

DE LA CIENCIA A LA ACCIÓN:

Innovación y tecnología en
el laboratorio molecular del
**Hospital Universitario
Departamental de Nariño
(HUDN)** para combatir
enfermedades infecciosas



Grupos de Investigación:
Davinci (UNAD)
Hosdenar (HUDN)



DE LA CIENCIA A LA ACCIÓN: INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN EL LABORATORIO MOLECULAR DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DEPARTAMENTAL DE NARIÑO (HUDN) PARA COMBATIR ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Autores:

Sixto Enrique Campaña Bastidas
Ana Isabel Vallejo
Rolando Rigoberto Rosero

Grupos de Investigación:

Davinci (UNAD)
Hosdenar (HUDN)

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Martha Viviana Vargas Galindo

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Claudio Camilo González Clavijo

Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz

Líder Sello Editorial UNAD

Versión preliminar

De la ciencia a la acción: innovación y tecnología en el laboratorio molecular del Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN) para combatir enfermedades infecciosas

Autores: Sixto Enrique Campaña Bastidas, Ana Isabel Vallejo y Rolando Rigoberto Rosero

Grupos de Investigación: Davinci (UNAD) y Hosdenar (HUDN)

ISBN: xxx

e-ISBN: xxx

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI)

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 Sur No. 14-23

Bogotá D.C.

Junio de 2026

Corrección de textos: Hipertexto

Diagramación: France Andrea Laverde Díaz

Edición integral: Hipertexto - Netizen

Cómo citar: Campaña Bastidas, S. E., Vallejo, A. I., y Rosero, R. R. (2026). *De la ciencia a la acción: Innovación y tecnología en el laboratorio molecular del Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN) para combatir enfermedades infecciosas*. Sello Editorial UNAD. **DOI PENDIENTE.**

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons–Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13.





RESEÑA DEL LIBRO

Este libro es un testimonio de resiliencia, innovación y colaboración en tiempos de crisis. En medio de la pandemia de COVID-19, el proyecto MlabNariño se convirtió en una iniciativa pionera en el departamento de Nariño, Colombia, para fortalecer la capacidad diagnóstica del Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN). El texto detalla los desafíos enfrentados, los logros alcanzados y las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) aplicadas para fortalecer un laboratorio molecular equipado con herramientas de última generación.

El contenido abarca desde la descripción del contexto donde se desarrolla la investigación y la implementación de tecnologías para el análisis de datos epidemiológicos hasta la creación de un dispositivo IoT-EPP¹ que propende por vigilar la seguridad del personal de laboratorio mediante monitoreo ambiental. Se destacan los impactos sociales, investigativos y científicos del proyecto, que muestran cómo la ciencia y la innovación pueden articularse para responder a emergencias de salud pública y preparar a la región para futuros desafíos epidemiológicos.

Además, la obra ofrece una visión integral de cómo la transformación digital y la aplicación de la inteligencia artificial en el campo de la salud pueden ayudar en el proceso de diagnóstico y tratamiento de enfermedades infecciosas. Los lectores encontrarán una fuente rica en conocimiento sobre cómo los avances

1 *Internet of Things- elementos de protección personal: desarrollo de elementos de protección personal con tecnologías de internet de las cosas*

tecnológicos pueden aplicarse eficazmente en entornos con recursos limitados y sobre la importancia de la cooperación entre entidades gubernamentales, académicas y sanitarias.

Este libro es una lectura esencial para profesionales de la salud, investigadores, académicos y cualquier persona interesada en la aplicación práctica de la ciencia y la tecnología al cuidado de la salud. Es un recordatorio de que, ante la adversidad, la combinación de conocimiento, tecnología y trabajo en equipo puede marcar la diferencia en la protección y mejora de la vida humana.

Sixto Enrique Campaña Bastidas

Ingeniero de sistemas, docente e investigador universitario con más de 25 años de trayectoria profesional y liderazgo de proyectos tecnológicos, y se destaca en áreas como IoT, *machine learning*, *cloud computing* y telecomunicaciones. Ha trabajado en la UNAD como docente e investigador, ha dirigido el grupo de investigación Davinci-UNAD y ha participado en proyectos de alto impacto, como el fortalecimiento del laboratorio molecular del HUDN, entre otros. Cuenta con un doctorado en ingeniería, varias estancias posdoctorales en Europa y varias certificaciones internacionales; ha integrado tecnologías de la 4RI en soluciones prácticas para diferentes aplicaciones en el campo de la salud y otras áreas del sector productivo, además de ser autor de varios libros, capítulos de libro y artículos, así como ponente en eventos académicos de relevancia tanto nacional como internacional.

Ana Isabel Vallejo Narváez

Profesional colombiana especializada en epidemiología, con formación en fisioterapia. Posee una destacada trayectoria en la gestión de la vigilancia en salud pública, la intervención epidemiológica de campo y el análisis de datos en diferentes instituciones de salud, incluyendo el HUDN. Con una carrera marcada por la coordinación de proyectos de investigación, la implementación de protocolos para la prevención de infecciones y la formación académica como docente, su experiencia se extiende a la aplicación de metodologías cualitativas y cuantitativas para la toma de decisiones en salud. Ha trabajado en iniciativas de análisis epidemiológico, fortalecimiento de la calidad en servicios de salud y apoyo a la investigación en contextos hospitalarios y comunitarios.

Rolando Rigoberto Rosero Benavides

Ingeniero agroindustrial con una sólida formación académica que incluye una maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Industrial por la Universidad del Valle y una especialización en Gerencia de Proyectos por la Universidad del Cauca. Ha desarrollado una destacada carrera en investigación; ha participado en múltiples proyectos de desarrollo y optimización de procesos agroindustriales, así como en la creación de materiales avanzados e ingeniería aplicada. Su experiencia incluye cargos de consultoría y dirección de proyectos en diversas instituciones, como la Universidad de Nariño y entidades del sector agroindustrial. Ha sido reconocido por su excelencia empresarial y sus contribuciones al desarrollo tecnológico en la región de Nariño; además, es uno de los fundadores y director técnico del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Ciencias Aplicadas (CIDTCA).

AGRADECIMIENTOS

La elaboración del presente libro y la culminación del proyecto que se describe en él no habrían sido posibles sin la colaboración y el apoyo de muchas entidades y personas que contribuyeron de manera significativa al desarrollo y al éxito del proyecto.

En primer lugar, expresamos nuestro más sincero agradecimiento al HUDN por aceptar el reto de hacer investigación, además, en tiempos de pandemia; por su liderazgo y visión al promover iniciativas como la propuesta y por apostarle a la innovación en el campo de la salud pública y la biotecnología. Su compromiso con la excelencia y la mejora continua fue una inspiración a lo largo de todo el proceso.

Deseamos reconocer y agradecer a la UNAD por su colaboración y respaldo académico y técnico, que aportó conocimientos, recursos humanos calificados y una visión educativa que impulsó la implementación de tecnologías de la 4RI en el proyecto; además, su articulación con el HUDN permitió llevar a cabo cada fase del proyecto.

Un agradecimiento al Instituto Departamental de Salud de Nariño (IDSN), cuyo papel fundamental reconocemos en la gestión sanitaria y en la facilitación de estrategias de vigilancia epidemiológica, además del suministro de datos vitales para realizar comparaciones y completar la analítica propuesta en el proyecto.

A la Gobernación de Nariño, agradecemos su respaldo y colaboración en la selección del proyecto como una iniciativa necesaria para la región, así como su apoyo continuo en la ejecución de este.

AL GRUPO DE INVESTIGACIÓN HOSDENAR Y AL GRUPO DAVINCI DE LA UNAD

Gracias por su compromiso con la investigación y el desarrollo de soluciones tecnológicas que han elevado la capacidad diagnóstica y de respuesta ante emergencias sanitarias en la región.

COMUNIDAD Y PERSONAL DE SALUD DE NARIÑO

Agradecemos a todos los habitantes y trabajadores del sector salud que participaron activamente en las diferentes fases del proyecto. Su colaboración y disposición para participar en el proceso fueron esenciales para el éxito de MlabNariño.

Un especial reconocimiento al equipo de MlabNariño: Dr. Martín Caicedo (médico HUDN), jefe Lessly Munares (enfermera MlabNariño), Ing. Luis Antonio Mueses (asesor HUDN), Dra. Margarita Maya (bacterióloga HUDN), Dra. María Elena Erazo (bacterióloga HUDN), Mgr. Geoffrey Gómez (investigador MlabNariño), Ing. Iván Galíndez (programador CIDTCA), Ing. Alvaro José Cervelió (electrónico Davinci), Dra. Edna Bernal (investigadora Davinci), Dr. Andrés Alejandro Díaz (investigador Davinci), jefe Gabriela Portillo (enfermera proyecto MlabNariño), Dra. Alicia Cristina Silva (investigadora UNAD), Ing. Jaime Montenegro (investigador UNAD), Ing. Arturo Eraso Torres (desarrollador proyecto, QEPD, equipo administrativo MlabNariño, equipo de salidas extramurales HUDN, equipo de estudiantes practicantes de seguimiento del cerco epidemiológico del proyecto MlabNariño y demás personas que, de una u otra manera, aportaron de manera decidida al logro de los objetivos del proyecto. Mil y mil gracias a todos.

Finalmente, nuestro agradecimiento a la comunidad y al personal de cada uno de los equipos de investigación de las diferentes entidades aliadas para la ejecución del proyecto, que no han sido nombrados y que participaron en las diferentes fases del proyecto, desde la toma de muestras hasta la implementación de las soluciones tecnológicas. Sin su participación y apoyo, este proyecto no habría tenido el impacto que logró alcanzar.

A todos ustedes, nuestro más sincero reconocimiento y gratitud.

CONTENIDO

Presentación	15
---------------------------	-----------

Introducción.....	17
--------------------------	-----------

Capítulo 1

Características poblacionales y contexto territorial del departamento de Nariño	19
--	-----------

Introducción al departamento de Nariño	19
--	----

Estructura poblacional y demografía	20
---	----

Impacto del COVID-19 en la dinámica social y sanitaria de Nariño	25
--	----

Conclusión del capítulo	32
-------------------------------	----

Capítulo 2

Motivación y objetivos para el desarrollo de la investigación en tiempos de pandemia	35
---	-----------

Motivación inicial: la emergencia sanitaria y la capacidad instalada	35
--	----

Magnitud del problema en tiempos de pandemia.....	41
---	----

Justificación de la investigación en tiempos de pandemia	46
--	----

Objetivos de MlabNariño para mitigar los efectos de la pandemia	49
---	----

Capítulo 3.....	53
------------------------	-----------

Metodología y elementos importantes para el logro de los objetivos planteados	53
--	-----------

Tipo de investigación, población y fuentes de los datos	53
---	----

Plan de actividades para el logro de los objetivos de MlabNariño	57
--	----

Técnicas para la recolección de la información y consideraciones éticas.....	59
--	----

Armonización de los equipos para el logro de los resultados	63
---	----

Consideraciones éticas en el proyecto MlabNariño	65
--	----

Capítulo 4.....	67
Fortalecimiento de la infraestructura en el HUDN: un laboratorio molecular avanzado para combatir enfermedades infecciosas.....	67
Descripción del laboratorio del HUDN	68
Fortalecimiento y adecuación del laboratorio	69
Seguimiento del cerco epidemiológico de pacientes COVID-19 del laboratorio HUDN	72
Capítulo 5.....	77
Herramientas de la 4RI aplicadas en el fortalecimiento del Laboratorio Clínico del HUDN	77
Contexto y definiciones	78
Sistematización de la información en el proyecto MlabNariño	83
Analítica de datos y ML aplicada a MlabNariño.....	94
Internet de las cosas (IoT) como solución EPP.....	116
Conclusiones del capítulo	123
Capítulo 6.....	125
Impactos del proyecto MlabNariño	125
Impacto tecnológico y fortalecimiento de la capacidad instalada.....	126
Impacto epidemiológico y toma de decisiones en salud pública.....	127
Impacto investigativo	128
Impacto académico y generación de nuevo conocimiento	128
Logros adicionales del proyecto	129
Glosario	131
Referencias	137

Lista de figuras

Figura 1.	Departamento de Nariño	20
Figura 2.	Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN)	24
Figura 3.	Maqueta del diseño del laboratorio clínico del HUDN inicial	67
Figura 4.	Accesos y equipos laboratorio fortalecido HUDN	70
Figura 5.	Equipos laboratorio fortalecido HUDN	71
Figura 6.	Seguimiento cerco epidemiológico MlabNariño	74
Figura 7.	Momentos recolección de información proyecto MlabNariño.....	85
Figura 8.	Tipos de conjuntos de datos proyecto MlabNariño.....	87
Figura 9.	Pantalla de acceso al sistema de captura Mlab	91
Figura 10.	Pantalla de captura y pestañas MlabNariño.....	91
Figura 11.	Depuración de datos Mlab con Jupyter y Python	101
Figura 12.	Modelo árboles de decisión MlabNariño.....	107
Figura 13.	Modelo Naïve Bayes MlabNariño	108
Figura 14.	Ejemplo de matriz de confusión generada con los modelos aplicados en el proyecto MlabNariño	109
Figura 15.	Ejemplo de matriz de confusión generada con los modelos aplicados en el proyecto MlabNariño	111
Figura 16.	Reporte gráfico situación laboral personas con COVID-19, proyecto MlabNariño	115
Figura 17.	Reporte gráfico fallas bioseguridad personas con COVID-19, proyecto MlabNariño	115
Figura 18.	Diseño solución IoT-EPP	117
Figura 19.	Pantalla monitoreo front-end (IoT-EPP)	120

Lista de tablas

Tabla 1.	Análisis de semaforización del estado de los LSP.....	42
Tabla 2.	Resumen del Plan de Actividades del proyecto MlabNariño.....	57
Tabla 3.	Instrumentos de recolección de información aplicados en Mlab.....	61
Tabla 4.	Revoluciones industriales de la humanidad	80
Tabla 5.	Datasets generados en MlabNariño	92
Tabla 6.	Pantalla hoja de cálculo con datos de Mlab	99
Tabla 7.	Conjuntos datasets y aplicación ML proyecto MlabNariño.....	104
Tabla 8.	Dataset final depurado síntomas.....	106
Tabla 9.	Funciones de balanceo aplicadas a los modelos seleccionados	106
Tabla 10.	Resultados para probabilidad de hospitalización	112
Tabla 11.	Resultados para probabilidad de desenlace fatal	112
Tabla 12.	Resultados para probabilidad de padecer IRA	113
Tabla 13.	Resultados para probabilidad de secuelas sin medicación.....	113
Tabla 14.	Resultados para probabilidad de ausencia de secuelas con remedios caseros.....	114
Tabla 15.	Relación de áreas y espacios EPP en el HUDN	120
Tabla 16.	Registros en MySQL de los datos capturados por los sensores	123



PRESENTACIÓN

Este libro describe el desarrollo del proyecto MlabNariño, código BPIN 2020000100140 SGP, que surgió en respuesta a la necesidad de fortalecer la infraestructura de salud en el departamento de Nariño frente a la pandemia de COVID-19 y se consolidó como un esfuerzo colaborativo sin precedentes entre instituciones académicas, gubernamentales y de salud. En este documento se describen la ejecución, los desafíos y los logros alcanzados en el fortalecimiento de un laboratorio molecular en el HUDN, una iniciativa que no solo contribuyó a la detección y gestión de la pandemia en el departamento, sino que también dejó un legado de innovación y desarrollo tecnológico.

A lo largo de sus capítulos, la obra describe el uso de herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI), como la inteligencia artificial (IA) y el internet de las cosas (IoT), aplicadas en la optimización de procesos clínicos y en el desarrollo de elementos de protección personal (EPP) con monitoreo ambiental. El trabajo colaborativo, que involucró a la UNAD, la Gobernación de Nariño, el IDSN y otras entidades, demuestra cómo la sinergia entre ciencia y tecnología puede transformar la respuesta ante emergencias sanitarias.

Este libro no solo es un registro de lo realizado, sino también un testimonio de resiliencia y adaptación ante crisis globales, pues aporta conocimientos que pueden servir como modelo reproducible en otras regiones.

INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN EL LABORATORIO MOLECULAR



INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19 marcó un antes y un después en la forma en que el mundo aborda la salud pública, destacando la importancia de contar con sistemas de respuesta ágiles y avanzados. Esta obra relata la experiencia de un proyecto de investigación y desarrollo ejecutado en el HUDN, en colaboración con entidades académicas y gubernamentales, para enfrentar los retos de la crisis sanitaria global. El proyecto, denominado MlabNariño, código BPIN 2020000100140 SGP, se diseñó con el propósito de fortalecer la capacidad diagnóstica y de gestión de enfermedades infecciosas en la región, e integró herramientas tecnológicas avanzadas propias de la Cuarta Revolución Industrial (4RI), como el *machine learning*, el análisis de datos y el internet de las cosas (IoT).

El contexto de Nariño, una región caracterizada por su diversidad geográfica y social, en el 2020 presentaba desafíos únicos que complicaron la respuesta a la pandemia. Este libro detalla cómo, a través de alianzas estratégicas entre el HUDN, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), el IDSN y la Gobernación de Nariño, se logró fortalecer un laboratorio molecular que benefició a más de 22 000 personas, de las cuales más de 2600 resultaron positivas para el virus de la COVID-19. El laboratorio fortalecido no solo permitió aumentar la capacidad diagnóstica, sino que también sentó las bases para futuras respuestas a crisis sanitarias.

