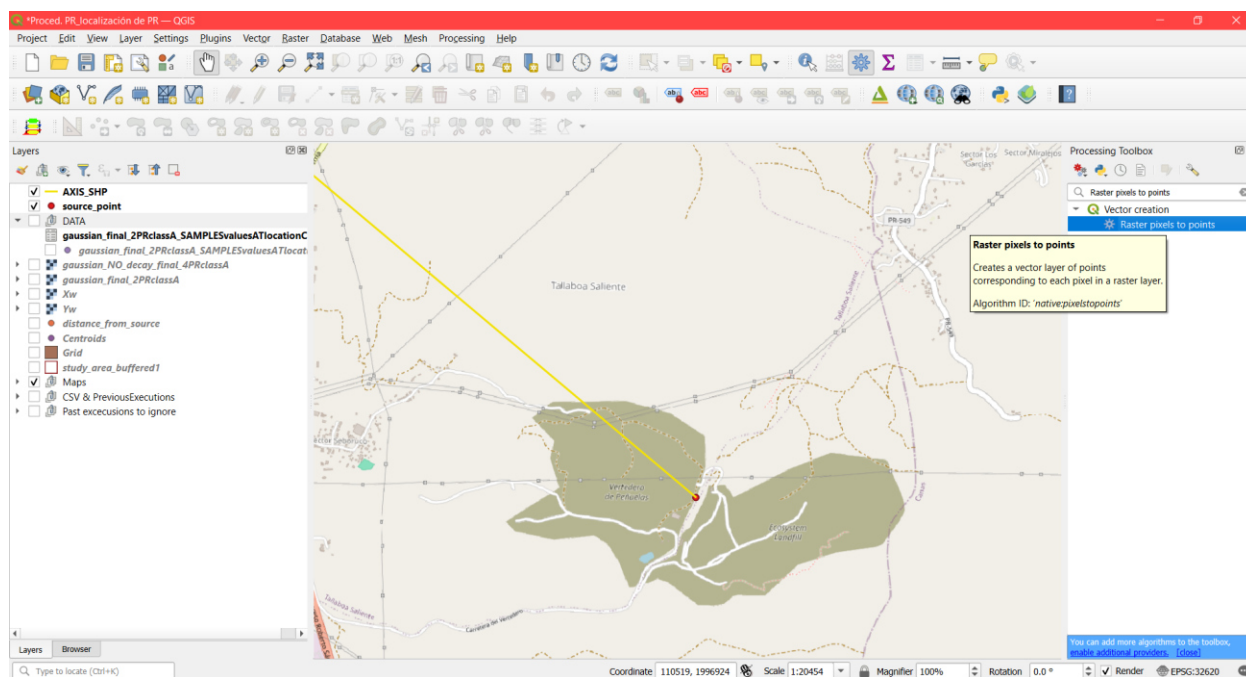
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