El proyecto no se limitó a las pruebas de detección. Se llevaron a cabo campañas extramuros en varios

municipios para garantizar el acceso a las pruebas RT-PCR¹ y al seguimiento epidemiológico, lo cual ayudó a reducir el riesgo de transmisión en comunidades vulnerables. El impacto del proyecto abarcó desde la aplicación de IA para analizar datos y predecir escenarios hasta el desarrollo de soluciones de IoT para monitorear las condiciones del laboratorio y proteger al personal de salud.

Este libro se estructura en capítulos que describen, desde la motivación y los objetivos de la investigación, pasando por la metodología empleada, hasta las aplicaciones tecnológicas y el análisis de los resultados. Cada sección refleja el esfuerzo interdisciplinario y la capacidad de innovación desplegada para afrontar una de las crisis de salud más complejas de la historia reciente que ha vivido la humanidad, y muestra cómo la combinación de ciencia, tecnología y colaboración puede transformar la respuesta sanitaria en contextos de alta vulnerabilidad.

1 *Reverse transcription-polymerase chain reaction*: ‘transcriptasa inversa-reacción en cadena de la polimerasa’. RT-PCR es una técnica para detectar material genético convirtiéndolo primero en ADN y luego multiplicándolo millones de veces para analizarlo con precisión.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS POBLACIONALES Y CONTEXTO TERRITORIAL DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

En este capítulo se presentan los aspectos principales del contexto en el que se desarrolló el proyecto de investigación titulado Fortalecimiento de la Capacidad Instalada de Ciencia y Tecnología del Hospital Universitario Departamental de Nariño para Atender Problemáticas Asociadas con Agentes Biológicos de Alto Riesgo para la Salud Humana en el Departamento de Nariño – MlabNariño. Este proyecto fue impulsado a través de una alianza estratégica entre el HUDN, la UNAD, el IDSN y la Gobernación de Nariño. Su implementación se llevó a cabo durante la pandemia de COVID-19, la cual trajo consigo cambios profundos en la relación entre salud y calidad de vida, y afectó tanto a la población local y regional como al nivel nacional e internacional.

Para contextualizar al lector sobre el desarrollo de esta investigación, es importante describir algunos aspectos demográficos y territoriales del departamento de Nariño y analizar cómo las dinámicas económicas, poblacionales y socioculturales influyeron en la evolución de la pandemia de COVID-19 durante los años 2020, 2021 y 2022. Asimismo, se describe cómo esta iniciativa de investigación promovió respuestas positivas en salud para la población nariñense y de otros departamentos del suroccidente colombiano.

INTRODUCCIÓN AL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

El departamento de Nariño, creado en 1904, se encuentra en el suroccidente de Colombia, limitando al sur con Ecuador. Con una superficie de 33 268 km², que representa

el 2,9% del territorio nacional, Nariño es un departamento de gran riqueza natural y cultural, caracterizado por su diversidad geográfica y social. La región está compuesta por 64 municipios, organizados en subregiones como Sanquianga, Pacífico Sur, Telembí, el Pie de Monte Costero, exprovincia de Obando, Sabana, Abades, Occidente, Cordillera, Centro, Juanambú, Río Mayo y Guambuyaco (Castillo y Jurado, 2014; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2026). Estas áreas presentan una variedad de características geográficas, económicas y culturales que, en conjunto, enriquecen al departamento, pero también representan un reto importante en términos de salud pública y desarrollo.

Figura 1. Departamento de Nariño



Fuente: Mileniooscuro (2015).

ESTRUCTURA POBLACIONAL Y DEMOGRAFÍA

Según el último censo oficial, correspondiente al 2018, realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Nariño cuenta con una población de aproximadamente 1 627 386 habitantes, de los cuales el 43,8 % reside en áreas rurales y el 56,2 % en zonas urbanas. Esta distribución poblacional revela una gran dispersión en las áreas rurales, donde la economía depende, en gran medida, de actividades agropecuarias. En contraste, los centros urbanos concentran los



servicios de salud, lo cual ha representado un desafío importante para garantizar el acceso equitativo a estos servicios en todo el territorio.

Además, la población se ha caracterizado por un alto nivel de vulnerabilidad socioeconómica en comparación con otros departamentos del país, con una proporción significativa de personas que viven en condiciones de pobreza y pobreza extrema, especialmente en las zonas rurales y las comunidades étnicas (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Distribución étnica y cultural

La riqueza étnica y cultural de Nariño es una de sus características notables. El departamento ha albergado diversas comunidades indígenas y afrocolombianas, las cuales contribuyen a su diversidad cultural y a la práctica de tradiciones ancestrales, incluidas las de medicina tradicional. Según el Observatorio de Género de Nariño (Grupo ASIS, 2021), el 32,9 % de la población se ha identificado como perteneciente a grupos étnicos, siendo el sexto departamento con mayor población afrocolombiana y uno de los tres con mayor población indígena en Colombia. En el 2018, aproximadamente 232 847 personas se reconocieron como negras, afrocolombianas, raizales o palenqueras, mientras que 206 455 personas se identificaron como indígenas.

En este aspecto, es importante mencionar que, en estas comunidades, particularmente las indígenas, se ha identificado una fuerte conexión con la tierra y los recursos naturales, lo cual se ha reflejado en sus sistemas de producción agrícola, prácticas de medicina tradicional y conocimientos ancestrales en el manejo de la salud. Pero, al mismo tiempo, y en relación con el desarrollo del proyecto de investigación que describe este libro, esta conexión con sus costumbres ancestrales también representó muchos desafíos en términos de salud pública, principalmente durante la pandemia, ya que se identificó que estas comunidades requerían servicios de salud culturalmente adaptados (Ministerio de Salud y Protección Social, 2019).

Por otra parte, en términos de género, en el análisis de la población para la investigación desarrollada se observó que las mujeres representaban un porcentaje significativo dentro de estas comunidades. Por ejemplo, en las comunidades afrocolombianas, las mujeres representaban el 17,6 % de la población femenina total del departamento. En cuanto a las comunidades indígenas, las mujeres representaban el 50,7 % de dicha población y el 81,4 % de las personas indígenas habitaban en

áreas rurales. Estos datos fueron fundamentales a la hora de programar las salidas extramurales en el desarrollo del proyecto.

A nivel educativo, los índices de acceso a la educación superior, en el desarrollo del estudio, indicaban que eran bajos en comparación con la media nacional, especialmente entre la población afrocolombiana e indígena, lo que, en tiempos de pandemia y antes de ella, evidenciaba un impacto importante en las oportunidades de empleo y desarrollo económico de la región (Ministerio de Educación Nacional, 2020).

Desafíos en salud pública para poblaciones étnicas

Dado que el fin del proyecto era fortalecer un laboratorio para hacerle frente a la crisis sanitaria generada por la pandemia de COVID-19, fue necesario analizar el contexto de la población y encontrar que la dispersión geográfica y las condiciones de vida en las zonas rurales y de difícil acceso del departamento de Nariño han sido y son una barrera que dificulta que los servicios de salud lleguen a estas poblaciones. La infraestructura de salud en estas áreas se evidenció limitada, con pocos centros de atención y, en muchos casos, sin acceso a servicios de alta complejidad. Como si lo anterior no fuera poco, también se ha evidenciado que esta situación se agrava en temporadas de lluvias, cuando algunas zonas quedan incomunicadas, lo que afecta la continuidad de la atención y el seguimiento de casos de salud pública (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Por otra parte, además de los desafíos logísticos, se encontró que las barreras culturales y lingüísticas en algunos territorios indígenas limitan la efectividad de los programas de salud. Por ejemplo, en comunidades donde se preservan lenguas y costumbres propias, las intervenciones en salud pública encuentran resistencia, ya sea por desconfianza en los sistemas de salud modernos o por desconocimiento de sus beneficios. En términos del desarrollo investigativo, se puede afirmar que estas barreras han dificultado la implementación de programas de prevención y tratamiento de enfermedades, así como la adopción de prácticas de higiene y saneamiento que se consideran esenciales para mejorar los índices de salud en la región (Organización Panamericana de Salud, 2019).

Según el Ministerio de Salud y Protección Social (2019), en respuesta a la situación antes descrita, se desarrollaron estrategias de salud pública con enfoque diferencial, las cuales incluyeron la capacitación de profesionales de salud bilingües y la implementación de programas de telemedicina en algunas regiones, de modo

que los pacientes recibieran consultas a distancia con especialistas que, de otro modo, hubiesen estado fuera de su alcance. En este aspecto, se debe mencionar que la telemedicina ha facilitado el acceso a servicios como diagnóstico y monitoreo de enfermedades crónicas, reduciendo el tiempo y los costos asociados con el desplazamiento de los pacientes a los centros urbanos, opción tecnológica que vale la pena mencionar que fue implementada en algunos servicios por el HUDN en la pandemia.

Adicionalmente, de acuerdo con el Centro de Estudios de Salud Intercultural (2020), se ha venido promoviendo la integración de prácticas de medicina tradicional dentro del sistema de salud pública, en un esfuerzo por respetar las creencias y costumbres locales y hacer más accesibles los servicios de salud para estas comunidades. Este proceso ha fomentado una mayor aceptación de los programas de salud y ha fortalecido la colaboración entre profesionales de la salud y líderes comunitarios, quienes actúan como intermediarios para la difusión de mensajes preventivos y la organización de jornadas de salud en sus territorios. Dentro de los propósitos de la investigación realizada, se identificó esta situación como un tema que debe continuar abordándose y convertirse en un tema de discusión permanente para lograr llegar con programas de salud a todas las comunidades que así lo necesiten, sin importar su lengua o etnia.

Contexto económico y de salud en tiempos de pandemia

La diversidad cultural y las barreras de acceso a los sistemas de salud en el departamento de Nariño, sumadas a las dificultades geográficas, han representado históricamente un reto para sus habitantes. Esta situación se vio agravada con la llegada del COVID-19 en 2020, cuando quedaron en evidencia las deficiencias estructurales del sistema de salud, incluidas la limitada infraestructura hospitalaria, la escasez de personal médico y las dificultades en el acceso a servicios básicos. En este aspecto, es importante mencionar que la pandemia ejerció una presión sin precedentes sobre el sistema de salud, afectando especialmente a las zonas rurales y a la región fronteriza con Ecuador, donde la movilidad y el comercio transfronterizo facilitaron la propagación del virus. Asimismo, las dinámicas de frontera, junto con los movimientos migratorios internos y externos y la interconexión con otros departamentos, como Putumayo y Cauca, hicieron aún más complejo el control de la transmisión del COVID-19 y generaron un constante flujo de casos entre estas regiones (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020a).

Adicionalmente, a nivel socioeconómico, la pandemia afectó gravemente a sectores esenciales como la agricultura y el comercio, de los cuales históricamente ha dependido gran parte de la economía del departamento de Nariño, especialmente en las áreas rurales. Las restricciones de movilidad y el cierre de mercados locales e internacionales generaron un impacto directo en los ingresos de las familias, lo cual limitó su capacidad para acceder a servicios de salud y aumentó así la carga sobre un sistema ya sobrepasado (Departamento Nacional de Planeación, 2021).

Respuesta hospitalaria inicial y limitaciones

El HUDN, ubicado en Pasto, es el principal centro público de atención especializada y de alta complejidad de la región. Sin embargo, con la llegada del COVID-19, la capacidad de respuesta del HUDN se vio rápidamente rebasada. La infraestructura existente de camas de cuidados intensivos (UCI) y los equipos de soporte vital, como ventiladores, fueron insuficientes para enfrentar el acelerado aumento de casos graves, especialmente durante los picos pandémicos de 2020 y 2021 (Instituto Nacional de Salud, 2021).

Figura 2. Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN)



Fuente: “Hospital Universitario Departamental de Nariño renovó acreditación ICONTEC”, (2021)

En marzo de 2020, el primer caso reportado en el departamento marcó el inicio de una etapa crítica, que se intensificó rápidamente con casos adicionales importados desde Ecuador y otras áreas (Rodríguez Hernández y Rosselli Cock, 2021). Durante los picos de la pandemia, la ocupación de camas UCI alcanzó el 100 %, lo que obligó a varias instituciones a establecer hospitales de campaña y a derivar pacientes a otras regiones. Esta situación hizo evidente la necesidad urgente de fortalecer la infraestructura hospitalaria, ampliar las unidades de cuidados intensivos y asegurar la disponibilidad de equipos médicos esenciales (Gobernación de Nariño, 2020).

En respuesta a estas limitaciones, se lanzó el proyecto de investigación que se describe en este libro, con el objetivo de apoyar y propender por una mejora en la capacidad diagnóstica del HUDN, especialmente en el uso de pruebas PCR y otros métodos avanzados de detección. Además, se propuso el desarrollo de herramientas tecnológicas avanzadas para monitorear y analizar el comportamiento del virus en la región, utilizando técnicas de IA para anticipar la demanda de servicios de salud y generar alertas tempranas. Estas iniciativas se aliaron a los procesos médicos ya establecidos para mitigar la situación que se estaba viviendo y ayudar a generar una respuesta sanitaria más oportuna y efectiva, principalmente en lo relacionado con el proceso de toma de decisiones, con el fin de mitigar el impacto del COVID-19 en la población de Nariño.

IMPACTO DEL COVID-19 EN LA DINÁMICA SOCIAL Y SANITARIA DE NARIÑO

La pandemia de COVID-19 produjo una alteración profunda y sostenida en las dinámicas sociales, culturales y económicas del departamento de Nariño. Los cierres de fronteras y las restricciones de movilidad impactaron de manera significativa a la población local y a los migrantes, especialmente a aquellos provenientes de Venezuela, quienes veían en Nariño una ruta de paso o un destino temporal en su búsqueda de mejores condiciones de vida. Estas restricciones generaron una situación de alta vulnerabilidad social y sanitaria en el departamento, con efectos particularmente críticos en zonas rurales y en la región del Pacífico, donde los servicios de salud ya eran limitados. La pandemia exacerbó las desigualdades socioeconómicas y afectó a las familias en su acceso a ingresos y a servicios básicos esenciales (Departamento Nacional de Planeación, 2021).

Desde una perspectiva global, la crisis del COVID-19 destacó las desigualdades en infraestructura y acceso a la tecnología entre las naciones y dentro de ellas.

Según la Organización Mundial de la Salud, la pandemia reveló la fragilidad humana frente a enfermedades emergentes, y expuso las disparidades en el acceso a servicios de salud, la dependencia económica de sectores específicos y la vulnerabilidad de las poblaciones marginadas (Organización Mundial de la Salud, 2020b).

Medidas de contención y adaptación a la realidad sanitaria

Ante la gravedad de la situación, el gobierno colombiano implementó medidas de contención y protocolos de bioseguridad en todo el territorio nacional. Se establecieron medidas como el uso obligatorio de mascarillas, el distanciamiento social, las cuarentenas y las restricciones de movilidad, que buscaban contener la propagación del virus. Estas medidas, aunque efectivas en algunos contextos, presentaron desafíos particulares en Nariño debido a la resistencia de algunas comunidades para adoptarlas, a raíz de tradiciones culturales y de la desconfianza en el sistema de salud. La comunicación limitada y el acceso desigual a la información sobre la pandemia afectaron especialmente a comunidades rurales e indígenas, lo cual subrayó la necesidad de desarrollar una respuesta sanitaria adaptada a las realidades culturales y demográficas del departamento (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020a).

Además de las medidas gubernamentales, las comunidades de Nariño adaptaron estrategias locales de prevención. Muchas familias recurrieron a prácticas de medicina tradicional y a remedios caseros, como el uso de moringa, bebidas cítricas y agua de panela, como parte de sus costumbres de autocuidado. Aunque estos métodos no contaban con respaldo científico para la prevención o el tratamiento de la COVID-19, su uso se extendió como una respuesta inmediata y accesible a la crisis sanitaria (Grupo ASIS, 2021). Estas prácticas reflejaron tanto el ingenio como la vulnerabilidad de la región, donde la limitación de recursos y la falta de infraestructura hospitalaria en áreas rurales dificultaron el acceso a la atención médica formal.

El impacto del COVID-19 también fue notable en la estructura económica y laboral de Nariño. Las restricciones de movilidad y el confinamiento generaron una desaceleración económica, afectando a sectores clave como la agricultura y el comercio, de los cuales depende gran parte de la población. Las familias vieron reducidos sus ingresos y enfrentaron una inseguridad alimentaria creciente, especialmente en las zonas rurales, donde la dependencia de la economía informal es alta (DANE, 2021). Esta situación obligó a muchas personas a buscar alternativas, como la venta de

productos en mercados locales o, incluso, el trabajo informal en otras ciudades, a pesar del riesgo sanitario que esto implicaba.