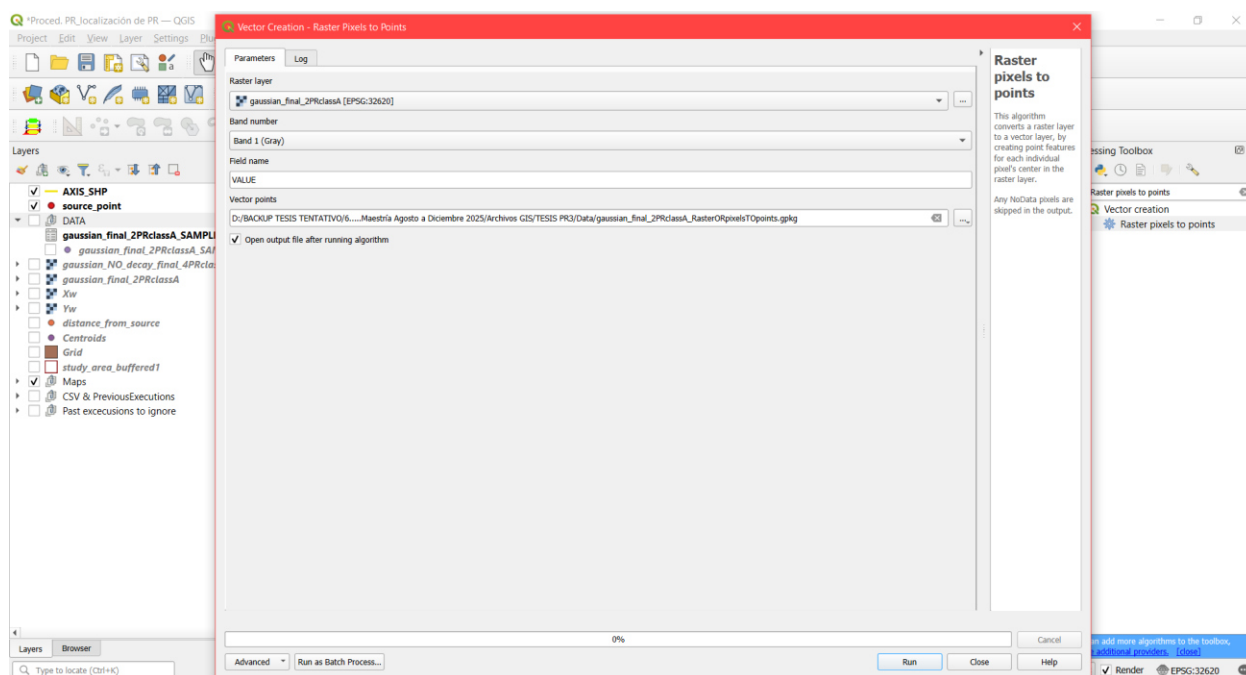
Figura 270

C. Conversión de los “rasters” a puntos (“full data set”)



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

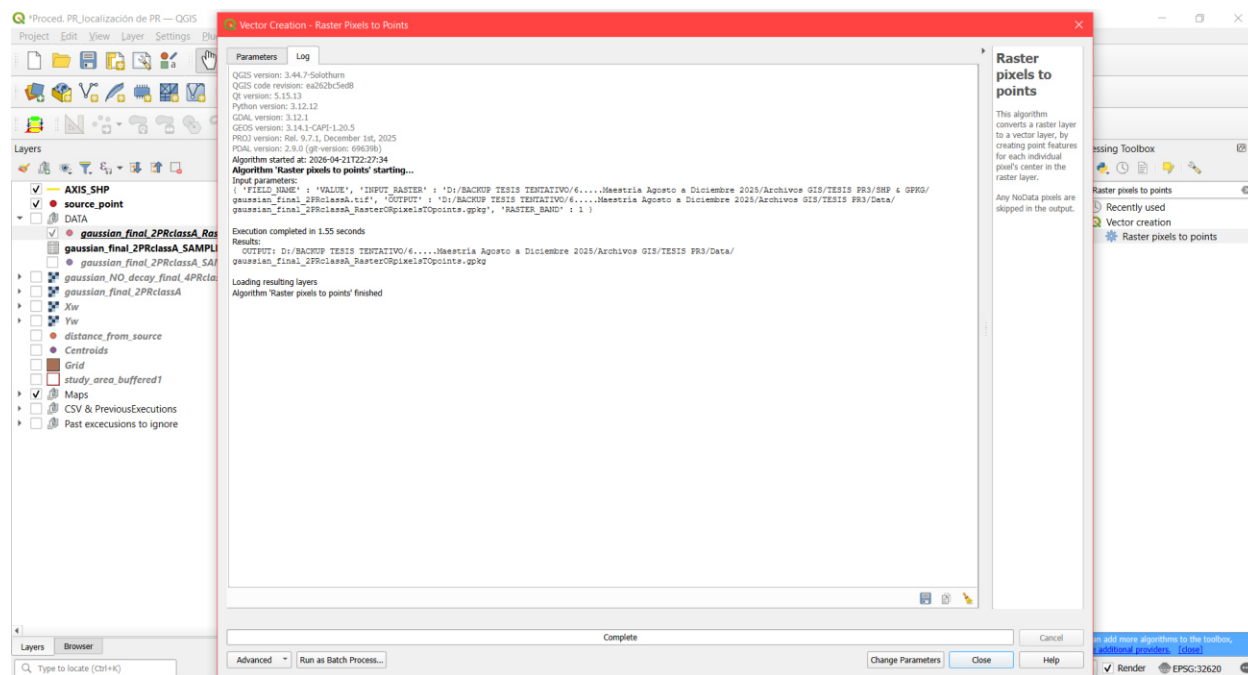
Figura 271

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 272

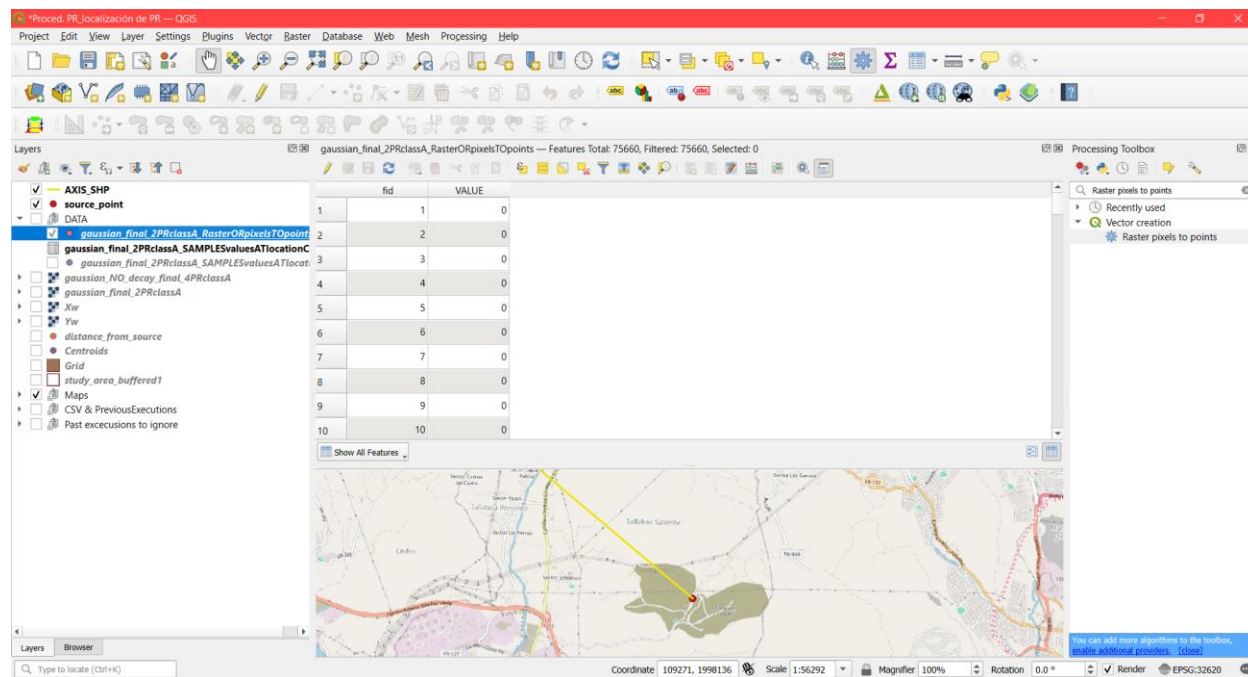
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 273

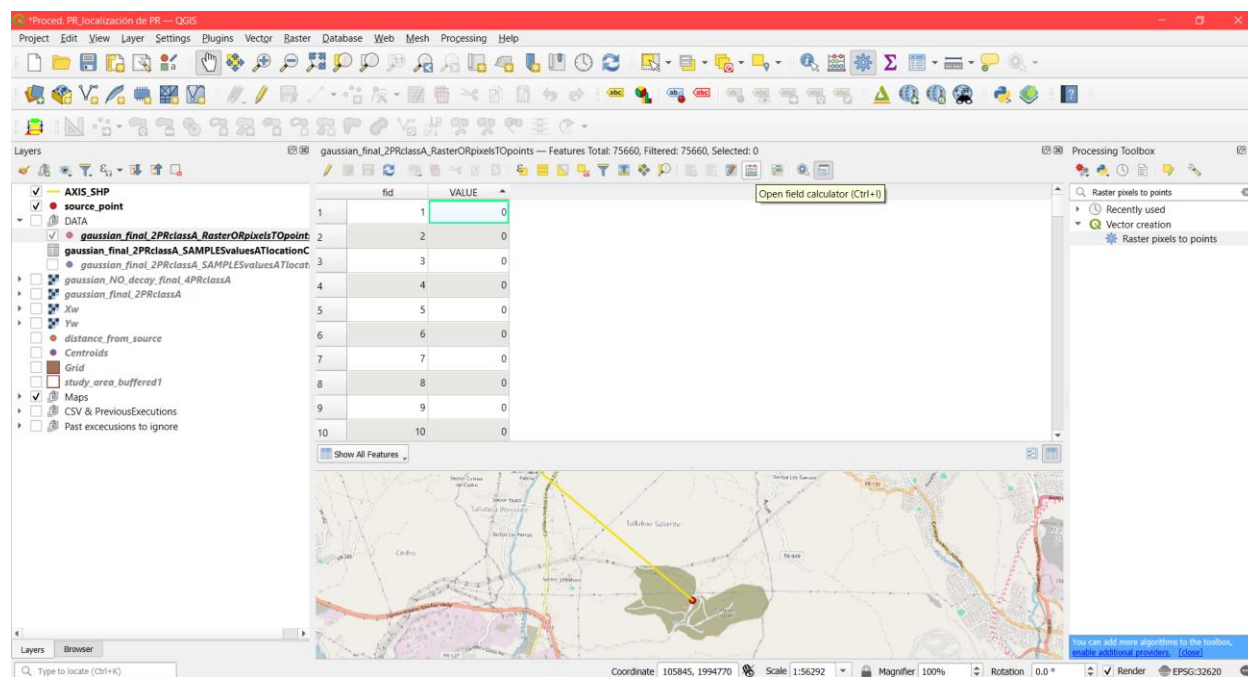
Continuación del Proceso. Se visualizó que los valores muy pequeños, se ven como cero, ya que QGIS los redondea



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 274

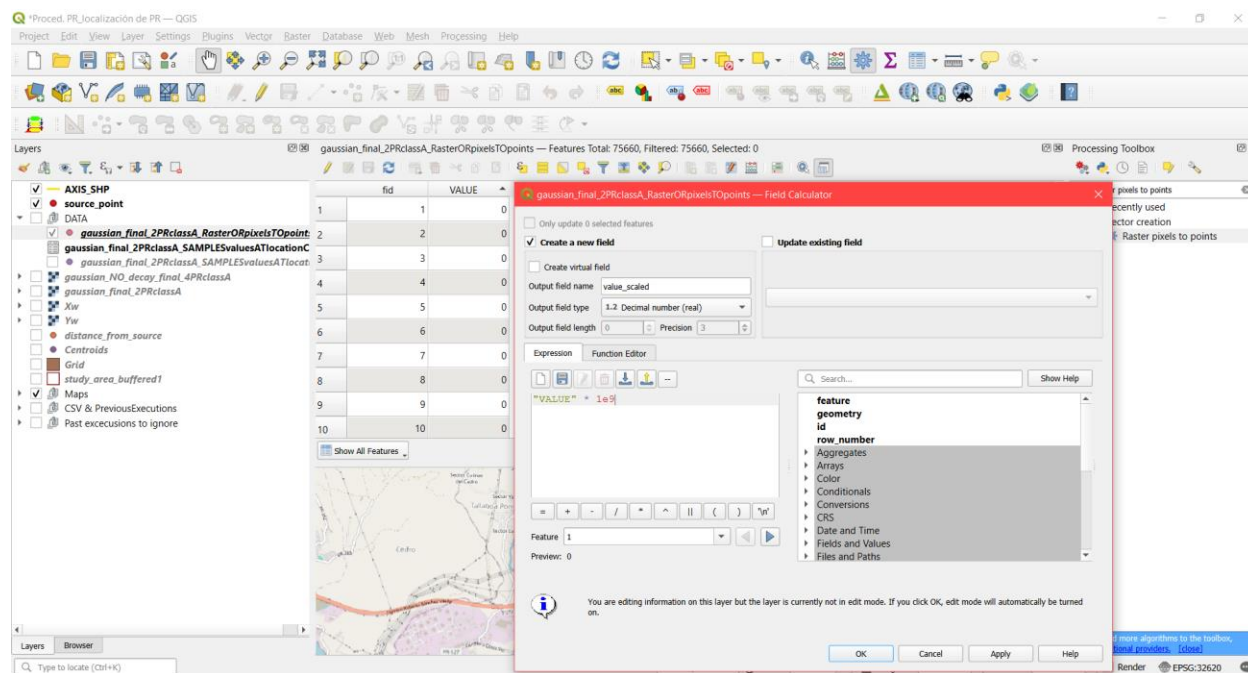
Continuación del Proceso. Se procedió a buscar la manera de verlos.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Multiplicando los valores * 1e9