La alta movilidad de la población en zonas fronterizas con Ecuador también aumentó el riesgo de transmisión del virus, lo cual llevó a la implementación de controles estrictos en el Puente Internacional de Rumichaca, en Ipiales, Nariño. Sin embargo, estas medidas no pudieron evitar por completo el cruce de personas en busca de servicios de salud o trabajo, lo cual facilitó la importación de casos del virus. Esto subraya la interdependencia económica y social en la región fronteriza y la dificultad de implementar una contención estricta en áreas con alta movilidad migratoria (Gobernación de Nariño, 2020).

Estigma social y salud mental en la pandemia

La pandemia también trajo consigo un aumento en el estigma social, que afectó tanto a los profesionales de la salud como a los pacientes diagnosticados con COVID-19. El miedo al contagio y la incertidumbre llevaron a la discriminación de personas con síntomas o de aquellas que se creía podían portar el virus, incluyendo al personal médico que enfrentaba la pandemia en primera línea. Muchos profesionales de la salud en Nariño reportaron experiencias de rechazo social y estigmatización en sus comunidades, ya que algunos ciudadanos los percibían como una fuente de contagio (Bedoya Jojoa, 2020). En algunos casos, estos trabajadores fueron excluidos de servicios como el transporte público o enfrentaron la desconfianza de sus vecinos, quienes temían por su seguridad (Organización de las Naciones Unidas, 2020).

Este estigma también generó secuelas en la salud mental de la población. La incertidumbre, el miedo constante al contagio, la pérdida de seres queridos y el aislamiento prolongado incrementaron los casos de ansiedad, depresión y estrés en la región. La Organización de las Naciones Unidas advirtió sobre el aumento de los problemas de salud mental en todo el mundo a raíz de la pandemia, y Nariño no fue la excepción (Suárez Alonso, 2020). En el departamento, las barreras de acceso a servicios de apoyo psicológico y el desconocimiento de prácticas de autocuidado contribuyeron a agravar esta situación.

Impacto en la educación y cambios en el estilo de vida

Las restricciones impuestas durante la pandemia también afectaron a la educación y a la vida cotidiana de la población de Nariño. El cierre de escuelas y la transición al aprendizaje en línea crearon barreras significativas, especialmente en áreas rurales donde la conectividad es limitada y los recursos para acceder a tecnología son escasos. Las familias con escasos recursos enfrentaron dificultades para asegurar que sus hijos continuaran sus estudios, lo que profundizó las desigualdades educativas en el departamento (Secretaría de Educación de Nariño, 2020).

Además, el confinamiento y el distanciamiento social transformaron el estilo de vida de la población, limitando el acceso a espacios recreativos, actividades culturales y eventos sociales. Los carnavales de Pasto, una celebración icónica en la región, fueron cancelados, lo que generó no solo una pérdida cultural, sino también un golpe económico para la economía local. Los eventos deportivos, sociales y religiosos fueron suspendidos, lo que afectó las dinámicas familiares y sociales en el departamento (Manrique, 2021).

Justificación del proyecto: la necesidad de innovación en la respuesta sanitaria

A partir de las definiciones, descripciones y el contexto expuesto sobre el departamento de Nariño, se espera que el lector pueda comprender cómo la interacción de factores demográficos, geográficos, culturales y económicos característicos de la región permitió a los investigadores del proyecto fundamentar adecuadamente la formulación de la investigación, que a su vez justificó de manera plena el desarrollo del proyecto denominado Fortalecimiento de la Capacidad Instalada de Ciencia y Tecnología del HUDN MlabNariño. Este se dirigió para que fuera una respuesta a algunas de las situaciones que se estaban viviendo en la crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19, la cual puso en evidencia múltiples deficiencias en la infraestructura y en las prácticas de salud pública del departamento. Aunque el proyecto no tenía la capacidad de resolver todos los problemas sanitarios que enfrentaba el departamento, sí podía contribuir a mitigar algunos de los aspectos de la situación, la cual se veía agravada por el desarrollo continuo de la pandemia.

En línea con lo mencionado anteriormente, es relevante destacar que el proyecto nació en un contexto donde la pandemia impactó de manera transversal los aspectos económicos, sociales y culturales, afectando también la percepción pública

y el cumplimiento de las normativas sanitarias. La colaboración entre el HUDN, la UNAD, el Instituto Departamental de Nariño, la Gobernación de Nariño y otras instituciones fue importante para sentar las bases de posibles soluciones con respecto a la investigación científica. Esta alianza permitió generar alternativas de respuesta ante futuras crisis sanitarias, con un enfoque centrado en el uso de tecnologías innovadoras como la IA, el internet de las cosas (IoT) y otras herramientas tecnológicas. Estas soluciones buscaban optimizar las opciones de diagnóstico y mejorar los procesos en el laboratorio molecular.

El incumplimiento de normas sanitarias y la necesidad de cultura preventiva

La crisis del COVID-19 reveló que no basta con tener normas o protocolos sanitarios; es fundamental una cultura preventiva y el apoyo de las comunidades para garantizar el éxito en el control de enfermedades infecciosas. A pesar de los esfuerzos de las autoridades sanitarias por promover el cumplimiento de medidas como el uso de mascarillas y el distanciamiento social, se observó un incumplimiento significativo, especialmente durante eventos sociales como las fiestas decembrinas de 2020 y 2021, lo cual contribuyó a los picos epidemiológicos (Ruiz, 2021). Este incumplimiento incluyó

- violación del aislamiento obligatorio, con un 87,4 % de los casos;
- infracciones relacionadas con el consumo de bebidas alcohólicas (1,8 %) y aglomeraciones (1,4 %).

Estos comportamientos subrayaron la necesidad de un enfoque sanitario que integrara una educación en cultura preventiva y que reconociera las particularidades socioculturales de la población (Ruiz, 2021). Esta situación se evidenció en Nariño, donde los mayores picos que se registraron en la captura de datos fueron en los meses de diciembre (2020 y 2021), enero y mayo (2021) principalmente, que coinciden con fiestas de fin de año, carnavales y Día de la Madre.

Dinámicas sociales y culturales en la propagación del virus

Las dinámicas sociales y culturales de Nariño jugaron un papel significativo en la propagación del COVID-19, afectando la eficacia de las medidas de prevención. La región presentó patrones de comportamiento que, en ciertos momentos, dificulta-

ron el cumplimiento de normas sanitarias como el uso de tapabocas y el distanciamiento social. En eventos sociales, como las fiestas decembrinas de 2020 y 2021, se observaron altos niveles de interacción, que resultaron en un aumento de los casos. Las cifras de contagio reflejaron que el 24,4% de los casos se produjeron en entornos familiares, el 25,01% en entornos laborales y el 24,60% en contextos sociales. Esto puso de manifiesto la importancia de adaptar las intervenciones de salud pública a las realidades culturales y de comportamiento de la población local.

Además, estudios y datos recopilados en el suroccidente del país, incluyendo Nariño, indicaron que el incumplimiento de normas sanitarias fue común y, en muchos casos, atribuible a factores como el arraigo de prácticas culturales de socialización y la falta de información accesible y adecuada sobre los riesgos del COVID-19. Tal como se observó en otras regiones con dinámicas culturales similares, como Putumayo, las tasas de incumplimiento en Nariño estuvieron entre las más altas del país en categorías como la violación del toque de queda, el consumo de bebidas alcohólicas en espacios públicos y la omisión en el uso de tapabocas (Ruiz, 2021). Esto justificó la ejecución del proyecto que atañe a este libro, que no solo buscaba apoyar la capacidad diagnóstica del HUDN en relación con el COVID-19, sino que también propendió por fortalecer la promoción de una cultura preventiva, así como promover el cumplimiento de las normas sanitarias de manera culturalmente adecuada; fueron varias las salidas extramurales que se hicieron en el marco del proyecto, donde continuamente se hacía énfasis en este aspecto.

Impacto de la vacunación y los imaginarios sociales

La llegada de la vacuna contra el COVID-19 representó un hito en la lucha contra la pandemia, ofreciendo esperanza y una herramienta importante para reducir la mortalidad y la transmisión del virus. Sin embargo, el proceso de vacunación en Nariño estuvo marcado por la presencia de imaginarios sociales y escepticismo que influyeron en la percepción pública de la vacunación. Algunos miembros de la comunidad manifestaron dudas respecto a la seguridad y efectividad de las vacunas, influenciados en gran medida por información errónea difundida en redes sociales (Acosta-Quiroz e Iglesias-Osores, 2020) y teorías conspirativas que cuestionaban la finalidad de los biológicos.

En particular, el proyecto de investigación identificó que ciertas comunidades en Nariño recurrieron a prácticas de autocuidado y remedios caseros, como el uso de ajo, moringa, vaporizaciones y otras prácticas de medicina tradicional

(Maldonado et al., 2020), como alternativas o complementos a la vacunación. Estas respuestas reflejan una percepción cultural que, aunque histórica y profundamente arraigada, no siempre se alinea con la evidencia científica sobre la eficacia de la vacuna en la prevención del COVID-19 (Organización Panamericana de Salud, 2020b). La implementación del proyecto de investigación, entonces, se vio orientada no solo a fortalecer la respuesta sanitaria del HUDN, sino también a promover información clara y confiable sobre los beneficios de la vacunación, combatiendo así la desinformación y apoyando a la población a tomar decisiones informadas sobre su salud; en este marco se realizaron varias videoconferencias o *webinars*, talleres y se organizaron eventos de difusión de la investigación y aclaración de conceptos y temas relacionados con la pandemia y la solución que se estaba desarrollando.

Además, el proyecto contribuyó a la creación de estrategias de comunicación culturalmente sensibles, diseñadas para reducir el escepticismo y fomentar la confianza en la vacunación, especialmente en áreas rurales y comunidades étnicas con creencias y prácticas tradicionales. Esta labor resultó esencial en un entorno donde el movimiento antivacunas y la falta de confianza en las instituciones de salud pública representaban un obstáculo significativo para alcanzar una cobertura de vacunación eficaz (Díaz Pinzón, 2021).

Impacto económico y la vulnerabilidad del mercado laboral

La pandemia tuvo un efecto devastador en la economía de Nariño, afectando principalmente al mercado laboral y al sector informal. La pérdida de empleos y la suspensión de actividades comerciales, derivadas de las restricciones de movilidad y el confinamiento, profundizaron las desigualdades socioeconómicas en el departamento. Según datos del DANE (2021), durante el primer trimestre de 2020, la pandemia provocó la pérdida de aproximadamente 4,8 millones de empleos en Colombia, afectando especialmente a trabajadores informales y a aquellos con ingresos más bajos.

En Nariño, esta situación fue aún más aguda debido a la alta dependencia de la economía informal y a la vulnerabilidad de sectores como el comercio y la agricultura. La información recopilada en el proyecto reveló que la mayoría de los afectados en términos laborales pertenecían a los estratos socioeconómicos 1 y 2, lo cual evidenció la necesidad de una respuesta sanitaria que también contemple estrategias de recuperación económica (DANE, 2021). Para enfrentar estos retos, el proyecto, mediante estrategias para mejorar las capacidades del HUDN en la atención de

casos de COVID-19, también contribuyó a la optimización de recursos para mitigar los efectos de futuros eventos sanitarios en la economía local y a colaborar en una recuperación del mercado laboral mediante la disminución de contagios y el apoyo a la reactivación económica, esto mediante el seguimiento al cerco epidemiológico de los pacientes que se identificaron como infectados con el virus.

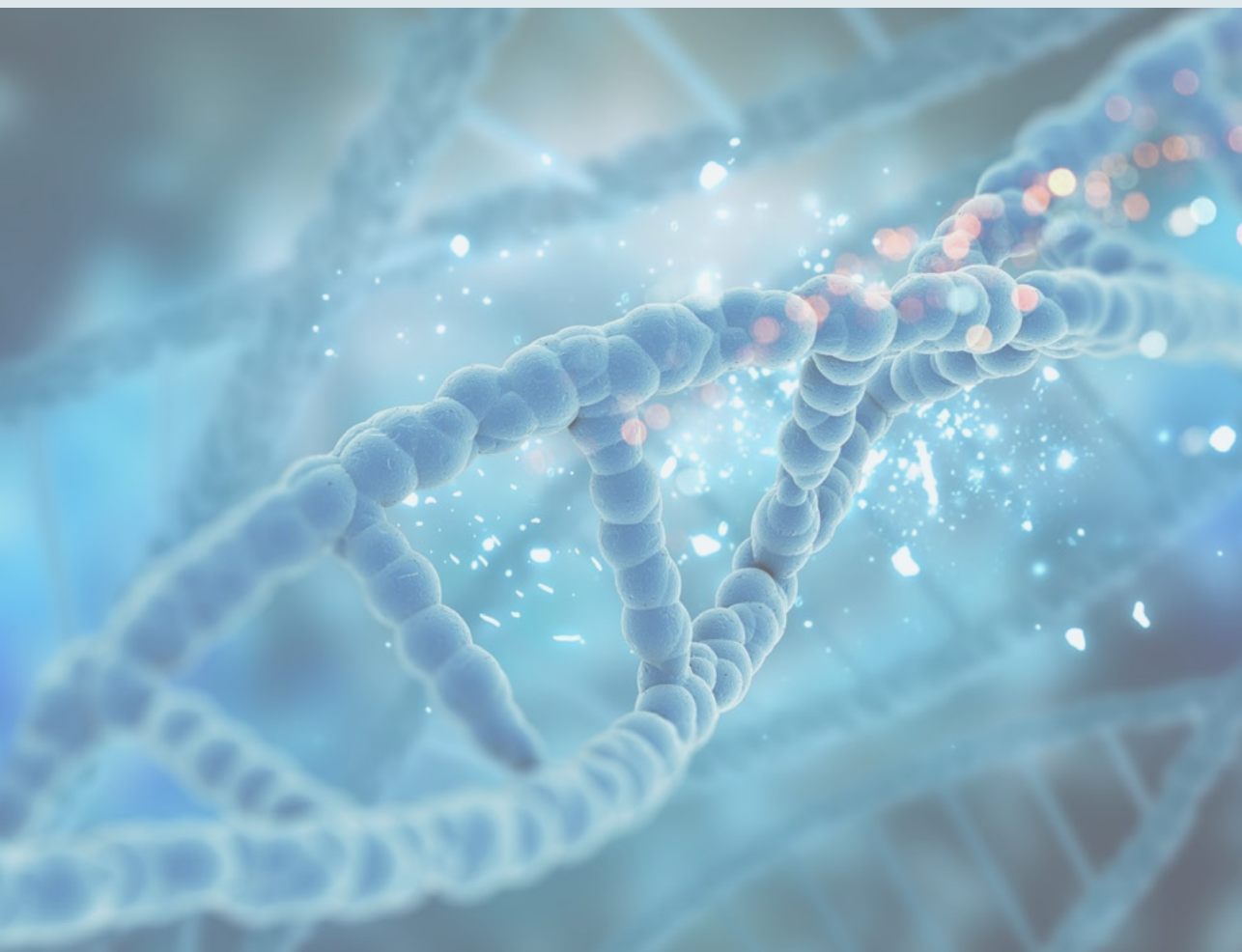
CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Comprender en profundidad las características poblacionales, económicas y culturales de Nariño, junto con las particularidades de su contexto territorial, es fundamental para entender las razones detrás de la formulación y ejecución del proyecto de investigación Fortalecimiento de la Capacidad Instalada de Ciencia y Tecnología del Hospital Universitario Departamental de Nariño. La alta vulnerabilidad de la región frente a crisis sanitarias como el COVID-19, agravada por su diversidad étnica, las brechas económicas y la limitada infraestructura en salud, revela la urgencia de desarrollar enfoques integrados y colaborativos.

Este capítulo ha pretendido evidenciar cómo las dinámicas sociales, el incumplimiento de normas sanitarias (Ruiz-Pérez y Aparicio Barrera, 2020) y la existencia de imaginarios sociales sobre la vacunación plantearon desafíos específicos en la respuesta a la pandemia, lo que evidencia la importancia de intervenciones culturalmente adaptadas y del respeto a las prácticas y creencias locales. Asimismo, la situación económica y la dependencia del mercado laboral informal indican cómo las crisis de salud impactan profundamente otros aspectos de la vida en el departamento, afectan la estabilidad de los hogares y acentúan la necesidad de una recuperación económica segura.

La complejidad y diversidad de la población de Nariño muestra que se requiere, por lo tanto, una respuesta sanitaria con enfoque diferencial, que considere las particularidades de las comunidades étnicas y rurales para asegurar un acceso equitativo a los servicios de salud y una atención que fortalezca la resiliencia de estas comunidades ante futuras crisis. Esta comprensión contextual no solo fundamenta la necesidad del proyecto que se ejecutó, sino que prepara al lector para explorar en los capítulos siguientes los enfoques y soluciones que se implementaron, tales como el uso de tecnologías de IA y análisis de datos, que fueron clave para responder a estos desafíos y fortalecer el sistema de salud, partiendo de una entidad pública y de gran aceptación en el departamento, como lo es el Hospital Universitario Departamental de Nariño.

La situación sanitaria del departamento de Nariño y los retos adicionales de la pandemia de COVID-19 evidenciaron la necesidad de desarrollar una infraestructura de salud resiliente y tecnológica. En este contexto, el proyecto de investigación ejecutado ha buscado responder a estas demandas y preparar para crisis futuras a los actores involucrados. En el siguiente capítulo se detallarán los objetivos y estrategias que se plantearon para lograrlo.