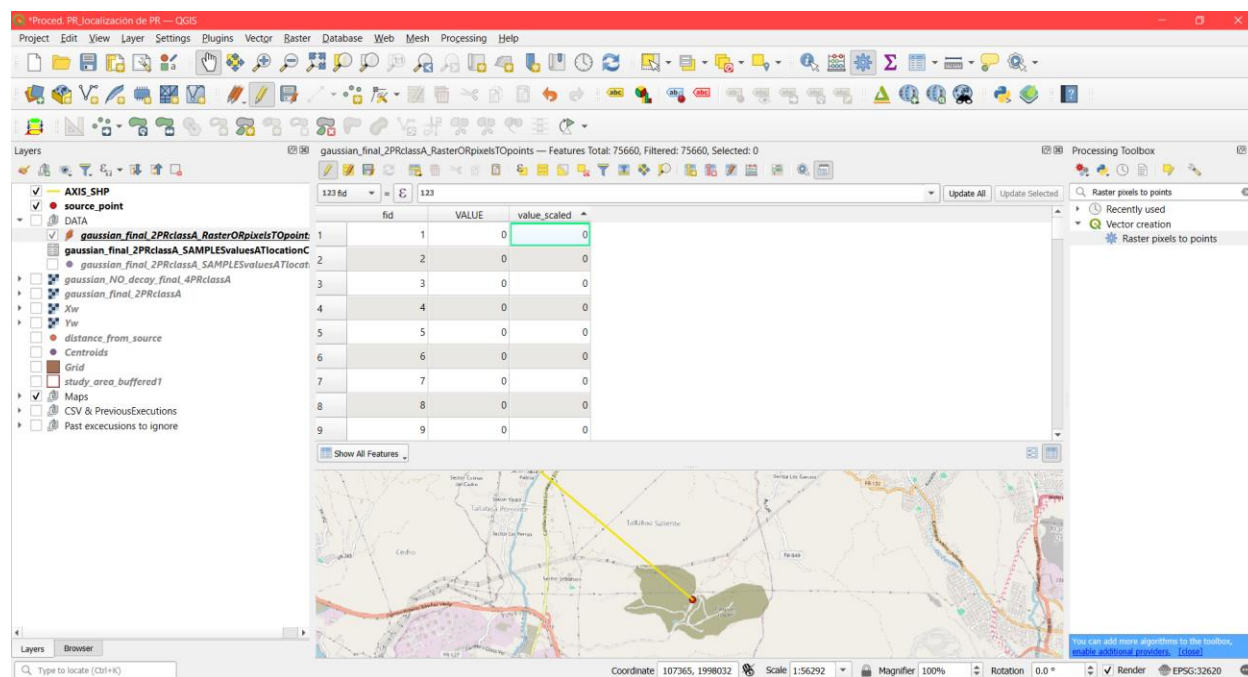
Figura 275

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

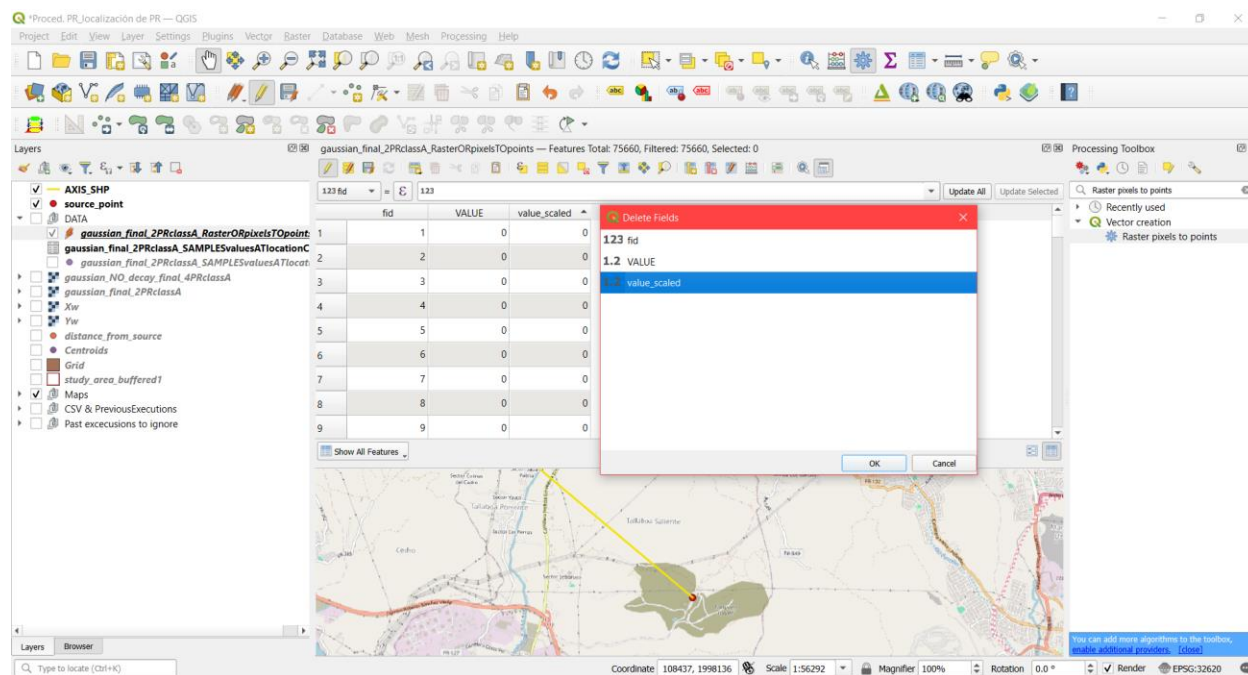
La precisión de la tabla de atributos y la calculadora no son correctas, como tienen baja precisión redondean todo a cero.

Figura 276

Continuación del Proceso

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Se procedió a borrar el campo erróneo (ya que esto es material a exportar exactamente como aparece).

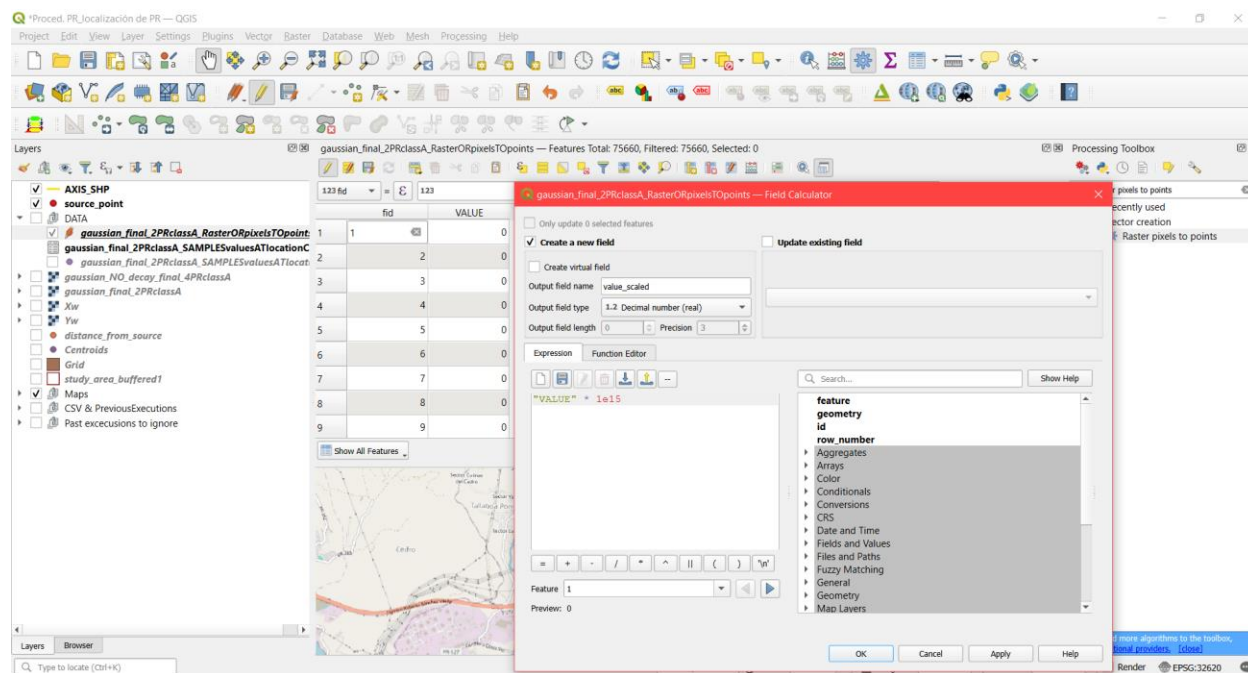
Figura 277*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Se procedió a realizar nuevamente el campo de manera correcta.

Figura 278

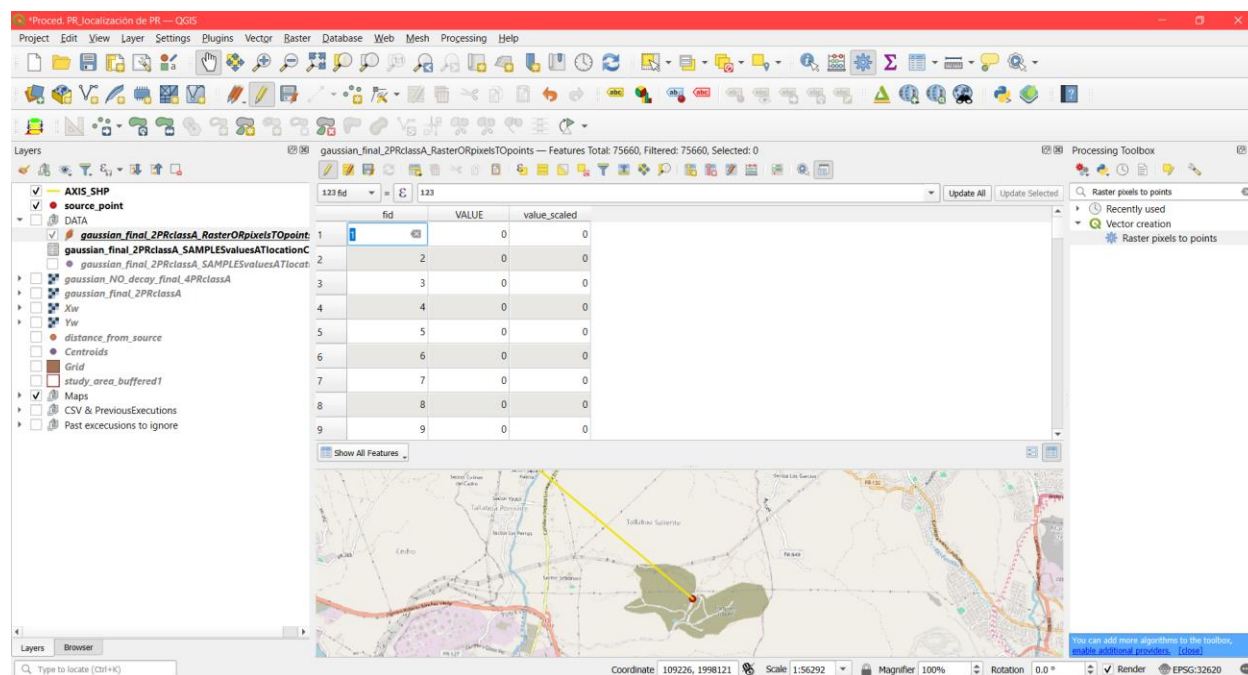
Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 279