DE LA CIENCIA A LA ACCIÓN: INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN EL LABORATORIO MOLECULAR DEL HOSPITAL
UNIVERSITARIO DEPARTAMENTAL DE NARIÑO (HUDN) PARA COMBATIR ENFERMEDADES INFECCIOSAS



CAPÍTULO 2

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN EN TIEMPOS DE PANDEMIA

Al concluir el análisis del contexto poblacional y sanitario del departamento de Nariño en el capítulo 1, se espera que se haya explicado lo más preciso posible la alta vulnerabilidad de la región y las limitaciones estructurales del sistema de salud, las cuales son una necesidad que se evidenció en tiempos de pandemia y que aún siguen siendo evidentes, pero que para el momento coyuntural que se vivía, se requería una respuesta pertinente y rápida ante la pandemia, de allí que en el año de la pandemia se lanzaran varias convocatorias para mitigar el efecto de una situación nueva para todos en el mundo. Por lo anterior, el proyecto de investigación ejecutado y que se detalla en este documento se formuló con el propósito de ayudar a mitigar y atender estos desafíos, que si bien son muchos, desde el ámbito profesional y de conocimiento del equipo investigador se propendió por aportar con soluciones que contribuyeran y sumaran esfuerzos para hacerle frente a la pandemia, lo cual se logró aprovechando una alianza entre varios investigadores de diferentes entidades, que buscó de manera continua fortalecer la capacidad de respuesta del HUDN en tiempos de crisis, que para los momentos en los cuales se desarrolló era una necesidad apremiante.

MOTIVACIÓN INICIAL: LA EMERGENCIA SANITARIA Y LA CAPACIDAD INSTALADA

Ante la propagación del COVID-19, el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia emitió la Resolución 385

el 12 de marzo de 2020 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020c), declaró la emergencia sanitaria en el país y estableció medidas para enfrentar el virus. Poco después, el 17 de marzo de 2020 (Presidencia de la República de Colombia, 2020), la Presidencia de la República decretó el estado de emergencia económica, social y ecológica en todo el territorio nacional mediante el Decreto 417 (Presidencia de la República de Colombia, 2020), en línea con la declaración de pandemia que la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Organización Mundial de la Salud, 2020a) había hecho el 11 de marzo de 2020. Este evento marcó un hito en la historia contemporánea, al exponer la vulnerabilidad de los sistemas de salud de todo el mundo y recordar a las personas la fragilidad inherente de la vida humana.

En este contexto, la incertidumbre inicial sobre el comportamiento del COVID-19 (OMS, 2020c), sumada a un aumento sostenido de enfermedades respiratorias en el departamento de Nariño desde 2015 y el riesgo creciente de enfermedades infecciosas y zoonóticas, reveló la fragilidad de la salud global. Esta situación, que evidenciaba el potencial de nuevos brotes, epidemias y futuras pandemias, permitió identificar la necesidad de tomar medidas urgentes en los ámbitos gubernamental, civil y académico. En este sentido, surgió la iniciativa de ayudar a mitigar de alguna manera la emergencia sanitaria en Nariño, especialmente en su capital, Pasto, mediante una alianza entre distintos actores de la sociedad civil.

Esta alianza incluyó al sector productivo, representado por el HUDN; al gobierno, con la participación de la Gobernación de Nariño y el IDSN; y a la academia, con el aporte de la UNAD a través del grupo de investigación Davinci-UNAD, adscrito a la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería. Juntos formularon el proyecto titulado: “Fortalecimiento de la capacidad instalada de ciencia y tecnología del Hospital Universitario Departamental de Nariño para atender problemáticas asociadas con agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana en el departamento de Nariño”. Este proyecto se presentó a la convocatoria del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) en 2020, bajo la iniciativa Proyectos que Contribuyan a la Solución de Problemáticas Actuales de Salud Relacionadas con la Pandemia de COVID-19 (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2020).

El principal beneficiario del proyecto ejecutado y actor clave en la mitigación de los riesgos derivados de la pandemia fue el HUDN, institución pública de referencia en salud en el suroccidente colombiano, que presta servicios de mediana y alta complejidad principalmente a los departamentos de Nariño, Cauca y Putumayo. Su acreditación en salud y capacidad para atender casos complejos lo han posicionado como una entidad fundamental en la región. Según datos del HUDN (2020), en

2020 el hospital atendió un promedio de 19 433 pacientes anuales, con una tasa de mortalidad del 4,3 % y el resto de los casos clasificados como eventos mórbidos. Además, el HUDN recibió en promedio 2069 pacientes de otros departamentos, especialmente de Putumayo, lo cual subraya su importancia regional. Esta situación de alta demanda hacía indispensable asegurar la capacidad de respuesta del hospital, especialmente durante la pandemia, cuando las necesidades sanitarias y los desafíos en la prestación de servicios se intensificaron.

Dado que el HUDN se identificó como el actor central en la investigación, se evaluó su capacidad instalada para enfrentar la emergencia sanitaria en 2020. En ese momento, el hospital contaba con 1279 empleados (Planeación HUDN, 2020), incluyendo personal asistencial, administrativo y contratistas, además de 108 especialistas. Su infraestructura incluía 83 camas de observación en urgencias, 213 camas de hospitalización (con 20 en UCI para adultos y 10 en UCI intermedia para adultos), 9 quirófanos, 6 unidades de hemodiálisis y 8 de quimioterapia. Aunque estos recursos eran significativos, el contexto de pandemia exigía un refuerzo adicional para mitigar efectivamente los riesgos derivados de COVID-19. La capacidad del HUDN necesitaba expandirse para atender no solo a la población local, sino también a pacientes de otros departamentos en el suroccidente colombiano, dada la creciente demanda,

Debido a lo anterior, uno de los principales focos de atención fue incrementar la capacidad de la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) del HUDN. Antes de la emergencia sanitaria, la UCI atendía en promedio 350 hospitalizaciones anuales, con una ocupación aproximada del 90 % en condiciones normales. Sin embargo, con la llegada del COVID-19 y el aumento exponencial de casos graves, esta capacidad sería rápidamente sobrepasada. En los momentos más críticos, el HUDN y otros hospitales de la región enfrentaron un colapso en la disponibilidad de camas UCI y de hospitalización, lo que generó escenas caóticas donde los recursos médicos eran insuficientes para cubrir las necesidades de la población. Los pacientes, especialmente aquellos en condiciones graves, debían esperar por una cama o ser trasladados a otros departamentos, con un riesgo significativo debido a la escasez de espacios disponibles en otras instituciones de salud.

Esta crisis en las UCI generó temor y ansiedad en la población de Nariño, sentimientos compartidos a nivel nacional e incluso global, ya que la situación evidenciaba la vulnerabilidad de los sistemas de salud frente a una pandemia de tal magnitud. La falta de camas y de equipos especializados como ventiladores mecánicos exacerbó la incertidumbre y el miedo (Rengifo López, 2020), especialmente en familias con

personas de riesgo o personas mayores, quienes vivieron con la constante preocupación de no poder recibir atención en caso de necesitarla. A medida que las imágenes y noticias sobre hospitales saturados y personal médico al límite se difundían en los medios, la preocupación creció tanto en Nariño como en el resto del país y del mundo, lo que reflejaba la compleja y desgarradora realidad de una crisis sanitaria sin precedentes.

La situación descrita anteriormente puso en evidencia, además de la necesidad de camas, medicamentos, vacunas, personal sanitario y otros recursos básicos para un hospital de tercer nivel en Colombia, la importancia de contar con herramientas tecnológicas avanzadas para mejorar la capacidad de respuesta. La emergencia sanitaria resaltó la urgencia de implementar soluciones innovadoras que apoyaran el diagnóstico rápido y el análisis continuo de datos en un entorno tan desafiante como el de la pandemia. Fue entonces cuando surgió la idea de integrar tecnologías, como la IA, específicamente *machine learning* (Forero-Corba y Negre Bennasar, 2023), así como soluciones de internet de las cosas (IoT), que permitirían analizar datos y obtenerlos de manera automática. Estas herramientas, en el contexto del proyecto, se volvieron fundamentales para gestionar la evolución de la información que se generó en la pandemia, y en las primeras fases lograron detectar patrones en los contagios y describir la dinámica de las poblaciones afectadas, especialmente en eventos transmisibles de origen biológico, lo que ayudó a las salidas extramurales, al análisis de datos para la toma de decisiones, entre otros aspectos.

Para el HUDN, incorporar modelos de *machine learning* no solo representaba un avance en el monitoreo y análisis de datos durante el brote de COVID-19, sino que también establecía una infraestructura que podría ser útil en futuras crisis de salud pública. Sin embargo, en 2020, el hospital aún no contaba con estas capacidades, lo que significaba que debía fortalecerse rápidamente para responder a las demandas de un contexto en constante cambio. La implementación de estas tecnologías, en el análisis previo, permitió inferir que estos procesos no solo mejorarían la capacidad diagnóstica, sino que proporcionarían un soporte fundamental para la toma de decisiones en situaciones de emergencia, ayudando al personal de salud a identificar casos de alto riesgo y optimizar los recursos hospitalarios disponibles.

En el contexto descrito, para Nariño, la estrategia de manejo y control más viable de la pandemia, además de los recursos básicos urgentes para la atención sanitaria, tales como respiradores, vacunas, pruebas RT-PCR y equipos de protección personal, fue establecer un diagnóstico molecular robusto y eficaz del COVID-19, sustentado en herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) (Rubio Martín



y Rubio Martín, 2021). La decisión de fortalecer la capacidad de diagnóstico molecular no solo respondía a una necesidad de infraestructura sanitaria, sino que también se fundamentaba en los beneficios que ofrecía la detección temprana: aislar rápidamente los casos positivos, interrumpir la cadena de transmisión del virus y evitar así su propagación masiva.

Este enfoque se complementó con análisis de epidemiología molecular, que permitió identificar y priorizar áreas específicas —grupos, sectores, barrios y comunidades— donde era fundamental implementar confinamientos estrictos, así como sectores donde, en cambio, se podían establecer ciertas flexibilidades en las medidas de aislamiento. De este modo, el diagnóstico molecular masivo se convirtió en una herramienta esencial para realizar un uso óptimo de los recursos hospitalarios escasos en Nariño y contribuir a la atención de pacientes de departamentos vecinos con infraestructuras sanitarias aún más limitadas. A medida que avanzaba la investigación y se implementaba el proyecto, se consolidó esta capacidad de analizar los datos como una medida que ayudaba al hospital en la toma de muestras y en la mitigación del riesgo de contagio, mediante la detección temprana del virus en varios sectores y poblaciones de Nariño, con el fin de avanzar en el logro de establecer un marco de respuesta sanitaria factible ante futuras emergencias epidemiológicas.

Al inicio de la pandemia en Colombia, durante los primeros meses de 2020, se hizo un análisis preliminar sobre el comportamiento del brote en Nariño. Para marzo de ese año, el HUDN había atendido 45 casos sospechosos de COVID-19. De estos, 11 pacientes tenían antecedentes de viaje a zonas de transmisión activa del virus; sin embargo, solo 3 se confirmaron como positivos, mientras que otros 10 casos esperaban confirmación del laboratorio de salud pública del Instituto Departamental de Salud (IDS). En este contexto, las primeras estadísticas revelaron que el tiempo promedio para obtener los resultados era de 8 días, con un rango que iba desde un día hasta 21 días, dependiendo de la carga de trabajo del laboratorio. Este retraso en la entrega de resultados, aunque limitado al inicio, demostró una vulnerabilidad significativa en la capacidad de respuesta, una situación que rápidamente se agravó cuando los casos comenzaron a aumentar de forma exponencial en los meses siguientes.

Estos tiempos de respuesta evidenciaron de manera clara la necesidad urgente de fortalecer y habilitar nuevos laboratorios clínicos para el diagnóstico molecular de COVID-19. La expansión de la capacidad diagnóstica se convirtió en una prioridad para el HUDN, ya que permitiría procesar muestras de manera más rápida

y oportuna, evitaría la sobrecarga del sistema de salud y respondería de manera eficiente a las crecientes demandas de atención.

Por otro lado, se analizó la situación desde una perspectiva nacional, observando que, hacia abril-mayo de 2020, Colombia había alcanzado un nivel de mitigación donde el virus circulaba libremente, lo que dificultaba rastrear su transmisión de manera efectiva. Debido a esta situación, las definiciones de caso y los criterios para la toma de muestras se ampliaron: cualquier paciente con síntomas o contacto relevante se consideraba un caso probable, independientemente de antecedentes de viaje al extranjero, un criterio inicial que ya no era aplicable. En este contexto, se proyectaba un aumento significativo de casos en el departamento de Nariño, agravado por el pico estacional de enfermedades respiratorias, lo cual amenazaba con desbordar la capacidad instalada del laboratorio departamental si no se implementaban acciones inmediatas de fortalecimiento y control.

Este escenario evidenció la necesidad urgente de ofrecer apoyo técnico y reforzar la investigación en epidemiología molecular desde el Laboratorio Clínico del Hospital Universitario Departamental de Nariño. Afortunadamente, para el 2020, el HUDN contaba con infraestructura y equipamiento de última tecnología, lo que le permitía realizar desde pruebas de rutina hasta diagnósticos avanzados de nivel III de complejidad. Esta base tecnológica y de infraestructura se volvió fundamental para enfrentar la creciente demanda de diagnóstico y apoyo epidemiológico ante la crisis.

No obstante, el análisis inicial reveló que el laboratorio del HUDN, aunque bien equipado, requería una dotación adicional de insumos, materiales y equipos de diagnóstico, así como de medidas de bioseguridad específicas para la toma, transporte y procesamiento de muestras de agentes biológicos de alto riesgo. Este tipo de muestras debía manejarse con estándares rigurosos, como el transporte bajo la categoría UN3373 para “Sustancias biológicas categoría B” (Quiroga Caicedo, 2019) y, en algunos casos, la categoría UN2814 para “Sustancias infecciosas que afectan a humanos” (Quiroga Caicedo, 2019), de acuerdo con las directrices de la OMS de 2020. Acorde con lo anterior, era imperativo que el HUDN contara con recursos no solo para enfrentar el COVID-19, sino también para estar preparado frente a futuros patógenos de relevancia en salud pública, lo que garantizaba una respuesta oportuna y la seguridad del personal de salud.

Con base en esta necesidad, el proyecto formulado y ejecutado se enfocó en fortalecer las capacidades de investigación en epidemiología molecular, en el análisis de escenarios epidemiológicos y en la transferencia de información. El objetivo era

desarrollar nuevas estrategias y servicios científicos y tecnológicos que permitieran abordar de manera integral las problemáticas relacionadas con agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana, que abarcaran diagnóstico, tratamiento, contención y monitoreo. Así, el HUDN y la región y departamento de Nariño se prepararían para enfrentar esta y futuras amenazas sanitarias, aportando al fortalecimiento de la salud pública en la región.

MAGNITUD DEL PROBLEMA EN TIEMPOS DE PANDEMIA

En la formulación de la investigación fue fundamental analizar el contexto y capacidades existentes de los Laboratorios de Salud Pública (LSP) a nivel departamental. Para ello, se utilizó como referencia el informe *Diagnóstico de Laboratorios de Salud Pública Vigencia 2018*, publicado por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia (Quiroga Caicedo, 2019). Este documento detallaba el estado de los LSP en el país, evaluaba su cumplimiento misional y el desarrollo de capacidades básicas a través de un análisis de semaforización. Este análisis se había implementado como parte del seguimiento continuo al Plan de Fortalecimiento de Laboratorios de Salud Pública, desarrollado desde 2012 para optimizar el funcionamiento de los 33 laboratorios departamentales del país.

La semaforización utilizada en el diagnóstico clasifica a los laboratorios en diferentes categorías, que evidencian niveles de cumplimiento en aspectos importantes como infraestructura física, equipamiento, talento humano, sistemas de información, gestión del conocimiento y gestión de calidad. Estos resultados permitieron identificar brechas significativas en los laboratorios del país, señalando que muchos de ellos carecían de la capacidad necesaria para responder a emergencias sanitarias de gran escala, como la presentada por el COVID-19 en 2020. En este sentido, los resultados del análisis fueron decisivos para fundamentar la toma de decisiones y definir los objetivos del proyecto de investigación que se ejecutó, enfocados en fortalecer el Laboratorio Clínico del HUDN y mejorar su capacidad de respuesta ante la crisis pandémica.