Continuación del Proceso



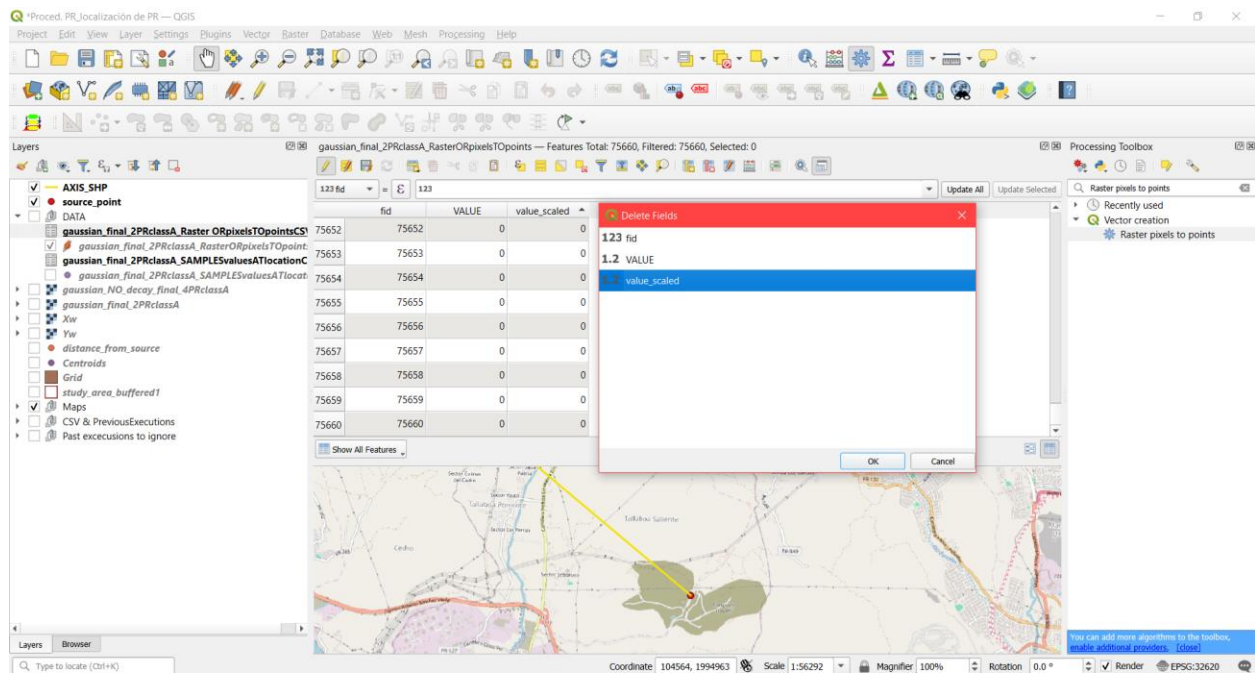
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Como los valores son muy pequeños se procedió a comprobar si Excel los presenta. Pero no funciona ya que el problema es con la precisión de la calculadora.

Se procedió a borrar el campo nuevamente y volver a realizar la ejecución.

Figura 280

Continuación del Proceso

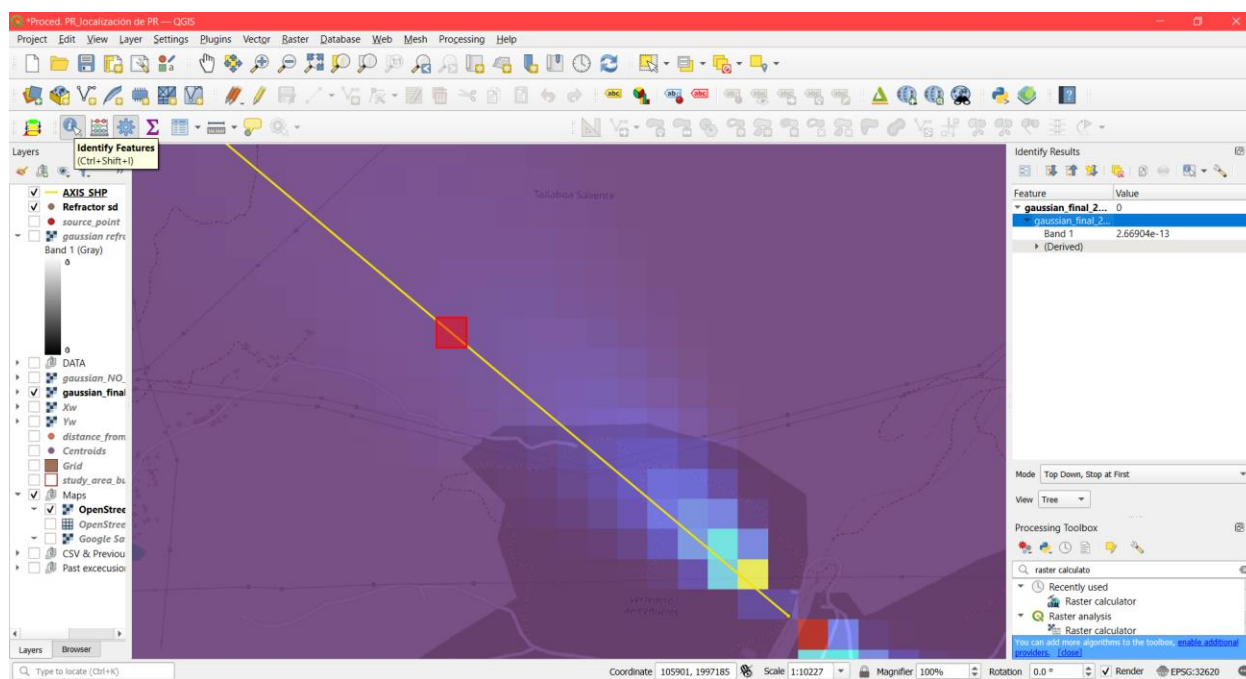


Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Pero antes de ejecutar esto, se analizó y se concluyó lo siguiente. Como el cálculo que se intentaba hacer era $(0 * \#)$ (número relativamente pequeño es redondeado a cero $= 0$), ese era el problema que la calculadora no podía resolver por precisión, la obtención de esta parte de la data no podía ser completada; ya que al ser valores pequeños la calculadora de QGIS llega a este límite. Por tanto, se procedió a buscar los valores de las distancias vs concentraciones, (procedimiento que se explica a continuación) de manera que se muestre un set de datos de manera alterna.

Figura 281

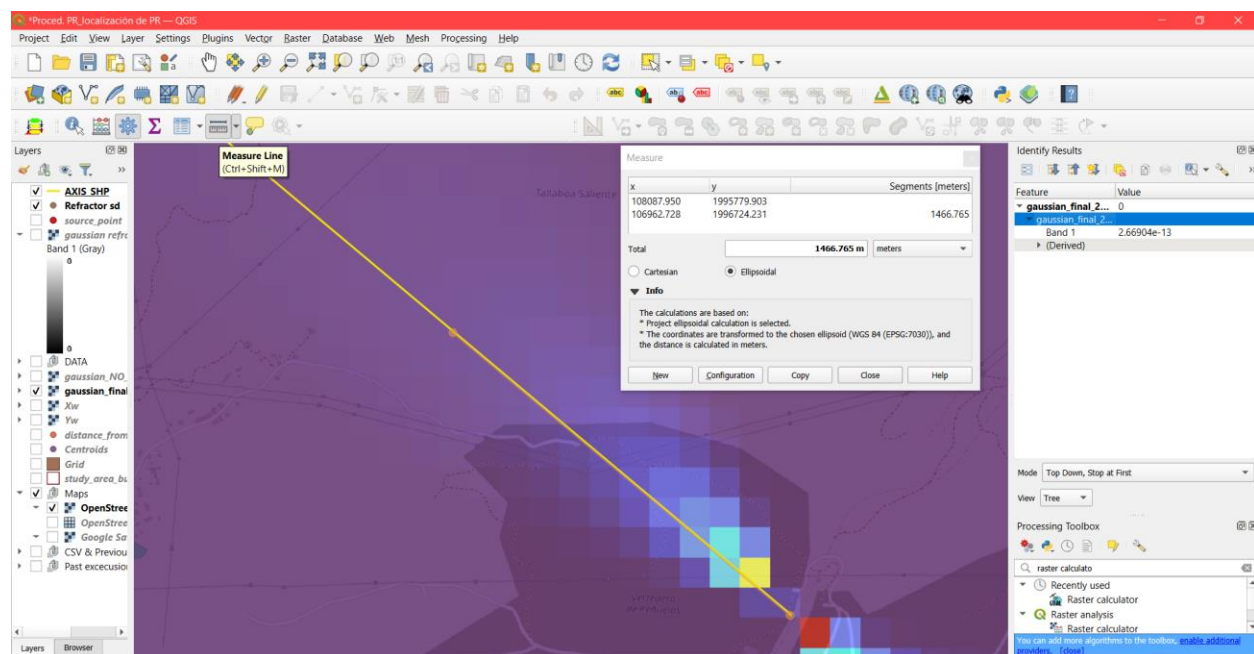
D. Obtención de Distancia vs Concentración. La obtención de los datos para esta parte bajo la mentoría del Profesor Rodríguez Montalvo, se realizó utilizando las herramientas de “identify features” y “measure line”. Primero se procedió a buscar el pixel que indica la concentración en aire del contaminante desde el punto de la fuente, hasta alejarse de la misma; para luego medir la distancia en metros desde el punto de la fuente, hasta alejarse de la misma para el “pixel” de interés. El procedimiento se realizó para encontrar 20 valores de concentración y sus distancias.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 282

Continuación del Proceso



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

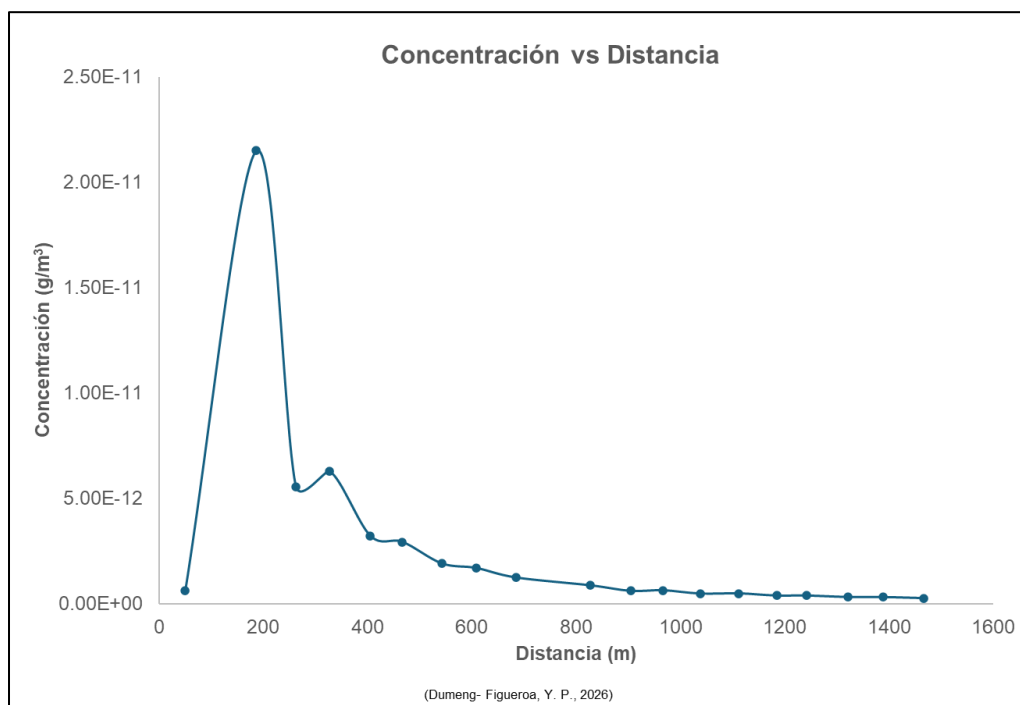
Tabla 6*Valores para la concentración vs distancia*

Distancia (m)	Concentración (g/m ³)
49.977	6.37E-13
186.201	2.15E-11
262.394	5.57E-12
327.134	6.29E-12
405.038	3.23E-12
466.653	2.94E-12
541.951	1.92E-12
608.538	1.70E-12
684.211	1.25E-12
827.69	8.74E-13
904.953	6.12E-13
966.988	6.43E-13
1038.035	4.84E-13
1112.046	4.93E-13
1184.756	3.90E-13
1241.769	3.90E-13
1322.133	3.20E-13
1389.013	3.17E-13
1466.765	2.66E-13
(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)	

Nota. Se muestra la tabla de valores obtenidos de QGIS.

Gráfica 1

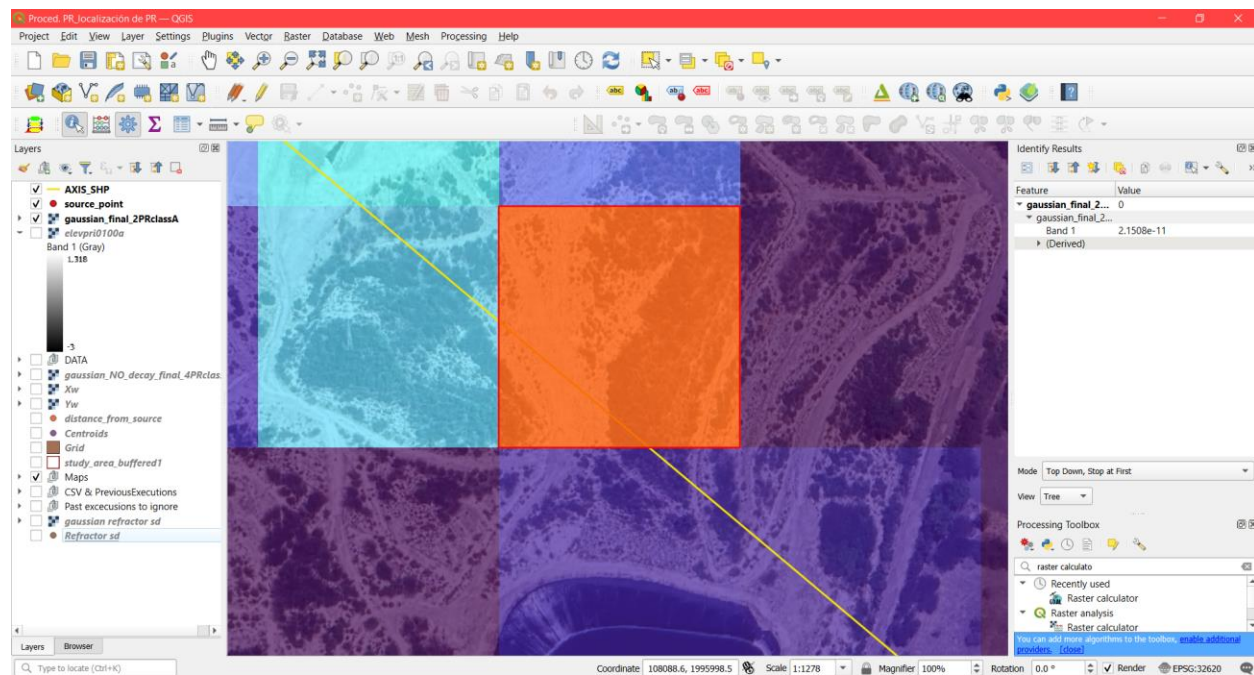
Concentración vs Distancia para 1,2-dicloroetano en relación a la fuente.



Nota: Se muestra la gráfica de Concentración vs Distancia de los valores obtenidos que se muestran en la tabla anterior.

Figura 283

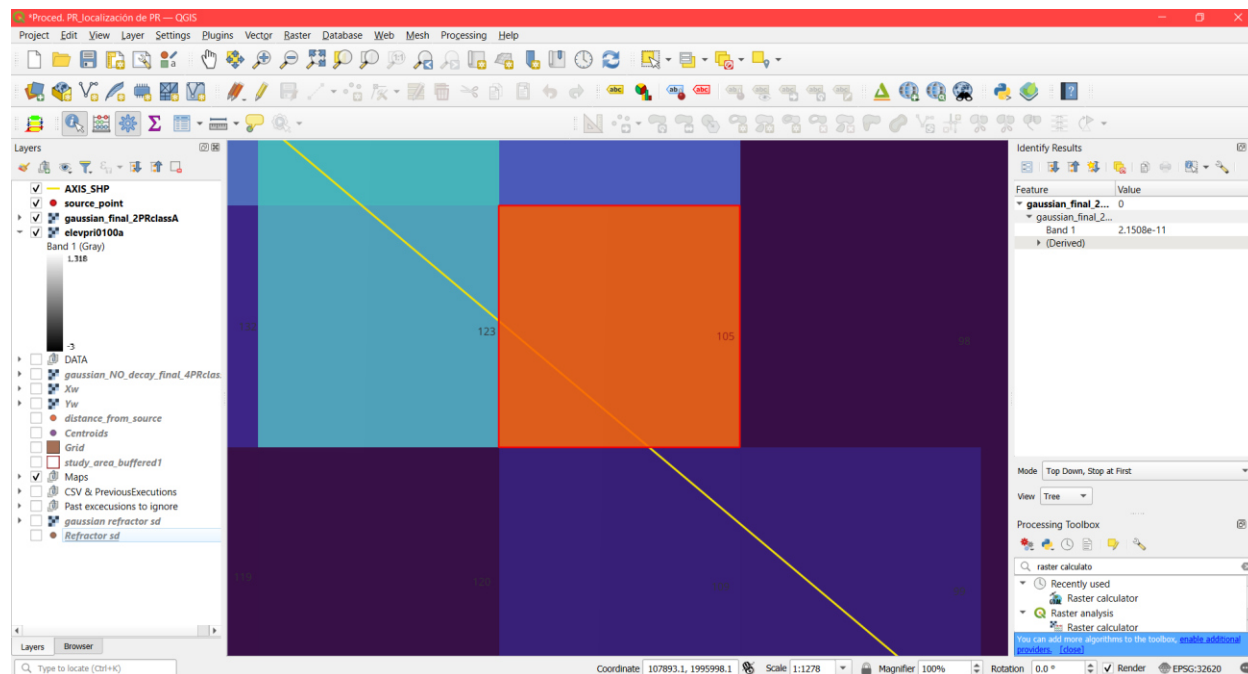
Evidencia en elevación para la segunda concentración.