Tabla 1. Análisis de semaforización del estado de los LSP

Laboratorio de Salud Pública	Densidad poblacional (miles de habitantes)	Sede propia		MISIONAL		Área m ²	CAPACIDADES BÁSICAS				Gestión del Conocimiento	Gestión de Calidad
		Si	No	Vigilancia en Salud Pública	Vigilancia Sanitaria		Infraestructura física	Equipamiento	Talento Humano	Sistemas de Información		
Bogotá	8381	x		Cumple	Cumple	5402,63	Ampliación	Insuficiente	Mayor que el promedio	Tiene	Publicación	Acreditado
Antioquia	6845		x	Cumple parcial	Cumple parcial	959,00	Construir nuevo	Insuficiente	Mayor que el promedio	Parcial	Publicación	No acreditado
Valle del Cauca	4853	x		Cumple	Cumple	3869,17	Adecuación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	Acreditado
Atlántico	2601	x		Cumple	Cumple	2183,00	Adecuación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Bolívar	2219	x		Cumple parcial	No cumple	318,31	Construir nuevo	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Boyacá	1287	x		Cumple parcial	Cumple parcial	823,89	Ampliación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	Publicación	No acreditado
Cauca	1437	x		Cumple parcial	No cumple	761,63	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Cesar	1090	x		Cumple parcial	Cumple parcial	1897,91	Suficiente	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Córdoba	1838	x		Cumple parcial	Cumple parcial	764,27	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Cundinamarca	2887	x		Cumple	Cumple	1021,92	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Huila	1225	x		Cumple parcial	Cumple	687,94	Ampliación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
La Guajira	1094	x		Cumple parcial	Cumple parcial	353,93	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Magdalena	1327	x		Cumple parcial	Cumple parcial	883,56	Adecuación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Meta	1054	x		Cumple	Cumple	958,52	Adecuación	Suficiente	Mayor que el promedio	Tiene	Publicación	No acreditado



Talaboratorio de Salud Pública	Densidad poblacional (miles de habitantes)	Sede propia		MISIONAL		Área m ² ACTUAL	CAPACIDADES BÁSICAS					Gestión de Calidad
		Si	No	Vigilancia en Salud Pública	Vigilancia Sanitaria		Infraestructura física	Equipamiento	Talento Humano	Sistemas de Información	Gestión del Conocimiento	
Nariño	1851	x		Cumple	Cumple	1755,50	Ampliación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	Acreditado
Norte de Brote: ocurrencia de dos o más casos de la misma enfermedad que coinciden en tiempo y lugar. (Botero-Rodríguez et al., 2020; Hernández-Aguado, 2012).	1413	x		Cumple	Cumple	1108,69	Adecuación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
	2110	x		Cumple parcial	Cumple parcial	1444,20	Adecuación	Suficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
	1427	x		Cumple parcial	Cumple parcial	1961,51	Adecuación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
	81	x		Cumple parcial	No cumple parcial	587,00	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Amazonas	276	x		Cumple	Cumple	876,25	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	Publicación	No acreditado
Arauca	998	x		Cumple	Cumple	354,57	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Caldas	509	x		Cumple parcial	Cumple parcial	930,20	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Caquetá	388	x		Cumple parcial	Cumple parcial	217,73	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Casanare	526	x		Cumple parcial	No cumple parcial	1189,38	Adecuación	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado

Laboratorio de Salud Pública	Densidad poblacional (miles de habitantes)	Sede propia		MISIONAL		Área m ²	CAPACIDADES BÁSICAS					Gestión de Calidad
		Si	No	Vigilancia en Salud Pública	Vigilancia Sanitaria		Infraestructura física	Equipamiento	Talento Humano	Sistemas de Información	Gestión del Conocimiento	
Guainía	45	x		Cumple parcial	No cumple	195,65	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Guaviare	119	x		Cumple parcial	No cumple	706,69	Adecuación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	Publicación	No acreditado
Putumayo	369	x		Cumple parcial	Cumple	133,65	Construir nuevo	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Quindío	582	x		Cumple parcial	Cumple	1018,18	Construir nuevo	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Risaralda	978	x		Cumple parcial	No cumple	767,01	Adecuación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
San Andrés	80	x		Cumple parcial	Cumple parcial	401,49	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Sucre	895	x		Cumple parcial	No cumple	301,07	Construir nuevo	Insuficiente	Mayor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Vaupés	46	x		No cumple	No cumple	606,07	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado
Vichada	81	x		Cumple parcial	Cumple	303,64	Ampliación	Insuficiente	Menor que el promedio	No tiene	No publicación	No acreditado

Fuente: Ministerio de Salud y Protección Social (2019).



La tabla 1 permite evidenciar que la mayoría de los LSP en el país no cumplían plenamente con los componentes misionales esenciales de Vigilancia en Salud Pública y Vigilancia Sanitaria (obsérvense las columnas en color rojo, las cuales corresponden a aspectos de incumplimiento). Esta deficiencia se agudizaba en el contexto departamental, donde era evidente la falta de capacidades básicas en infraestructura, equipamiento, personal capacitado, sistemas de información, gestión del conocimiento y calidad. Esta situación permitió destacar la vulnerabilidad del sistema de salud en momentos de crisis sanitaria, dado que sin estos elementos era difícil responder eficazmente a emergencias de gran magnitud como la pandemia de COVID-19.

A pesar de esta realidad general en el país, en el departamento de Nariño el HUDN ya contaba con un laboratorio actualizado y equipado para la toma y procesamiento de muestras, gracias a su infraestructura reciente y dotación de tecnología avanzada en diagnóstico molecular. Al momento de la formulación de la investigación, el HUDN disponía de tecnología pionera en PCR con sistemas como *FilmArray™* y *GeneXpert* (Johnson et al., 2021), lo que le permitía un diagnóstico más rápido y preciso en la identificación de patógenos como el SARS-CoV-2. Esta capacidad no solo beneficiaba a la población de Nariño, sino que también estaba a disposición de departamentos vecinos que dependían del HUDN para servicios de salud avanzados.

Este laboratorio fortalecido constituía un recurso importante para responder a la pandemia, lo que demostraba que la inversión en tecnología y en capacidades diagnósticas permite enfrentar con mayor efectividad los retos de salud pública. La posibilidad de procesar pruebas rápidas y de alta precisión desde el HUDN optimizaba los tiempos de diagnóstico, lo cual resultó ser una ayuda significativa para mitigar la propagación del virus y reducir sus efectos en la región y en áreas de influencia como Cauca y Putumayo.

Además del diagnóstico de capacidades tecnológicas, se efectuó un análisis detallado de la oferta de servicios de salud en el departamento, que reveló que al inicio de la pandemia Nariño contaba con aproximadamente 80 camas de UCI. Dado el porcentaje de ocupación típico para la época, estimado en un 8 % (2020), esto significaba que solo quedaban 15 camas disponibles, una situación crítica considerando el comportamiento estacional de las enfermedades respiratorias. Con el aumento acelerado de casos positivos de COVID-19 en Nariño, los modelos epidemiológicos indicaban que 10 nuevos pacientes requerirían ingreso en UCI diariamente. Con 20 camas aún disponibles en el HUDN, los nuevos pacientes ocuparían rápidamente la mitad de la capacidad, y en solo dos días, el aumento proyectado de casos

triplicaría la demanda y generaría 54 pacientes con necesidad de camas de UCI, un número que superaba ampliamente la capacidad existente y que derivaría en el colapso de los servicios en el HUDN.

Esta situación se replicaba en las instituciones prestadoras de salud (IPS) del departamento, y se agravó durante los picos de demanda generados en fechas de alta interacción social, como celebraciones, vacaciones y otros eventos especiales. Estas proyecciones precisaban la urgencia de contar con herramientas tecnológicas para anticipar y gestionar de manera efectiva los eventos mórbidos derivados de la pandemia. Dichas herramientas permitirían detectar patrones de contagio y monitorear la dinámica poblacional frente a eventos transmisibles de origen biológico. Sin embargo, al inicio de la pandemia, el HUDN aún no contaba con estas capacidades, lo que justificó la necesidad de fortalecer sus sistemas de análisis como parte esencial del proyecto de investigación, que al final se ejecutó.

Dado el contexto descrito, la propuesta de investigación se centró en fortalecer el laboratorio de diagnóstico de COVID-19 en el HUDN. Desde el inicio, se planificó una capacidad de procesamiento de hasta 50 pruebas diarias, que complementaría las 100 muestras diarias procesadas en el IDS, con lo que se lograría una capacidad conjunta de 150 muestras diarias en el departamento de Nariño para el diagnóstico precoz de COVID-19. Esta ampliación se implementó con éxito en los años 2021 y 2022, y a la fecha de edición de este documento (2026), se mantiene operativa, aunque los niveles de la pandemia han disminuido significativamente. Este fortalecimiento del laboratorio del HUDN, más allá de atender la emergencia presentada, ha dejado al hospital con una capacidad de respuesta sólida ante futuras crisis de salud pública similares.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN TIEMPOS DE PANDEMIA

Entre el 2020 y el 2022, se formuló y ejecutó el proyecto denominado “MLABNARIÑO”. Este proyecto representó un esfuerzo significativo para fortalecer el control y la vigilancia de eventos de salud pública desde el HUDN, con el respaldo de entidades como la UNAD, el IDSN y la Gobernación de Nariño. Durante la pandemia, estos actores identificaron varios factores sociales que limitaban la efectividad de la vigilancia epidemiológica, algunos de los cuales persisten hasta hoy.

Los desafíos más destacados incluyeron el acceso limitado al procesamiento y diagnóstico oportuno de casos, especialmente aquellos de origen transmisible, debido a la escasez de servicios de diagnóstico acreditados. Además, las condiciones ecológicas y sociales favorecieron la aparición de infecciones emergentes, lo que representaba una amenaza mayor para las poblaciones vulnerables y de difícil acceso en regiones con geografía compleja, como el departamento de Nariño. Estas limitaciones incidieron negativamente en los indicadores de morbilidad y mortalidad de la región. No obstante, como todo desafío puede suponer una oportunidad, este proyecto buscó contribuir con ciencia y tecnología para abordar las necesidades de salud pública identificadas.

Con el desafío latente y el temor de que la situación se complicara aún más, se consideró imperativo y urgente fortalecer la capacidad diagnóstica local para garantizar intervenciones y tratamientos oportunos. En el contexto de una pandemia, esta acción se volvió de suma importancia para controlar de manera efectiva infecciones de alto riesgo para la salud pública. Como parte de este esfuerzo, se propusieron plataformas de análisis mediante la integración de IA y aprendizaje automático (*machine learning*) para optimizar la recolección, transferencia y análisis de datos sobre contactos asintomáticos y poblaciones en riesgo. Este enfoque tecnológico se orientó para que sirviera como una herramienta efectiva en la toma de decisiones, así como para impulsar el desarrollo científico en la región, fortaleciendo la infraestructura del departamento.

Durante la pandemia de COVID-19, la expansión de la capacidad instalada en detección molecular fue fundamental para controlar los contagios. El diagnóstico temprano facilitó la implementación de estrategias de intervención en áreas con alta circulación del virus, resaltando la necesidad de herramientas diagnósticas locales que permitieran una respuesta rápida en Nariño. La integración de tecnologías para la sistematización de la información y el uso de modelos de *machine learning* buscaron apoyar continuamente al HUDN en su labor social de mitigar el virus; inicialmente, se apoyó en la sistematización de la información de los pacientes contagiados y, luego, en el análisis de sus contactos, con el fin de evaluar la posibilidad de complicaciones. Este proceso se apoyó en un equipo humano, compuesto por enfermeras, profesionales de la salud y estudiantes de programas de salud, quienes de manera articulada llamaban a los contactos de las personas contagiadas para hacer seguimiento efectivo y mitigar el riesgo de expansión del virus. Este análisis detallado contribuyó directamente a mitigar las complejidades que la pandemia trajo consigo. Así, el HUDN, a través de esta investigación, sentó las bases para que

el departamento de Nariño enfrentara los retos de salud pública, reduciendo el impacto de eventos críticos en la región y fortaleciendo su resiliencia ante futuras crisis sanitarias.

Una situación apremiante que también justificó la investigación y que permitió identificar la necesidad de abordar la situación desde un enfoque integral fue el análisis de la relación entre la población migrante y el aumento de enfermedades infecciosas en Pasto en los años previos a la pandemia. Este análisis reveló una correlación significativa entre los flujos migratorios y la incidencia de enfermedades respiratorias agudas (Organización Panamericana de Salud, 2020a), lo que alertó sobre un problema de salud pública que iba más allá del COVID-19 e incluía otras infecciones tropicales como malaria, dengue y zika, además de infecciones transmitidas por alimentos, como la leptospirosis. Esta alta prevalencia reflejaba la vulnerabilidad de la región y la necesidad de implementar estrategias de control específicas para la población migrante y desplazada, que presenta un mayor riesgo de contagio y una mayor complejidad en el manejo de brotes. Así, la solución planteada y ejecutada a través del proyecto fue especialmente adecuada para abordar este riesgo adicional que se había identificado previamente.

Como resultado de los estudios mencionados y con el apoyo del HUDN, la UNAD y otros cooperantes de la alianza, el proyecto siempre buscó ayudar a que el departamento de Nariño se fortaleciera en su infraestructura diagnóstica, lo cual le permitiría enfrentar la pandemia y futuros brotes, partiendo desde la capacidad que ofrece el HUDN, que es un hospital público y de alta complejidad al servicio de la región.

Es importante mencionar que esta investigación propició la creación de alianzas y redes de conocimiento en salud y tecnología que se alinearon para ayudar a mejorar los sistemas de procesamiento y análisis de muestras, con el fin de incrementar la capacidad diagnóstica en la región. La incorporación de tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial (4RI), como el internet de las cosas (IoT) y la IA, permitió evidenciar que es posible proponer soluciones que ayuden a la prevención, mitigación y monitoreo de infecciones de alto riesgo en la población.

Además, el HUDN, en colaboración con la UNAD, fortaleció sus líneas de investigación, lo que facilitó la creación de metodologías y procesos para el análisis de datos epidemiológicos. Esto permitió que la información adquirida se valorara como un recurso importante, proporcionando un análisis detallado que identifica patrones, variables y factores de riesgo. Si se explotan adecuadamente con técnicas de IA y aprendizaje automático, estos análisis permitirán gestionar de manera más efectiva los riesgos de contagio en la región.

Por otro lado, el análisis y seguimiento de genomas completos de COVID-19 realizado en el HUDN, incluyendo la identificación de posibles nuevas cepas, ha aportado y continuará proporcionando conocimiento esencial para la preparación ante futuras emergencias sanitarias (Meites et al., 2023). La colaboración entre instituciones de salud y la academia, con un enfoque en ciencia, tecnología e innovación, ha sido una experiencia de aprendizaje exitosa, que demuestra que es posible avanzar en la construcción de una plataforma diagnóstica robusta. Esta plataforma, destinada al procesamiento de pruebas RT-PCR y al análisis de epidemiología molecular, se ha complementado con aplicaciones de IoT e IA que se han dirigido a que, en su implementación, procuren optimizar los servicios de salud en la región y permitan una toma de decisiones rápida y precisa.

El proyecto ejecutado no solo buscó contribuir al desarrollo regional, sino que también ha propendido por fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas en Nariño, con el fin de preparar al departamento para enfrentar futuros brotes de manera oportuna y efectiva. Las mejoras en la infraestructura del Laboratorio Clínico del HUDN, junto con la implementación de soluciones IoT y un sistema de monitoreo de datos que sistematizó los casos iniciales de COVID-19 en Nariño, contribuyeron a fortalecer el sistema de salud pública, para que este sea más resiliente. Casi dos años después de finalizado el proyecto, es evidente que esta preparación ha sido un avance significativo para el HUDN y se espera que también lo haya sido para la región; ahora el reto es continuar con estos procesos y hacer de lo realizado un modelo integral de respuesta a crisis sanitarias que refuerce la innovación, la ciencia y el bienestar comunitario en el presente y para el futuro.

OBJETIVOS DE MLABNARIÑO PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LA PANDEMIA

En el contexto geográfico y social del departamento de Nariño, una región fronteriza con un alto flujo migratorio y comercial, el fortalecimiento de las capacidades en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) ha sido y sigue siendo una estrategia vital

para abordar los desafíos de salud pública, especialmente aquellos derivados de agentes biológicos de alto riesgo. Aunque estas amenazas no han desaparecido, actualmente se encuentran mejor controladas. Este enfoque fue prioritario desde el inicio del proyecto, debido a la cercanía con Ecuador y al constante movimiento de personas, lo cual incrementa el riesgo de propagación de enfermedades infecciosas. La pandemia de COVID-19, en particular, demostró la vulnerabilidad de la región, ya que Nariño reportó un número significativo de casos importados desde áreas fronterizas.

Por lo anterior, el equipo investigativo de la alianza analizó que, dadas las condiciones demográficas y geográficas de Nariño, la solución inmediata y efectiva era el fortalecimiento del Laboratorio Clínico en el HUDN. Este laboratorio debía contar con capacidades tecnológicas avanzadas para diagnóstico y vigilancia, de modo que se convirtiera en una alternativa eficaz y viable para enfrentar situaciones de emergencia sanitaria. El fortalecimiento propuesto contemplaba la creación de un laboratorio con bioseguridad de nivel BSL-2, equipado con tecnología de punta para la realización de pruebas RT-PCR (Hernández-Rangel et al., 2020). Esta infraestructura permitiría reducir de manera significativa los tiempos de respuesta en la detección y control de agentes biológicos de alto riesgo.

Además, este enfoque posibilitaría una detección temprana de infecciones, lo que mejoraría la capacidad del sistema de salud de la región para responder a emergencias sanitarias sin la dependencia de servicios externos. En este sentido, se planteó como un fin en el desarrollo del proyecto la creación de un sistema que permitiera una intervención rápida y eficaz ante brotes epidemiológicos, con el fin de proteger a la población local y minimizar el impacto de futuras crisis sanitarias.