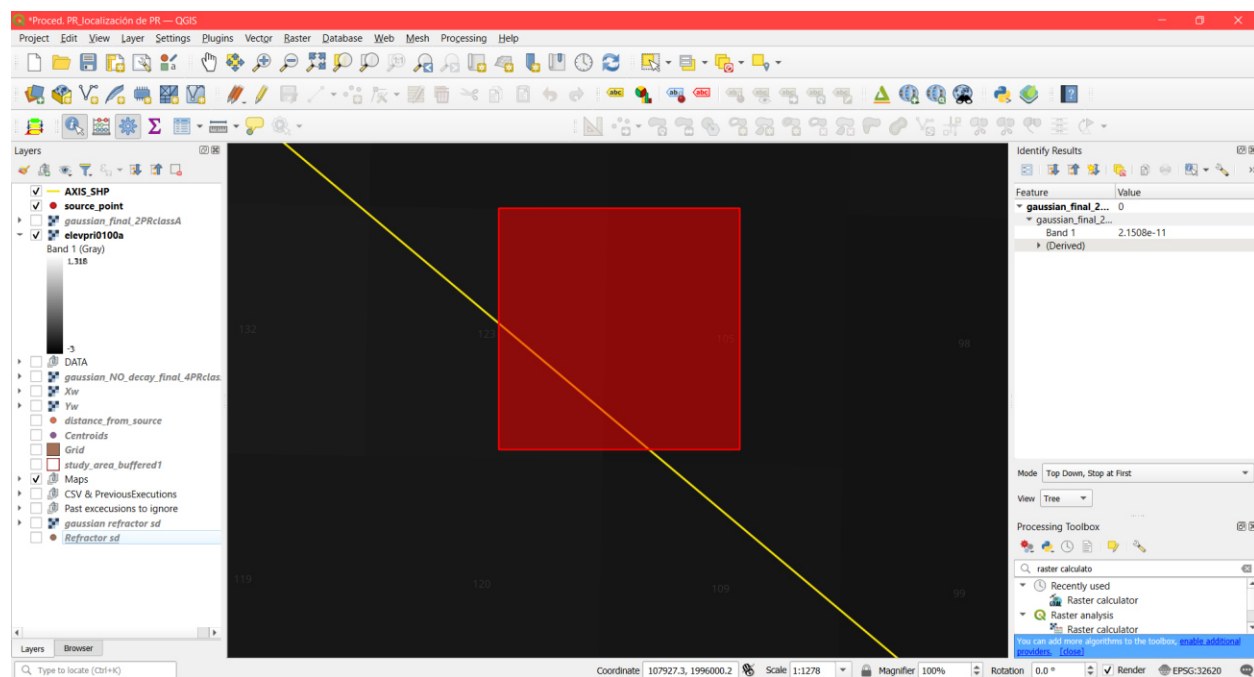
Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 284

Continuación del Proceso. Se evidencia la elevación, en el pixel donde se encuentra la concentración de interés, y en el mismo que ya vimos anteriormente, se observó la carretera y comparando con la capade elevación, podemos ver que la altura de la carretera, se convierte en una barrera física donde el contaminante se concentra.



Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

Figura 285*Continuación del Proceso*

Nota. Captura de pantalla para el procedimiento bajo la utilización del programa QGIS versión 3.44.7 “Solothurn” (2026).

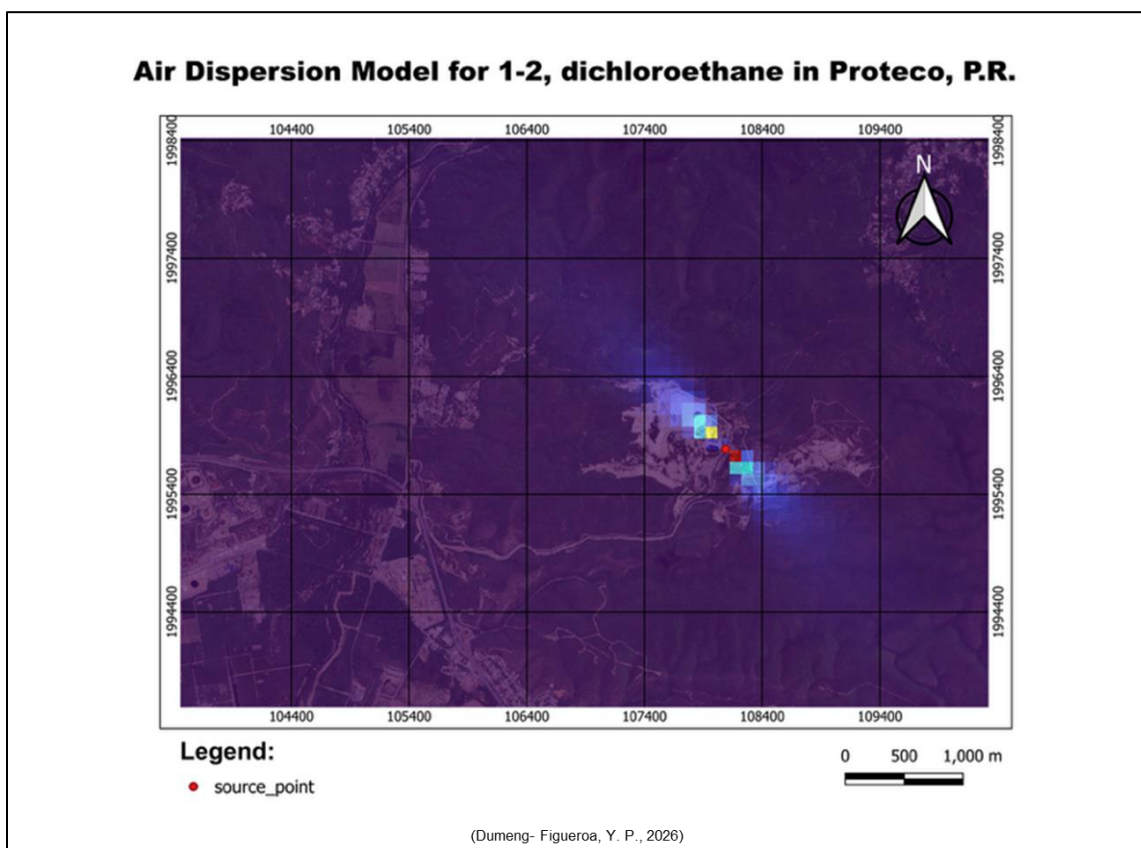
Figura 286*Cálculo para límite de exposición*

• Máximo: $3.11 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3 \rightarrow$			Conversión: $1 \text{ g} = 10^6 \mu\text{g} \rightarrow 3.11 \times 10^{-5} \mu\text{g/m}^3$
$\text{ppb} = \frac{(\text{valor en } \mu\text{g/m}^3) \times 24.45}{\text{MW}}$			$\rightarrow \text{ppb} = \frac{(3.11 \times 10^{-5} \mu\text{g/m}^3) \times 24.45}{98.96 \text{ g/mol}}$
$\approx 7.68 \times 10^{-6} \text{ ppb}$			
			vs
Límite establecido por OSHA: (para un turno de 8hrs)			50,000 ppb (50 ppm)

(OSHA, 2008)

(Dumeng- Figueroa, Y. P., 2026)

Nota. Cálculo realizado para el límite de exposición del contaminante en la fuente vs lo establecido por OSHA.

Figura 287*Mapa Final de la Dispersión Exportado*

Nota. Elaboración propia utilizando QGIS 3.44.7 y aproximación de datos, basados en EPA y “Google Maps Statellite”.

Dumeng- Figueroa, Y., (2026). *Air Dispersion Model for 1,2-dichloroethane in Proteco, P.R.*

[Map]. Based on EPA and Google Maps Statellite. QGIS 3.44 LTR.

<https://zenodo.org/records/15705458> and <https://www.qgis.org>.

8. Resultados y Discusión

Los resultados para la dispersión de contaminantes en el área de estudio son de: “Count”: 75660 (para la cantidad de muestras o número de celdas que tienen data), un Mínimo: 0 g/m^3 (valor más pequeño entre muestras), un Máximo: $3.11 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ (valor más grande entre muestras), un Rango: 3.11×10^{-11} (valor de cuan dispersos están los datos), una “Sum”: 3.14×10^{-10} (valor combinado total de cada pixel o valor total de la sumatoria de cada pixel en el área de estudio o polígono), un Promedio: $4.16 \times 10^{-15} \text{ g/m}^3$ (valor promedio de todas las muestras), una Desviación Estándar: $1.51 \times 10^{-13} \text{ g/m}^3$ (valor promedio de las muestras) y una Suma de Cuadrados: 1.72×10^{-21} (valor de cada cuadrado de todos los pixeles en el área de estudio). Con todos estos resultados se muestra las concentraciones modeladas en rango de X a Y, con un promedio de valor de Z dentro de las condiciones de clase A de Pasquill. También, se encontró como valor de la muestra en la localización (como si fueran receptores) que, las concentraciones previstas en la ubicación del receptor oscilan entre $6.37 \times 10^{-13} \text{ g/m}^3$. En conjunto todos los resultados, muestran una dispersión muy pequeña o concentrada mayormente en la fuente, con posibilidades de expansión muy bajas. De acuerdo con OSHA y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades, estos valores al momento están dentro de los límites establecidos. Lo cual significa que poblaciones cercanas no recibirán un gran impacto de este contaminante. Sin embargo, hay que considerar que los valores obtenidos, son mediante el análisis de volatilización desde un pozo, no desde una chimenea, como se puede observar en una amplia cantidad de investigaciones que envuelve la dispersión gaussiana. Por otra parte, factores como la deposición, acumulación, bioacumulación y reacciones secundarias en aire de 1,2-dicloroetano, que es volatilizado, son temas importantes, lo cual, significa que en un futuro no muy lejano esta información, puede ser importante a considerar.

9. Conclusión

Actualmente, el medio ambiente está enfrentando un sin número de retos debido a prácticas antropogénicas, que resultan en la contaminación constante de nuestros alrededores e impacto a los seres vivos. La exposición a contaminantes, la presentamos y presenciamos día a día, ya sea a nivel de suelo, agua o aire. Mediante esta investigación, se dio un enfoque a lo que posiblemente por medio de una aproximación, está sucediendo en un lugar del cual la dispersión en aire es un factor sumamente importante a considerar. Lamentablemente, la isla de Puerto Rico tiene mucho que hacer en términos del manejo de los vertederos y la disposición de contaminantes en general. Desde hace mucho tiempo, se ha hablado, de cómo la población debe dirigir su atención a métodos ambientales, que no necesariamente son rigurosos, si no, que son hasta sencillos si se realizan con la mentalidad de trabajar por un futuro mejor y limpio para las generaciones futuras. Los ambientalistas reconocemos que muchos de estos temas son ignorados, hasta que llega una persona que les informa y les educa sobre los peligros por exposición a los que pueden estar expuestos. Por medio de 1,2-dicloroetano hay registros de síntomas y enfermedades que puede provocar e igualmente para los demás compuestos orgánicos volátiles (VOC's). Por parte de la investigación realizada, vimos que la dispersión del contaminante es pequeña, por lo cual expandirse para llegar a las poblaciones, es un hecho, por aproximación, poco probable. Sin embargo, si se consideran otros factores, como se menciona anteriormente, en un plano futuro o con hasta con la recolección directa de los contaminantes en estado gaseoso para realizar futuras investigaciones, podríamos concluir con resultados que, sin duda podrían ser diferentes. Siendo así, la dispersión de contaminantes en aire fue una investigación, que nos muestra que, aunque sean valores pequeños los encontrados; a nivel ambiental, si sucede una acción, esta puede afectar, aunque sea en poca cantidad a lo que suceda en cualquier otro lugar.

10. Recomendaciones

Visualizando la posibilidad de investigaciones futuras similares o a modo de continuación de la misma, se sugiere optimizar el programa de QGIS para presentar las bajas concentraciones en las tablas de resultados, para poder obtener esta información de otros casos donde no haya un flujo alto de contaminantes, que con el tiempo se puede relacionarse o encontrarse en deposición, acumulación, bioacumulación y reacciones secundarias en aire. Se conoce que el programa de QGIS, se encuentra siempre en constantes actualizaciones, pero se recomienda que al menos en cada calculadora que se proceda a abrir, que haya un ejemplo de la sintaxis que permite, para que los usuarios no tengan confusiones y se reduzca el número de corridas fallidas, ya que, se experimentó que la leyenda de colores para introducir las funciones no era suficiente. No obstante, de volver a realizar una investigación similar (que no sea una aproximación o una estimación) se puede considerar incluir la utilización de: más data meteorológica, tasa de emisión (Q) real y no estimada, utilizar más variables de interés, validar la modelación con data real (en el futuro, si hay la oportunidad), realizar más ajustes en resolución, incorporar elevación y capas de suelo, y trabajar modelos gaussianos avanzados. De igual manera, se recomienda realizar investigaciones futuras, cuando la EPA publique las concentraciones en aire reales, si en un futuro esto se presentan como sus esfuerzos por restaurar este lugar del super fondo; para lo cual, de acuerdo con su plan de acción, los muestreos de la calidad del aire se encuentran pendientes.

11. Reflexión

En relación con el tema de investigación y a modo de reflexión los dejo con el siguiente pensamiento: “Camina con los pies en la tierra, pero con la mirada puesta en el cielo” por Don Bosco. En adición, y a modo de reflexión, deseo dar las gracias al lector que ha llegado a esta parte del escrito de la investigación y desearle éxito en su futuro.

Bibliografia

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2024). *Toxicological profiles*. U.S. Department of Health and Human Services.
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>
- Ali, H. & Khan, E. (2017). *Environmental chemistry in the twenty-first century*. Environmental Chemistry Letter. (15), 329–346. DOI 10.1007/s10311-016-0601-3.
<https://www.proquest.com/docview/1899718910/fulltextPDF/67A2E50B4F4906PQ/4?accountid=206157>
- ATSDR. (2007). *Factores ambientales*. Estudios de Caso en Medicina Ambiental (CSEM).
https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/asma/asma_factores.html
- Bontos, M. D., Vasiliu, G.-C., Barbu, E.-L., Boncescu, C., & Cocârță, D. M. (2026). A QGIS-Based Gaussian Plume Dispersion Model for Point Sources: Development and Intercomparison of Reflective and Non-Reflective Formulations. *Applied Sciences*, 16(4), 1833. <https://doi.org/10.3390/app16041833>
- Boyd, R. J. (2019). *Theoretical and Computational Chemistry*. Chemistry Molecular Sciences and Chemical Engineering. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11689-0>
- Briant, R., Seigneur, C., Gadrat, M., and Bugajny, C. (2023). *Evaluation of roadway Gaussian plume models with large-scale measurement campaigns*, Geosci. Model Dev., 6, 445–456, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-445-2013>, 2013.
- Chavez, V. (2023, August 28). *Gaussian air pollutant dispersion module in QGIS*. Medium.
<https://medium.com/@videl.scarlet310/gaussian-air-pollutant-dispersion-module-in-qgis-24355920e78f>

Clary, J. (2016). *How to Download & Run EPA's AERMOD Sample Run*. AERMOD Training.

https://www.youtube.com/watch?v=oC_aBvvBXXKw

Cochrane & Associates, LLC. (2022). *Zimmetry Environmental provides indoor and outdoor air quality testing, monitoring and consulting services to identify and mitigate exposure risks to airborne pollutants*. Puerto Rico Celebrates Air Quality Awareness Week.

<https://www.environmental-expert.com/news/puerto-rico-celebrates-air-quality-awareness-week-1065465>

Danesh Yazdi, M., Wang, Y., Di, Q., Requia, W. J., Wei, Y., Shi, L., Benjamin Sabath, M.,

Dominici, F., Coull, B., Evans, J. S., Koutrakis, P., & Schwartz, J.D. (2021). *Long-term effect of exposure to lower concentrations of air pollution on mortality among US Medicare participants and vulnerable subgroups: a doubly-robust approach*. Lancet Planet Health.

[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00204-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00204-7)

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 3.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 312, 313, y 316.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 62.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

Department of Agriculture, Environment and Rural Affairs of Northern Ireland Government

(MyNI). (2019). *What are the effects of air pollution on the human body?*. Climate Change.

<https://www.myni.life/health-and-wellbeing/what-are-the-effects-of-air-pollution-on-the-human-body/>

DRNA. (2021). *Puerto Rico Air Monitoring Network Plan*. Commonwealth of Puerto Rico

Department of Natural and Environmental Resources Air Quality Area.

[https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/05/PR-Network-Plan-](https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/05/PR-Network-Plan-2021.pdf#:~:text=The%20Commonwealth%20of%20Puerto%20Rico%20%28CPR%29%2C%20through%20the,evidence%20that%20meets%20current%20federal%20air%20monitoring%20requirements)

[2021.pdf#:~:text=The%20Commonwealth%20of%20Puerto%20Rico%20%28CPR%29%2C%20through%20the,evidence%20that%20meets%20current%20federal%20air%20monitoring%20requirements](https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/05/PR-Network-Plan-2021.pdf#:~:text=The%20Commonwealth%20of%20Puerto%20Rico%20%28CPR%29%2C%20through%20the,evidence%20that%20meets%20current%20federal%20air%20monitoring%20requirements)

Dumeng- Figueroa, Y., (2026). *Air Dispersion Model for 1,2-dichloroethane in Proteco, P.R.*

[Map]. Based on EPA and Google Maps Statellite. QGIS 3.44 LTR.

<https://zenodo.org/records/15705458> and <https://www.qgis.org>.

Enviroware. (2022). *AERMOD is the U.S. EPA preferred air dispersion model*. AERMOD.

<https://www.enviroware.com/aermod/>

EPA. (2016). *Cleanups In My Community Map*. Cleanups.

https://ordspub.epa.gov/ords/cimc/f?p=CIMC:MAP:0::NO::P71_IDSEARCH:SF_SITE_ID%7C0202756

EPA. (2016). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*. National Service

Center for Environmental Publications (NSCEP).

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100QVCE.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2016+Thru+2020&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C16thru20%5CTxt%5C00000001%5CP100QVCE.txt&User=ANONYMOUS&P>

assword=anonymous&SortMethod=h%7C-

&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i4

25&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDe

sc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#

EPA. (2017). *Interpreting Mobile and Handheld Air Sensor Readings in Relation to Air Quality Standards and Health Effect Reference Values: Tackling the Challenges*. Atmosphere. (8), 182. doi:10.3390/atmos8100182. www.mdpi.com/journal/atmosphere

EPA. (2018). *PROTECO Peñuelas, Puerto Rico*. NATIONAL PRIORITIES LIST (NPL).

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/197204.pdf>,

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/199498.pdf>

EPA. (2019). *PROTECO Peñuelas, Puerto Rico*. NATIONAL PRIORITIES LIST (NPL).