Para la formulación de los objetivos, se consideró que el desarrollo y fortalecimiento del laboratorio debía ir acompañado de la implementación de un sistema de monitoreo integral en el HUDN. Este sistema debía integrar herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI), en particular elementos de internet de las cosas (IoT) e IA, para el análisis y procesamiento de datos. Con ello, se buscaba proporcionar tanto al personal de salud del HUDN como a las autoridades de control un mecanismo para realizar un seguimiento de los eventos de interés en salud pública.

Este enfoque inicial se centró en fortalecer las capacidades locales de vigilancia epidemiológica, lo que permitió un control más efectivo de infecciones emergentes y mejoró la capacidad de respuesta ante cualquier brote que pudiera originarse en el departamento.

Por lo anterior, en la investigación se planteó y ejecutó el siguiente objetivo general: “Mejorar las capacidades en CTel del Hospital Universitario Departamental de Nariño para atender problemáticas asociadas con agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana”.

Donde se estableció que, para poder lograrlo, se debían desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- mejorar la infraestructura del área de RT-PCR del Laboratorio Clínico del HUDN para el procesamiento de muestras y la detección de agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana;
- prestar servicios científicos y tecnológicos para el procesamiento de pruebas RT-PCR para el diagnóstico temprano de eventos de interés en salud pública de alto impacto;
- fortalecer el programa de vigilancia y monitoreo que permita el reporte de información y control sobre eventos de interés en salud pública ocasionados por agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana.

Los objetivos planteados se fundamentaron en la premisa de que, con la implementación de un laboratorio BSL2 en el HUDN, el departamento de Nariño estaría mejor preparado para enfrentar tanto amenazas biológicas emergentes como preexistentes, como la pandemia de COVID-19 que se vivía en ese momento.

Se proyectaba que esta mejora en infraestructura y capacidad de diagnóstico reduciría significativamente la dependencia de servicios externos, lo que permitiría una respuesta sanitaria más rápida y adecuada para la región. Este objetivo se alcanzó exitosamente: en la actualidad, el departamento cuenta con un laboratorio fortalecido en el HUDN, que brinda servicio a la comunidad de Nariño y a los departamentos vecinos.

Sin embargo, la labor no ha concluido. La sostenibilidad del sistema de salud y la capacidad de respuesta frente a nuevas amenazas requieren una evaluación y renovación constantes de los procesos. Los desafíos surgidos en 2020 deben servir como alerta y recordatorio para que entidades como el HUDN permanezcan en una continua revisión de sus protocolos y capacidades y se preparen para hacer frente a futuras crisis de salud pública.

Casi cuatro años después del inicio de la pandemia, el proyecto ejecutado en el Hospital Universitario Departamental de Nariño ha demostrado ser una solución que ayudó de manera decidida durante la pandemia y que soluciones como la planteada y ejecutada pueden servir de apoyo ante los complejos desafíos de salud pública en la región.

La iniciativa buscó enfrentar los riesgos asociados a la ubicación geográfica de Nariño como región fronteriza, caracterizada por un flujo constante de migrantes y una alta densidad de población transitoria, factores que incrementan la exposición a enfermedades infecciosas y otros agentes biológicos de alto riesgo.

La implementación de un laboratorio avanzado con nivel de bioseguridad BSL2 en el HUDN ha fortalecido de manera significativa la capacidad diagnóstica y de monitoreo en el departamento de Nariño. Este laboratorio ha disminuido la dependencia de servicios externos, lo que ha permitido diagnósticos rápidos y confiables, esenciales para una respuesta oportuna ante brotes epidémicos y otras amenazas sanitarias en la región. Además, el laboratorio se ha consolidado como un recurso crítico no solo para la comunidad de Nariño, sino también para los departamentos vecinos, y ha mejorado la resiliencia y preparación regional en términos de salud pública. Esta consolidación posiciona al HUDN como un centro de referencia en investigación y respuesta a emergencias sanitarias.

En el siguiente capítulo, se abordará la metodología utilizada para ejecutar este proyecto y los elementos que se consideraron para alcanzar los objetivos establecidos. A través de esta revisión metodológica, se explorarán las herramientas, procesos y decisiones técnicas implementadas para materializar esta respuesta sanitaria y científica, con el fin de fortalecer la infraestructura de salud en Nariño.

METODOLOGÍA Y ELEMENTOS IMPORTANTES PARA EL LOGRO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Este capítulo describe los procesos metodológicos implementados en el proyecto desarrollado en el HUDN, orientado a fortalecer las capacidades en CTel para enfrentar desafíos de salud pública relacionados con agentes biológicos de alto riesgo. En esta parte del libro se espera que el lector identifique cada etapa del proyecto, desde la planificación y definición del diseño del estudio hasta los aspectos técnicos, logísticos y éticos que guiaron su implementación.

El objetivo de este capítulo, previo a la presentación de los resultados, es proporcionar una visión exhaustiva de los métodos, técnicas y procesos aplicados que permitieron cumplir con los objetivos de investigación. Además, se relacionan los criterios éticos, los recursos utilizados y la colaboración interinstitucional que hizo posible la ejecución del proyecto. Esta revisión metodológica busca ofrecer una comprensión de la estructura del proyecto, así como de los procedimientos que garantizaron tanto la precisión como la validez de los resultados obtenidos.

TIPO DE INVESTIGACIÓN, POBLACIÓN Y FUENTES DE LOS DATOS

Esta etapa fue resultado de intensas discusiones entre los miembros del equipo investigador, quienes aportaron sus experiencias y conocimientos para definir el enfoque metodológico del proyecto. Así, se estableció un estudio de carácter cuantitativo, correlacional y longitudinal,

orientado a analizar fenómenos infecciosos, como la pandemia de COVID-19, mediante una metodología que permitiera evaluar patrones y causas de contagio.

El enfoque cuantitativo incluyó el uso de estadísticas y herramientas analíticas para medir la incidencia y distribución de enfermedades infecciosas en la población, así como para cuantificar el impacto de variables críticas relacionadas con la transmisión del virus. El análisis correlacional, por su parte, permitió explorar las relaciones entre diferentes variables, tales como antecedentes clínicos, sintomatología y características demográficas, con el fin de anticipar situaciones complejas que pudieran surgir de las infecciones. Este análisis fue esencial para prever comportamientos epidemiológicos que pudieran poner en riesgo la salud pública.

El diseño longitudinal se empleó para documentar y analizar los cambios a lo largo del tiempo, mediante la recolección de datos en momentos específicos del desarrollo epidemiológico. Esto incluyó tanto periodos de alta transmisión (picos) como momentos de baja incidencia, lo que permitió obtener un panorama detallado de la evolución de los contagios y de la efectividad de las intervenciones implementadas. Esta estructura longitudinal también permitió hacer análisis y predicciones sobre el comportamiento de la pandemia si no se actuaba con prontitud, y facilitó la adaptación de las estrategias de salud pública conforme avanzaba la emergencia sanitaria.

La población objetivo del estudio estuvo compuesta por pacientes del HUDN y personas que acudieron a este centro hospitalario con síntomas o sospechas de eventos de salud pública, principalmente aquellos vinculados a enfermedades infecciosas de alto riesgo como el COVID-19. La selección de participantes incluyó a quienes requerían pruebas RT-PCR para confirmación de diagnóstico, y sus datos se registraron en el sistema de vigilancia epidemiológica SIVIGILA, así como en un sistema informático específico desarrollado para el proyecto. Este sistema, además de registrar la información habitual de SIVIGILA, permitió la recolección de datos adicionales para la construcción de cercos epidemiológicos, lo que facilitó un seguimiento efectivo y la posibilidad de intervenir con celeridad ante posibles focos de contagio; en este proceso fue vital el equipo humano vinculado al proyecto.

El diseño del muestreo abarcó una población representativa de personas en riesgo, incluyendo pacientes remitidos desde otras instituciones de salud y personas con antecedentes epidemiológicos relevantes, tales como contactos estrechos con casos confirmados de COVID-19 o con síntomas compatibles. A lo largo del proyecto, se realizaron más de 22 000 pruebas RT-PCR, de las cuales aproximadamente 2600 resultaron positivas para COVID-19. Esta cobertura significativa fue reforzada con

un seguimiento detallado del cerco epidemiológico de los pacientes contagiados, que fue llevado a cabo por un equipo de salud pública del HUDN e incluyó médicos, enfermeras, estudiantes y personal administrativo, así como personal contratado específicamente para el proyecto. La colaboración de este equipo permitió responder de manera efectiva a la emergencia sanitaria en la región y contribuyó al control de la propagación del virus en Pasto y el departamento de Nariño.

Criterios de inclusión y exclusión de la población del estudio

Para definir los criterios de inclusión y exclusión de la población en el proyecto, se establecieron lineamientos que aseguraran que los datos recopilados fueran precisos, relevantes y alineados con los objetivos del proyecto ejecutado. Se incluyeron pacientes con signos y síntomas compatibles con enfermedades infecciosas de interés en salud pública, aquellos que requerían pruebas RT-PCR como método confirmatorio y quienes habían sido notificados en el sistema SIVIGILA como casos sospechosos o probables. También se incluyeron pacientes remitidos de otras instituciones y aquellos con antecedentes epidemiológicos relevantes. Todos los participantes, más de 22 000 personas, firmaron un consentimiento informado y fueron notificados de manera clara sobre el propósito de la investigación y su aporte al proyecto.

Es destacable que todos los pacientes seleccionados aceptaron voluntariamente formar parte del proyecto, lo cual permitió lograr una cobertura completa del 100% de los pacientes que acudieron al HUDN para pruebas de laboratorio por sospecha de COVID-19 durante el periodo de 2020 a 2022.

Fuentes de información utilizadas

Para asegurar una recopilación exhaustiva y precisa de los datos, el proyecto empleó diversas fuentes de información, las cuales se clasificaron de la siguiente manera.

Fuentes primarias

Incluyeron los resultados de pruebas de laboratorio (PCR-RT), historias clínicas y fichas epidemiológicas de notificación. Estos documentos proporcionaron datos descriptivos sobre el estado de salud de los pacientes, su evolución clínica y las características epidemiológicas necesarias para el análisis del cerco de contagio.

Fuentes secundarias

Comprendieron revisiones bibliográficas, reportes de organismos internacionales como la OMS y el Instituto Nacional de Salud (INS), así como asesorías de expertos en salud pública y enfermedades infecciosas. Estas fuentes complementaron el contexto del estudio y fortalecieron el análisis de los datos recolectados, ofreciendo una visión más amplia de las prácticas y protocolos de vigilancia epidemiológica relevantes en el contexto de la pandemia.

Estas fuentes permitieron obtener una visión holística y fundamentada de la situación, lo que facilitó una toma de decisiones basada en evidencias y con respaldo de instituciones y estudios reconocidos en el ámbito de la salud pública global.

Es fundamental destacar que durante el procesamiento de datos se implementaron medidas rigurosas para mitigar errores y reducir posibles sesgos en cada etapa del análisis. En las pruebas de laboratorio RT-PCR, se desarrollaron y aplicaron protocolos específicos para identificar y corregir falsos positivos y negativos, asegurando la máxima precisión en los resultados diagnósticos. Asimismo, se establecieron procedimientos estrictos para verificar la validez y especificidad de los datos obtenidos, lo que contribuyó a una interpretación precisa de los patrones epidemiológicos.

Además, los sistemas informáticos y las bases de datos desarrolladas se sometieron a un proceso exhaustivo de pruebas de validación. En el diseño de los conjuntos de datos (*datasets*) y los modelos de *machine learning* aplicados, se incorporaron técnicas de limpieza y procesamiento para reducir el impacto de datos incompletos o inconsistentes. Estos modelos fueron ajustados y validados periódicamente mediante métodos de control cruzado y métricas de precisión específicas, optimizando así la confiabilidad de los resultados y las predicciones generadas. En conjunto, estas acciones contribuyeron a un marco robusto y preciso de análisis, esencial para guiar decisiones informadas y eficaces en salud pública durante y después de la pandemia.

PLAN DE ACTIVIDADES PARA EL LOGRO DE LOS OBJETIVOS DE MLABNARIÑO

Para alcanzar los objetivos específicos de la investigación ejecutada, se diseñó un plan de actividades estratégicas que facilitó la obtención de los resultados esperados. Este plan de trabajo se desarrolló y ejecutó de manera rigurosa, no solo para abordar la emergencia sanitaria generada por la pandemia, sino también para cumplir con los requisitos de la convocatoria que financió el proyecto. A continuación, se presenta un resumen de las actividades realizadas y los logros alcanzados para cada objetivo (véase la tabla 2).

Tabla 2. *Resumen del Plan de Actividades del proyecto MlabNariño*

Objetivo Específico	Actividades Ejecutadas	Resultados Alcanzados
Mejorar la infraestructura del área de RT-PCR del Laboratorio Clínico del HUDN	- Compra e instalación de equipos especializados: Adquisición de cabinas de bioseguridad y ultracongeladores para el manejo seguro de muestras infecciosas y realización de pruebas moleculares. - Adecuación de infraestructura con nivel BSL2+: Implementación de sistemas de presión negativa y espacios seguros para el manejo de muestras. - Dotación de insumos y reactivos: Equipamiento con elementos de protección, reactivos y kits específicos para procesamiento.	Incremento significativo en la capacidad de procesamiento del laboratorio, permitiendo atender a más de 22 000 personas mediante pruebas RT-PCR confiables. El HUDN se consolidó como un referente regional en diagnóstico seguro y eficiente.

Objetivo Específico	Actividades Ejecutadas	Resultados Alcanzados
Prestar servicios científicos y tecnológicos para el procesamiento de pruebas RT-PCR	- Desarrollo de una aplicación informática basada en <i>machine learning</i>: Creación de un sistema informático con la metodología RAD (<i>rapid app development</i>: ‘desarrollo rápido de aplicaciones’) para el análisis de datos en tiempo real y la identificación de patrones de transmisión. - Establecimiento de protocolos de bioseguridad: Diseño de procedimientos para el uso de equipos de protección y manejo seguro de muestras. - Capacitación especializada del personal: Formación en el uso de pruebas RT-PCR y en el sistema informático.	Aumento en la precisión y eficiencia en el diagnóstico de COVID-19 y otros patógenos de alto riesgo. El HUDN identificó y dio seguimiento a más de 2600 casos positivos, permitiendo un monitoreo controlado y detallado de los pacientes infectados.
Fortalecer el Programa de Vigilancia y Monitoreo para el Reporte y Control de Eventos de Interés en Salud Pública	- Identificación y seguimiento de casos a través de SIVIGILA: Implementación de protocolos de vigilancia activa y pasiva para el monitoreo continuo. - Desarrollo de algoritmos de <i>machine learning</i> para la predicción de patrones: Aplicación de modelos de redes neuronales y redes bayesianas para la predicción de la evolución de contagios. - Implementación de un sistema de reportes para alertas tempranas: Generación de reportes automatizados para detectar picos de contagio.	Establecimiento de un sistema de vigilancia epidemiológica que permitió la identificación y seguimiento de más de 2608 personas infectadas. Este sistema facilitó una respuesta rápida y la contención de contagios, apoyando la toma de decisiones en salud pública de la región, desde la atención de los casos en el HUDN.

Fuente: elaboración propia.



La tabla 2 ofrece una visión detallada y estructurada de los objetivos específicos del proyecto, las actividades estratégicas que se llevaron a cabo para cada uno y los resultados alcanzados, y destaca el impacto positivo en el fortalecimiento de la capacidad de respuesta del HUDN frente a la emergencia sanitaria.

Cada actividad ha sido diseñada y ejecutada con precisión, alineándose con los objetivos de mejora en infraestructura, prestación de servicios diagnósticos avanzados y establecimiento de un sistema de vigilancia y monitoreo epidemiológico efectivo. Los resultados obtenidos demuestran avances significativos en términos de capacidad instalada, diagnóstico seguro y eficiente, y un sistema robusto de vigilancia epidemiológica, el cual permitió la identificación y seguimiento de miles de casos en la región.

En resumen, la tabla 2 permite visualizar cómo, a través de actividades estratégicas y colaborativas, el proyecto ha logrado mejorar la infraestructura y las capacidades diagnósticas del HUDN, y optimiza su preparación para enfrentar no solo la pandemia de COVID-19, sino también otras amenazas de salud pública en el futuro. Esta planificación y ejecución meticulosa del proyecto fortalece la resiliencia del sistema de salud en el departamento de Nariño, marcando un precedente para iniciativas futuras en ciencia, tecnología e innovación orientadas a la salud pública.

TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN Y CONSIDERACIONES ÉTICAS

El inicio de la pandemia trajo consigo una atmósfera de incertidumbre y una inquietud generalizada, particularmente en regiones como Nariño, donde los sistemas de salud enfrentaban desafíos adicionales debido a limitaciones en infraestructura y recursos. Ante este contexto, la alianza entre el HUDN, la academia y el gobierno fue fundamental para establecer estrategias que respondieran con rapidez y eficacia a los riesgos que planteaba el COVID-19, un virus aún desconocido en sus primeras etapas. La formulación del proyecto estuvo cargada de dudas inherentes a la novedad y agresividad del virus, pero también de expectativas y de un compromiso inquebrantable por mitigar el impacto de la pandemia. Hoy, al reflexionar sobre los logros obtenidos a través de este proyecto, se confirma que las decisiones y estrategias implementadas lograron un impacto positivo y que se espera que sean un referente para continuar fortaleciendo la salud pública regional y nacional. Esta experiencia no solo mostró la vulnerabilidad de la humanidad ante crisis sanitarias,

sino también la importancia de la colaboración interinstitucional para hacer frente a emergencias de esta magnitud.