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/199498.pdf>

EPA. (2019). *Try Me First Sample Run*. Sample Run.

https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/AERMOD_Sample_Run.pdf

EPA. (2021). *NAAQS Table*. Criteria Air Pollutants. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

EPA. (2021). *National Priorities List and Superfund Alternative Approach Sites*. Search for Superfund Sites Where You Live. <https://www.epa.gov/superfund/search-superfund-sites-where-you-live>

EPA. (2022). *AERMOD Model Formulation*. Office of Air Quality Planning and Standards.

https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd.pdf

- EPA. (2022). *Air Quality Dispersion Modeling - Alternative Models*. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models#isc3>
- EPA. (2022). *Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models*. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
- EPA. (2022). *Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models*. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod>
- EPA. (2022). *Basic Information about Landfill Gas*. Landfill Methane Outreach Program (LMOP). <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- EPA. (2022). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Table*. Clean Air Act- "criteria" air pollutants. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- EPA. (2022). *PROTECO PENUELAS, PR Cleanup Activities*. Superfund Site. <https://cumulis.epa.gov/supercpad/SiteProfiles/index.cfm?fuseaction=second.Cleanup&id=0202756#bkground>
- EPA. (2022). *Superfund: National Priorities List (NPL)*. Superfund. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-national-priorities-list-npl>
- EPA. (2022). *What are volatile organic compounds (VOCs)?*. Indoor Air Quality (IAQ). <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>
- EPA. (2022). *What is a HEPA filter?*. Indoor Air Quality (IAQ). <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter>

EU. (2022). *Air pollution and air quality*. European Commission Science HUB- Raw Materials Information System (RMIS)- Air Pollution. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=air-pollution-41a05f>

Journal of Environmental Health. (2020). *Enacted 2019 State Environmental Health Legislation*. National Conference of State Legislatures. 83 (1)
<https://www.proquest.com/docview/2421042952/fulltextPDF/AAE189AC2EF9456CPQ/16?accountid=206157>

Kim, J. H., Kyu Kwak, B., Ha, M., Cheong, H-K., Yi, J. (2012). *Modeling Human Exposure Levels to Airborne Volatile Organic Compounds by the Hebei Spirit Oil Spill*. Environmental Health and Toxicology. (27), 10. e2012008. eISSN 2233-6567.
<http://dx.doi.org/10.5620/eht.2012.27.e2012008>

LexJuris Puerto Rico. (2000). *Ley 335, 2000. Para añadir a la Ley sobre Política Pública Ambiental*. Ley Núm. 335 del año 2000.
<https://www.lexjuris.com/lexlex/leyes2000/lex2000335.htm>

LexJuris Puerto Rico. (2000). *Para añadir a la Ley sobre Política Pública Ambiental*. Ley Núm. 335 del año 2000. <https://www.lexjuris.com/lexlex/leyes2000/lex2000335.htm>

LexJuris Puerto Rico. (2019). *Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico*. Ley Núm. 33 del año 2019.
<https://www.lexjuris.com/lexlex/Leyes2019/lexl2019033.htm>

LexJuris Puerto Rico. (2019). *Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico*. Ley Núm. 33 del año 2019.
<https://www.lexjuris.com/lexlex/Leyes2019/lexl2019033.htm>

- Loste, N., Roldán, E., Lomba, L., & Giner, B. (2019). *Green Chemistry and Environmental Management Systems: Relationships, Synergies, Advantages and Barriers of Joint Implementation at Universities*. *Environmental Management*. (64), 783–793.
<https://doi.org/10.1007/s00267-019-01218-y>
- Mackenzie, J., & Turrentine, J. (2021). *How smog, soot, greenhouse gases, and other top air pollutants are affecting the planet—and your health*. *Air Pollution: Everything You Need to Know*. <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know#ej>.
- Martinuzzi, S., Gould, W. A., Ramos Gonzalez, O. M., Quinones, M., & Jimenez, M. E. (2008). *Uso de terreno urbano y rural en Puerto Rico (Escala 1:260 000. Res. Map IITF-MAP-01)*. Rio Piedras, PR: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Instituto Internacional de Dasonomia Tropical.
<https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/47819>.
- Martinuzzi, S., Gould, W. A., Ramos Gonzalez, O. M., Quinones, M., & Jimenez, M. E. (2008). *Uso de terreno urbano y rural en Puerto Rico (Escala 1:260 000. Res. Map IITF-MAP-01)*. Rio Piedras, PR: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Instituto Internacional de Dasonomia Tropical.
https://data.fs.usda.gov/geodata/other_fs/IITF/pdf/IITF-RMAP-01_spanish.pdf
- Micallef, A., & Micallef, C. (2024). *The Gaussian Plume Model Equation for Atmospheric Dispersion Corrected for Multiple Reflections at Parallel Boundaries: A Mathematical Rewriting of the Model and Some Numerical Testing*. *Sci*, 6(3), 48.
<https://doi.org/10.3390/sci6030048>.
- National Center for Biotechnology Information. (2024). *PubChem compound database*. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

- Noticel. (2018). *EPA destinará fondos para limpieza*. Antiguo vertedero amenaza las aguas de Peñuelas. <https://www.noticel.com/ahora/20180515/antiguo-vertedero-amenaza-las-aguas-de-penuelas/>
- Occupational Safety and Health Act (OSHA). (2011). *Indoor air quality (IAQ)*. Indoor Air Quality in Commercial and Institutional Buildings. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3430indoor-air-quality-sm.pdf>
- Ofungwu, J., & Eget, S. (2009). *Brownfields and health risks—air dispersion modeling and health risk assessment at landfill redevelopment sites*. Integrated Environmental Assessment and Management., 2. 253-261. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630020305> o <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ieam.5630020305>
- ONU. (2019). *Cinco razones por las que la contaminación del aire debe importarte*. Programa para el medio ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/cinco-razones-por-las-que-la-contaminacion-del-aire-debe>
- OSHA. (2011). *Indoor Air Quality in Commercial and Institutional Buildings*. Occupational Safety and Health Act of 1970. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3430indoor-air-quality-sm.pdf>
- PSIBERG. (2022). *Primary and Secondary Pollutants*. Chemistry. <https://psiberg.com/primary-and-secondary-pollutants/>
- Seo, D. (2021). *Toxicity assessment of dimethyl carbonate following 28 days repeated inhalation exposure*. Environmental Analysis Health and Toxicology. 36 (2), 9. e2021012. <https://doi.org/10.5620/eaht.2021012>

- Taboureaux, O., El M'Selmia, W., Audouze, K. (2020). *Integrative systems toxicology to predict human biological systems affected by exposure to environmental chemicals*. Toxicology and Applied Pharmacology. 405. 115210. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.115210>
- Taylor, K. W., et al. Lind, L. (2013). *Evaluation of the Association between Persistent Organic Pollutants (POPs) and Diabetes in Epidemiological Studies: A National Toxicology Program Workshop Review*. Environmental Health Perspectives. 121. (7).
<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205502>
- The Landfill Gas Expert (IPPTS Associates). (2012). *Notorious Landfill Gas Explosions During the 1980s in the UK and the US*. Landfill gas explosions. <https://landfill-gas.com/1980s-landfill-gas-explosions#:~:text=The%20landfill%20gas%20explosion%20incidents%20follow%3A%20Loscoe%20Explosion%2C,barometric%20pressure%20occurred%20%2829%20millibars%20in%207%20hours%29>
- Trinity Consultants. (2020). *Aermod Validation Report. Final Aermod Validation Report*.
<https://www.montgomerycountymd.gov/SWS/Resources/Files/dafig/aermod-validation-report-nov2020.pdf>
- Turtos Caronell, L.M., Sanchez Gacita, M., Rivero Oliva, J de J., Curbelo Garea, L., Diaz Rivero, N., y Meneses Ruiz, E. (2010). *Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data*. Atmospheric Pollution Research. 1. 102-111.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S130910421530550X>
- Udemy, Inc. Academia de Meio Ambiente. (2021). *Environmental management with AERMOD Air Pollution Model by EPA*. Air Dispersion Modeling for Environmental Management.
<https://www.udemy.com/course/air-dispersion-modeling-aermod/>.

- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Fact sheet: Correcting the Henry's law constant for temperature*. <https://www.epa.gov/vaporintrusion/fact-sheet-correcting-henrys-law-constant-temperature>
- USGS. (2019). *VOCs- Vapors in the Air; Dissolves in Groundwater*. Volatile Organic Compounds (VOCs). <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/volatile-organic-compounds-vocs#overview>
- Varrica, D. (2021). *Feature Paper in Environmental Chemistry and Technology*. Int. J. Environ. Res. Public Health. 18, 10874. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010874>

Apéndice:

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 3.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 312, 313, y 316.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

Decir, J. (2019). *HRS Documentation Record–Review Cover Sheet*. Revised HRS Documentation Record with References for the Proteco Site. (534008). 62.

<https://semspub.epa.gov/work/02/534008.pdf>

DRNA. (2021). *Puerto Rico Air Monitoring Network Plan*. Commonwealth of Puerto Rico

Department of Natural and Environmental Resources Air Quality Area.

<https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/05/PR-Network-Plan-2021.pdf#:~:text=The%20Commonwealth%20of%20Puerto%20Rico%20%28CPR%29%2C%20through%20the,evidence%20that%20meets%20current%20federal%20air%20monitoring%20requirements>

EPA. (2016). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100QVCE.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2016+Thru+2020&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C16thru20%5CTxt%5C00000001%5CP100QVCE.txt&User=ANONYMOUS&P>

assword=anonymous&SortMethod=h%7C-

&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i4

25&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDe

sc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#

EPA. (2018). *PROTECO Peñuelas, Puerto Rico*. NATIONAL PRIORITIES LIST (NPL).

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/197204.pdf> ,

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/199498.pdf>

EPA. (2019). *PROTECO Peñuelas, Puerto Rico*. NATIONAL PRIORITIES LIST (NPL).

<https://semspub.epa.gov/work/HQ/199498.pdf>

EPA. (2019). *Try Me First Sample Run*. Sample Run.

[https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/AERMOD_Sample_Ru](https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/AERMOD_Sample_Run.pdf)

[n.pdf](https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/AERMOD_Sample_Run.pdf)

EPA. (2022). *AERMOD Implementation Guide*. Office of Air Quality Planning and Standards.

https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_implementation_guide.pdf

EPA. (2022). *AERMOD Model Formulation*. Office of Air Quality Planning and Standards.

https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd.pdf

EPA. (2022). *Superfund: National Priorities List (NPL)*. Superfund.

<https://www.epa.gov/superfund/superfund-national-priorities-list-npl>

Trinity Consultants. (2020). *Aermod Validation Report*. Final Aermod Validation Report.

<https://www.montgomerycountymd.gov/SWS/Resources/Files/dafig/aermod-validation-report-nov2020.pdf>

NOTE: Additional information can be requested from ydumeng2698@intersg.edu