En esta sección, se presentan los instrumentos y técnicas de recolección de información empleados en el proyecto, tal como se describe en la tabla 3. Cada técnica se seleccionó con el propósito de fortalecer la capacidad del HUDN en el diagnóstico y monitoreo de agentes biológicos de alto riesgo, lo que permitió una respuesta efectiva en situaciones de alto riesgo epidemiológico. Para garantizar la calidad y protección de los datos recopilados, se optó por métodos con un enfoque centrado en analítica de datos, lo que facilitó un análisis oportuno y permitió comprender e identificar patrones de contagio. La combinación de estas herramientas y técnicas ayudó en la precisión de la recolección de datos, así como también facilitó la interpretación de estos en un contexto de toma de decisiones.

Además, el proyecto adoptó un enfoque ético riguroso en cada etapa, respetando la privacidad de los pacientes y aplicando altos estándares en el tratamiento de la información sensible. Es importante mencionar que, como requisito para la presentación del proyecto ante MinCiencias, este se sometió a los comités de ética de la UNAD y del HUDN, y con el aval de estos se pudo avanzar en el desarrollo del proceso de captura y manejo de los datos, donde en ningún momento se expuso información de las personas participantes. Adicional a lo anterior, se debe mencionar que el equipo de investigación aplicó protocolos de seguridad y confidencialidad de datos, especialmente en lo referente al manejo de información epidemiológica. Estas medidas éticas fueron fundamentales para ganar la confianza de la comunidad, y aseguraron que el manejo de datos se realizara con responsabilidad y en beneficio de la salud pública. Esta combinación de innovación, ética y colaboración evidenció que se podía avanzar con una estrategia que ayudara en la lucha contra el COVID-19 y estableció un modelo de acción que puede replicarse en futuras crisis sanitarias.

Tabla 3. *Instrumentos de recolección de información aplicados en Mlab*

Técnica	Herramienta	Descripción	Aplicación
Diseño de instrumentos de Datos Epidemiológicos Complementarios	Instrumento de recolección de datos	Instrumento diseñado por el equipo de investigación para registrar información epidemiológica y clínica detallada de los pacientes, incluyendo antecedentes, síntomas, tratamientos, complicaciones y resultados de hospitalización. Estos datos fueron fundamentales para alimentar el sistema de información del proyecto.	Permitió el seguimiento integral de cada paciente y facilitó la toma de decisiones clínicas, además de proporcionar datos necesarios para el análisis epidemiológico y predictivo del proyecto.
Reporte de resultados de pruebas Diagnósticas	LAB-CORE	Sistema que integró resultados de pruebas diagnósticas con las historias clínicas de los pacientes atendidos en el HUDN. Este flujo continuo de información fue esencial para el análisis de datos y aplicación posterior de modelos de <i>machine learning</i> .	Proporcionó un acceso rápido y actualizado a los resultados diagnósticos, mejorando la eficiencia y precisión en el manejo de cada caso y la vigilancia epidemiológica.
Ficha de Notificación SIVIGILA	Sistema de vigilancia nacional	Instrumento normado por el INS, utilizado para capturar datos sociodemográficos y clínicos, y vincularlos con el sistema nacional de vigilancia epidemiológica. Esta ficha facilitó el monitoreo continuo de eventos en salud pública.	Permitió la comparación y validación de los resultados de la investigación con datos nacionales, fortaleciendo el control epidemiológico en la región.

Técnica	Herramienta	Descripción	Aplicación
Conjunto de datos para los modelos de <i>machine learning</i> (<i>Dataset</i>)	<i>Dataset</i> en formato CSV	Conjuntos de datos específicos generados por cada instrumento, incluyendo información sobre historias clínicas, evolución del agente infeccioso, diagnósticos previos y características epidemiológicas.	Estos <i>datasets</i> estructurados facilitaron el análisis automatizado y permitieron la creación de algoritmos predictivos sobre el comportamiento de infecciones y la evolución de contagios.
Aplicación de <i>machine learning</i>	Modelos de redes neuronales y redes bayesianas	Implementación de modelos de <i>machine learning</i> para analizar patrones y predecir el comportamiento del virus en los pacientes. Incluyó una aplicación predictiva de posibles complicaciones y evolución del contagio, teniendo la base de los datos recolectados.	Ayudó en el análisis avanzado de datos y permitió conocer posibles complicaciones en la salud de los pacientes, buscando que a futuro se puedan mejorar las respuestas y estrategias en salud pública.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 3 ofrece una visión detallada de las técnicas y herramientas empleadas, evidenciando la contribución de cada una al análisis, diagnóstico y monitoreo en el contexto de la pandemia, y fortaleciendo la capacidad de respuesta del HUDN junto con el avance en la investigación científica en salud pública. En este marco, el proyecto ejecutado integró herramientas diagnósticas, tecnología de captura y análisis de datos en una estructura diseñada para facilitar una toma de decisiones informada y precisa.

El eje central de la investigación radicó en la sinergia entre los equipos de diagnóstico, como los dispositivos PCR-LT (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021), y



herramientas informáticas específicamente diseñadas para capturar y procesar los datos de los pacientes. A través de este sistema, se integraron varios instrumentos de recolección de datos en una única plataforma que permitía categorizar, almacenar y analizar grandes volúmenes de información. Los *datasets* creados para el análisis epidemiológico permitieron aplicar modelos de *machine learning* que propendían a mejorar la capacidad predictiva del proyecto, e identificaban patrones de contagio y posibles complicaciones clínicas.

Un aspecto importante en el desarrollo y éxito del proyecto fue la dedicación del equipo humano multidisciplinario que lo llevó a cabo. Conformado por enfermeras, epidemiólogos, médicos, bacteriólogos, ingenieros y estudiantes de programas de salud, entre otros, este equipo combinó sus conocimientos y habilidades para implementar la iniciativa de manera efectiva. Su colaboración demostró el valor del trabajo interdisciplinario en el desarrollo de soluciones integrales para desafíos de salud pública, lo que aseguró que cada fase del proyecto, desde el diseño de protocolos hasta la aplicación de técnicas avanzadas de análisis, se ejecutara con un enfoque preciso y efectivo.

Este esfuerzo colectivo no solo fortaleció la infraestructura sanitaria y tecnológica del HUDN, sino que también estableció un modelo de referencia para futuras iniciativas de salud pública en el contexto de agentes biológicos de alto riesgo, y creó una base que puede servir de referencia para responder a futuros brotes o pandemias en la región y el país.

ARMONIZACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA EL LOGRO DE LOS RESULTADOS

La implementación del proyecto comenzó con la optimización del Laboratorio Clínico del HUDN, asegurando que la infraestructura cumpliera con los estándares de bioseguridad BSL2+. Esto implicó la adecuación de áreas especializadas para la toma, recepción y procesamiento de muestras infecciosas, con espacios seguros que minimizaban el riesgo de contagio y contaminación. Además, se adquirieron insumos y equipos específicos, incluidos sistemas avanzados para el procesamiento de pruebas PCR-LT (Souto et al., 2003), fundamentales para la detección precisa y el monitoreo de agentes infecciosos transmisibles, lo que garantizó el cumplimiento de los criterios establecidos en el estudio.

De forma paralela al fortalecimiento físico del laboratorio, el equipo de investigación se centró en desarrollar aplicaciones informáticas complementarias destinadas

a la captura, seguimiento y análisis de datos de los pacientes con COVID-19 en el HUDN. Estas aplicaciones se crearon utilizando la metodología de Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD) (Castro et al., 2011), la cual permitió un desarrollo modular, con evaluaciones y ajustes continuos que facilitaban adaptaciones rápidas ante las necesidades emergentes del proyecto. Este enfoque ágil aseguraba que cada versión del *software* respondiera eficientemente a los cambios en los requisitos del proyecto, maximizando la utilidad y precisión de los datos recopilados.

A medida que se acumulaba un volumen adecuado de información, se implementaron técnicas de *machine learning*, como redes neuronales y redes bayesianas (Rodríguez-Toro et al., 2011). Estos algoritmos se diseñaron para identificar patrones y variables importantes en la evolución de la infección, lo cual permitió un análisis exhaustivo de los datos. Esta combinación de metodologías no solo facilitó el análisis de los contagios y su evolución, sino que también posibilitó la creación de modelos predictivos. Estos modelos aportaron un enfoque proactivo, ofreciendo una perspectiva sobre la dinámica de la infección que permitió desarrollar una primera versión de una aplicación que buscaba identificar si un paciente se podría complicar o no, según sus síntomas y datos complementarios, con lo cual se buscó posicionar al HUDN como un centro líder en la región para el control y estudio de enfermedades infecciosas.

La garantía de calidad fue un componente central en el desarrollo del proyecto, establecida a través de procedimientos estandarizados para la toma de muestras, la implementación rigurosa de sistemas de bioseguridad y el llenado meticuloso de instrumentos de recolección de datos. Se diseñaron y aplicaron flujos de trabajo específicos para la búsqueda activa y pasiva de casos, lo que aseguraba tanto la precisión como la consistencia en los datos obtenidos. Instrumentos clave, como la ficha de notificación SIVIGILA y los registros de datos epidemiológicos, se actualizaron en tiempo real, lo que proporcionaba una base de datos sólida para la creación de *datasets* específicos que alimentarían los modelos de *machine learning*.

Antes de la aplicación de los modelos, cada conjunto de datos pasaba por un riguroso proceso de verificación que garantizaba la calidad y la integridad de las variables recopiladas, asegurando así que la información empleada fuera completa y confiable. Esta validación inicial fue fundamental para evitar sesgos y asegurar que el análisis de los datos se basara en información precisa.

La integración de los resultados de las pruebas diagnósticas en el sistema informático se realizó mediante algoritmos de filtrado automatizados que excluían los casos

descartados, lo que permitió un enfoque directo en aquellos casos con relevancia epidemiológica. Este procesamiento automatizado facilitó la detección de asociaciones causales entre diferentes variables, lo que fortaleció el análisis en profundidad y mejoró la toma de decisiones en el marco de la vigilancia epidemiológica. La consolidación de esta información generó una herramienta para el análisis de datos, cuyo fin fue utilizarse en el HUDN para el análisis del comportamiento de la infección, contribuyendo de manera decisiva a la mitigación de los efectos de la pandemia en la región.

CONSIDERACIONES ÉTICAS EN EL PROYECTO MLABNARIÑO

El proyecto desarrollado en el HUDN se ejecutó siguiendo lineamientos éticos rigurosos, garantizando el respeto absoluto de los derechos y el bienestar de todos los participantes. Las pruebas de laboratorio y demás procedimientos aplicados no presentaron riesgos para los pacientes, ya que se emplearon únicamente métodos no invasivos, asegurando que la integridad física y mental de los involucrados no se viera comprometida.

El proyecto cumplió con la normativa colombiana vigente en investigación en salud, en particular con la Resolución 8430 (Ministerio de Salud, 1993), que establece los requisitos científicos, técnicos y administrativos para la investigación en seres humanos. Alineado con estos criterios, cada etapa del proyecto se llevó a cabo respetando la dignidad humana y protegiendo los derechos de los participantes, así como salvaguardando su bienestar. Además, se implementaron políticas para la recolección, almacenamiento y uso de los datos, que se regían por principios éticos, asegurando su confidencialidad y uso exclusivo para los fines de investigación estipulados en el proyecto.

En cuanto al manejo de la información de los pacientes, el proyecto implementó sistemas tecnológicos con algoritmos de encriptación, que proporcionaron un entorno seguro y protegido para los datos recolectados. Se priorizó la confidencialidad de la información, garantizando que los datos personales de los pacientes se manejaran de manera estrictamente privada y que fueran accesibles únicamente para los investigadores autorizados y responsables del proyecto. La recolección y uso de esta información personal se efectuó con el consentimiento previo, libre e informado de los participantes, en cumplimiento de los principios de autonomía y confidencialidad estipulados en el Artículo 15 de la Resolución 008430 de 1993.

Además, todos los datos recolectados se mantuvieron bajo la custodia del HUDN y se compartieron únicamente con miembros específicos del proyecto que, debido a sus roles, necesitaban acceder a dicha información. Para reforzar la protección de los datos, se desarrollaron protocolos internos que aseguraron que solo se utilizara la información estrictamente necesaria para los fines de la investigación, minimizando así el riesgo de cualquier uso indebido. Asimismo, se implementaron controles periódicos para revisar el cumplimiento de estos protocolos, asegurando así un manejo ético y seguro de la información sensible de los pacientes durante todas las fases del proyecto.

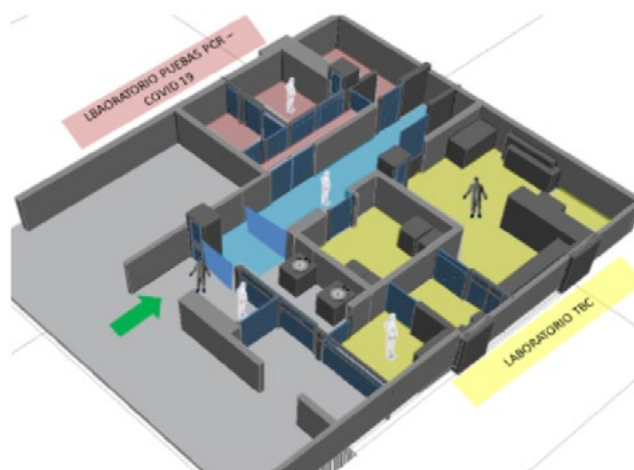
El proyecto también cumplió rigurosamente con las políticas de protección de propiedad intelectual y derechos de autor, e implementó medidas que aseguraron la confidencialidad, reserva y privacidad de la información sensible de los pacientes. Para proteger la identidad de cada participante, se establecieron procedimientos estrictos, que incluyeron la obtención de consentimientos informados en cada caso para el uso de los datos personales, conforme a la normativa de privacidad vigente y a los estándares éticos aplicables en el HUDN. Estos consentimientos se explicaron de manera clara y detallada, garantizando que cada participante comprendiera plenamente el propósito del proyecto, el uso que se le daría a su información y el compromiso del HUDN de proteger su identidad.

En conclusión, el desarrollo de este proyecto en el HUDN ha representado un avance significativo en el fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas de la región para hacer frente a enfermedades infecciosas de alto riesgo. Las estrategias metodológicas y éticas implementadas han permitido no solo cumplir con los objetivos propuestos, sino también establecer un precedente de investigación responsable y de alto impacto en salud pública. El proyecto se destacó por su enfoque integral, desde la recolección y análisis de datos hasta el aseguramiento de la confidencialidad y el bienestar de cada participante, lo que consolidó al HUDN como un actor fundamental en la región.

En el próximo capítulo, se abordará uno de los logros más importantes de este esfuerzo: la consolidación de una infraestructura fortalecida en el HUDN, que incluye un laboratorio molecular especializado en la detección y control de enfermedades infecciosas. Esta infraestructura renovada no solo representa un avance en la capacidad diagnóstica, sino que también establece una base importante para continuar avanzando en la lucha contra enfermedades infecciosas y garantiza una respuesta eficaz ante futuras emergencias sanitarias. A través de este laboratorio, el HUDN está mejor preparado para enfrentar los desafíos de salud pública, posicionándose como un referente en investigación y diagnóstico en el suroccidente colombiano.

FORTALECIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA EN EL HUDN: UN LABORATORIO MOLECULAR AVANZADO PARA COMBATIR ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Figura 3. Maqueta del diseño del laboratorio clínico del HUDN inicial



Fuente: elaboración propia.

El fortalecimiento del laboratorio molecular en el HUDN representa un avance significativo en la infraestructura sanitaria de la región. Este laboratorio, que inicialmente contaba con elementos importantes para el procesamiento de muestras, ha sido transformado y optimizado en respuesta a las necesidades más críticas de la pandemia de COVID-19. La emergencia sanitaria puso de manifiesto la urgente necesidad de contar con una capacidad diagnóstica avanzada y eficiente, capaz de manejar la rápida transmisión del virus y efectuar pruebas confiables a gran escala.

En el marco del proyecto ejecutado (MlabNariño), se llevaron a cabo obras civiles específicas para adaptar y ampliar el espacio del laboratorio, cumpliendo con altos estándares de bioseguridad que permiten el manejo seguro de agentes infecciosos de alto riesgo. Además, se incorporaron equipos y tecnologías de última generación, incluyendo sistemas avanzados para pruebas RT-PCR y dispositivos de monitoreo. Aunque el propósito inicial de estos avances era enfrentar el COVID-19, el laboratorio se ha consolidado como un centro de referencia que ahora contribuye a la vigilancia y control de diversas enfermedades infecciosas en la región.

Hoy, el HUDN cuenta con una infraestructura robusta que va más allá de los requerimientos inmediatos de la pandemia. Esta actualización no solo refuerza la capacidad diagnóstica del hospital en el presente, sino que también constituye una apuesta estratégica hacia el futuro y asegura que el laboratorio esté preparado para responder de manera rápida y eficaz ante cualquier situación de emergencia sanitaria que pueda surgir. Con esta inversión, el HUDN se posiciona como un actor clave en la protección de la salud pública en la región, fortaleciendo sus capacidades para anticipar, detectar y mitigar el impacto de futuras amenazas infecciosas.

DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO DEL HUDN

El Laboratorio Clínico del HUDN posee una trayectoria de más de cuarenta años en el procesamiento de exámenes que han sido fundamentales para el diagnóstico temprano de múltiples patologías que afectan a la población. Este laboratorio está conformado por dos áreas principales: el homocentro y el Laboratorio Clínico general. Ambas unidades ocupan un espacio de aproximadamente 1233,88 metros cuadrados distribuidos en dos niveles: el homocentro, ubicado en el primer nivel con acceso independiente, y el Laboratorio Clínico en el segundo nivel. Cada sala del laboratorio cuenta con un sistema de envío y recepción de muestras a través de cápsulas, con un total de 18 estaciones que facilitan el transporte seguro de muestras desde diferentes áreas hospitalarias. Esta disposición estructural, junto con un sistema de ventilación controlada y flujo de aire adecuado, minimiza los riesgos de contaminación cruzada y garantiza un entorno seguro para el manejo de muestras biológicas.

En su diseño original, el laboratorio del HUDN cumplía con la normativa técnica colombiana para laboratorios clínicos, lo cual le permitía ofrecer servicios especializados en inmunohematología, microbiología, hematología y química clínica. Entre sus equipos avanzados destacan analizadores hematológicos automatizados, que

proporcionan datos detallados sobre recuentos celulares, y tecnología de quimio-luminiscencia, que permite hacer pruebas diagnósticas especiales. Estas capacidades permitían un diagnóstico detallado y efectivo de enfermedades, apoyando el tratamiento clínico de los pacientes de la región.

Sin embargo, a pesar de su especialización, antes de la pandemia de COVID-19, el HUDN no contaba con una capacidad instalada para la detección avanzada de patógenos de alto riesgo biológico. Las áreas de microbiología y biología molecular, aunque funcionales, carecían de los equipos y del espacio necesarios para llevar a cabo diagnósticos de enfermedades infecciosas mediante tecnología de punta. La pandemia aceleró la necesidad de actualizar y fortalecer estas áreas, dado el aumento en la demanda de pruebas precisas y rápidas para el virus SARS-CoV-2.

FORTALECIMIENTO Y ADECUACIÓN DEL LABORATORIO

Con el apoyo del proyecto de investigación ejecutado, se realizaron importantes adecuaciones y se adquirieron equipos especializados. Se introdujeron sistemas automatizados para la detección microbiana y biología molecular, incluyendo plataformas cerradas que permiten la amplificación en tiempo real de segmentos genómicos específicos. Se adquirieron equipos como el Mini 8 Plus, utilizado en la detección del SARS-CoV-2 mediante el DirectDetect™ SARS-CoV-2 Detection Kit (PCR-Fluorescence Probe), y el MIGIT 320, orientado a la identificación de *Mycobacterium tuberculosis*. Estos dispositivos, junto con una microcentrífuga y equipos para pruebas bajo el protocolo Seegene, representan una tecnología de avanzada que aumenta la precisión en el diagnóstico de enfermedades infecciosas.

El laboratorio también se acondicionó con infraestructura de bioseguridad BSL2+, indispensable para el manejo seguro de muestras con alto riesgo biológico. Las nuevas instalaciones incluyen sistemas de presión negativa, flujo laminar y zonas de aislamiento, que reducen el riesgo de contaminación y garantizan la seguridad del personal y la integridad de las muestras procesadas. Para complementar estas mejoras, se adquirieron cabinas de bioseguridad clase II, ultracongeladores y refrigeradores de alta capacidad, lo cual asegura que las muestras se conserven en óptimas condiciones para su análisis.

Gracias a estas mejoras, el laboratorio del HUDN ahora tiene la capacidad no solo de detectar enfermedades infecciosas como el COVID-19, sino también de avanzar

en el estudio y control de otros agentes patógenos. El uso de herramientas de biología molecular y microbiología permite identificar con precisión la presencia de virus, bacterias y hongos en los pacientes, contribuyendo así al diagnóstico temprano de enfermedades y al monitoreo de posibles brotes epidémicos. La biología molecular ha aumentado la capacidad de comprender, diagnosticar y tratar una amplia gama de enfermedades inmunológicas (Adams Villalón et al., 2014), una premisa que se refleja en la nueva estructura del laboratorio y su impacto potencial en la región.

Figura 4. Accesos y equipos laboratorio fortalecido HUDN



Fuente: elaboración propia.

Esta infraestructura fortalecida no solo respondió a las necesidades inmediatas que presentó la pandemia, sino que también sienta las bases para un futuro en el que el HUDN esté preparado para afrontar cualquier emergencia sanitaria. La capacidad para llevar a cabo pruebas avanzadas y estudiar nuevas cepas virales y bacterianas en el contexto hospitalario y clínico es una herramienta invaluable para la salud pública en Nariño, lo que se traduce en que el HUDN se posicione como un centro líder en diagnóstico y vigilancia epidemiológica en el suroccidente colombiano.

Figura 5. Equipos laboratorio fortalecido HUDN



Fuente: “Hospital Universitario Departamental de Nariño renovó acreditación ICONTEC” (2021)

Algunos de los equipos adquiridos en el marco de ejecución del proyecto MlabNariño incluyeron estos equipos.

Equipos especializados para diagnóstico molecular

Mini 8 plus (Capron et al., 2020)

Capaz de efectuar pruebas de SARS-CoV-2 con el DirectDetect™ SARS-CoV-2 Detection Kit mediante la técnica de PCR con sonda fluorescente, lo que incrementa la capacidad de procesamiento a 48 pruebas diarias.

Termociclador CFX96 BIORAD (Tenorio-Abreu et al., 2022)

Este equipo, usado para amplificación y análisis, tiene una capacidad de 72 pruebas diarias, lo que permite un procesamiento eficiente de muestras y una rápida respuesta en diagnósticos.

Equipos para la preservación y manejo de muestras

Cabinas de bioseguridad Clase II (Mazzali de Ilja, 2004)

Esenciales para la manipulación segura de muestras biológicas de alto riesgo, que cumplen con los estándares de bioseguridad.

Ultracongeladores y neveras de refrigeración

Para asegurar la preservación de las muestras a temperaturas óptimas, esenciales en estudios prolongados o almacenamiento de muestras biológicas.

Automatización de procesos y sistemas de análisis sindrómico

- Equipos bajo el protocolo Seegene y el sistema automatizado de detección microbiana para el análisis rápido y preciso de distintos patógenos (Mansilla et al., 2017).
- Tecnologías de *machine learning* aplicadas para correlacionar datos epidemiológicos y clínicos, permitiendo la identificación de patrones de contagio y la optimización de intervenciones en salud pública. Se implementó un sistema piloto para hacer algunas predicciones con datos de pacientes; en el siguiente capítulo se hará una descripción detallada de la aplicación.

Con estas mejoras, el Laboratorio Clínico del HUDN no solo se vio fortalecido para afrontar la pandemia, sino que también quedó equipado para enfrentar nuevos desafíos en salud pública, con capacidades para hacer diagnósticos rápidos y confiables, esenciales para la contención y el monitoreo de enfermedades infecciosas en el futuro.

SEGUIMIENTO DEL CERCO EPIDEMIOLÓGICO DE PACIENTES COVID-19 DEL LABORATORIO HUDN

Entre los años 2020 y 2022, el seguimiento epidemiológico de pacientes con COVID-19 en Nariño fue un componente esencial que complementó el fortalecimiento del laboratorio del HUDN. Este enfoque no solo permitió controlar la transmisión del virus en una región con desafíos particulares, sino que también fue una estrategia crítica en un contexto en el que el COVID-19 parecía integrarse a la vida cotidiana.

na. Ante esta situación, el riguroso cumplimiento de las medidas de bioseguridad, recomendadas por autoridades de salud y entes gubernamentales, se volvió una herramienta indispensable en la mitigación del riesgo de contagio continuo que representaban los pacientes positivos para COVID-19, quienes fungían como potenciales vectores de transmisión. Era fundamental que estos pacientes adoptaran y mantuvieran prácticas estrictas de bioseguridad, como el distanciamiento físico y el uso de mascarillas, para reducir la propagación del virus en su entorno cercano.

La expansión de la transmisión del virus en la región se explicaba en gran medida por los mecanismos de contagio especificados en el manual *Pruebas, rastreo y aislamiento selectivo sostenible* (PRASS) (Escudero Brito, 2022), que indicaba que el SARS-CoV-2 podía propagarse fácilmente a través de actividades cotidianas como estornudar, toser o hablar en proximidad, y también por contacto con superficies contaminadas. La importancia de contar con un diagnóstico oportuno y preciso, facilitado por el laboratorio fortalecido del HUDN, fue vital para frenar el contagio y establecer medidas preventivas. A este diagnóstico se le sumaba el programa de seguimiento epidemiológico, que incluía el rastreo de contactos con el sistema informático desarrollado y la identificación de posibles nuevos casos mediante el sistema SIVIGILA y el uso de la ficha 346 para recolectar datos sociodemográficos y de exposición. Esta combinación de diagnóstico y seguimiento epidemiológico resultó fundamental para diseñar intervenciones adaptadas a la situación en Nariño, contribuyendo a controlar la cadena de contagio en la comunidad.

Gracias al fortalecimiento del laboratorio del HUDN, la capacidad diagnóstica de COVID-19 se amplió significativamente. Esta capacidad de respuesta rápida permitió iniciar el cerco epidemiológico de manera inmediata tras la detección de un caso positivo y ayudó a establecer barreras de protección para la comunidad. En un entorno de pandemia, la telemedicina y las visitas de verificación domiciliaria complementaron este sistema, lo que permitió monitorear el estado de salud de los pacientes y evitó visitas presenciales innecesarias. Esto no solo protegió a los pacientes, sino también al personal de salud, al reducir el riesgo de exposición.

El programa de seguimiento también permitió la identificación de comorbilidades en pacientes con COVID-19, tales como enfermedad renal crónica, enfermedad cardiovascular, hipertensión arterial y diabetes mellitus. Estas condiciones aumentaban el riesgo de desarrollar complicaciones graves a causa del virus, y otras enfermedades como inmunodeficiencias, enfermedades respiratorias crónicas y hepáticas, y el hábito de fumar también se asociaron con un peor pronóstico. La identificación de estos factores de riesgo facilitó una intervención médica oportuna y personalizada, que ayudó a reducir las complicaciones y a disminuir las tasas de hospitalización y mortalidad en la región.

Este modelo de identificación y monitoreo de comorbilidades es esencial para el desarrollo de estrategias de salud pública en Nariño. El enfoque preventivo y de tratamiento basado en estos hallazgos permitió una respuesta efectiva ante el COVID-19 y ha sentado bases sólidas para la preparación de futuras emergencias sanitarias. La experiencia acumulada y las capacidades fortalecidas en el HUDN resaltan la importancia de la colaboración entre el hospital y los sistemas nacionales de vigilancia epidemiológica para enfrentar desafíos similares en el futuro, fortaleciendo así el sistema de salud de la región y permitiendo una mayor resiliencia ante amenazas epidemiológicas.

Figura 6. Seguimiento cerco epidemiológico MlabNariño



Fuente: elaboración propia.

Al concluir este capítulo, se observa cómo la pandemia provocó una transformación profunda en la vida social y en la manera de entender la salud y la seguridad. Las costumbres y la cultura de las personas han cambiado radicalmente, afectando sectores tan diversos como la economía, la educación e incluso la religión. Estos cambios han dejado lecciones significativas, motivando una mayor responsabilidad en la educación basada en la ciencia y destacando la importancia de priorizar la salud. A nivel global, la “bioseguridad” se ha convertido en un idioma compartido

que trasciende las barreras lingüísticas y culturales, generando un cambio de paradigma en la forma de relacionarse y de vivir en sociedad. La pandemia ha enseñado a las personas a convivir de forma más consciente, estableciendo nuevos límites y promoviendo hábitos que han ido mucho más allá de aprender a utilizar un tapabocas; esta experiencia ha redefinido la manera de expresar afecto, que ahora se basa en el cuidado y la protección mutua.

El próximo y último capítulo profundizará en las herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) utilizadas durante el proyecto, las cuales han jugado un papel importante en la respuesta ante el COVID-19. Estas tecnologías, que incluyen aplicaciones de IA e IoT, han sido importantes en el análisis de datos de pacientes en Nariño, y ahora representan un recurso valioso para enfrentar futuros retos de salud pública.





CAPÍTULO 5

HERRAMIENTAS DE LA 4RI APLICADAS EN EL FORTALECIMIENTO DEL LABORATORIO CLÍNICO DEL HUDN

En los capítulos anteriores, el lector ha explorado en profundidad el proyecto “MlabNariño”, una iniciativa que potenció el laboratorio molecular del HUDN con el objetivo de enfrentar de manera más eficaz la pandemia de COVID-19 y futuras amenazas de salud pública. Este proyecto fue el resultado de una alianza estratégica entre el HUDN, la UNAD, el IDSN y la Gobernación de Nariño. Presentado ante el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCIENCIAS) en el marco de una convocatoria de recursos por regalías, MlabNariño evidenció la sinergia y el impacto que se logra cuando distintas entidades de sectores gubernamentales, educativos y de salud unen fuerzas en pro del bien común, beneficiando directamente a miles de personas en el suroccidente colombiano.

Este capítulo se adentra en los aspectos técnicos y científicos que sustentaron el proyecto. Hasta este punto, se ha revisado la situación epidemiológica que vivió la región durante la pandemia, las necesidades urgentes que impulsaron la formulación del proyecto y el análisis de las condiciones culturales y demográficas de la población objetivo. Ahora, se avanzará hacia una descripción detallada de las herramientas tecnológicas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) que complementaron el desarrollo de MlabNariño, resaltando la implementación de tecnologías como los modelos de *machine learning*, los sistemas de análisis de datos y aplicaciones de internet de las cosas, los cuales se integraron para lograr un control y monitoreo efectivo de los casos en la región.

En cuanto a contenido, el capítulo parte con una serie de definiciones y una descripción contextual que fundamentó el desarrollo del componente tecnológico del proyecto MlabNariño. Estas definiciones brindan al lector un marco teórico y práctico, explicando las bases que guiaron la elección de tecnologías y métodos aplicados. Luego, se presentan los requerimientos con respecto a sistemas de información y las primeras herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) empleadas en el proyecto. Estas herramientas, que están en constante evolución y expansión a nivel mundial, apuntan a que su uso se masifique no solo en el ámbito de la salud, sino también en otros sectores, lo que otorga una proyección de futuro promisorio.

Posteriormente, el capítulo se adentra en un aspecto técnico importante: el uso de tecnologías para la analítica de datos y el *machine learning*, elementos que representan uno de los logros más destacados de la investigación y que aportan significativamente al manejo y tratamiento de grandes volúmenes de datos. Este enfoque no solo propende por la optimización del procesamiento de información en tiempo real, sino que también abre las puertas a futuros desarrollos en salud pública y otros campos. En el desarrollo del proyecto, la IA aún estaba en proceso de adopción, pero pocos años después se demostraría que había llegado para quedarse, como se evidencia actualmente.

En la cuarta sección, se describen los procesos de automatización mediante el uso de tecnologías de internet de las cosas (IoT). Aquí, el proyecto MlabNariño desarrolló un prototipo aplicable en el laboratorio fortalecido, específicamente enfocado en el monitoreo de EPP, concepto fundamental durante la pandemia. Este prototipo demuestra cómo tecnologías tipo IoT pueden mejorar la seguridad y el control en ambientes de laboratorio, contribuyendo a la protección tanto del personal como de los pacientes.

Finalmente, el capítulo concluye con un análisis de las lecciones aprendidas y las perspectivas de investigación futuras que surgen a partir del uso de herramientas 4RI en el ámbito de la salud. Este proyecto no solo fue posible gracias al esfuerzo y dedicación de los investigadores y el personal de salud, sino también por el compromiso de cada uno de los involucrados en las áreas administrativas y operativas.

CONTEXTO Y DEFINICIONES

En el contexto del proyecto MlabNariño, el uso de herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) fue un pilar estratégico para alcanzar sus objetivos fundamentales. Estos objetivos incluyeron: 1) el mejoramiento de la infraestructura del

laboratorio en el HUDN; 2) la prestación de servicios científicos y tecnológicos avanzados en el procesamiento de pruebas RT-PCR para el diagnóstico temprano de COVID-19 y otras enfermedades; y 3) el fortalecimiento del programa de vigilancia y monitoreo epidemiológico para el reporte y control de eventos de salud pública de interés. En cada uno de estos objetivos, las tecnologías de la 4RI desempeñaron un papel importante, aportando innovación y eficiencia a los procesos implementados.

Las herramientas de *machine learning*, internet de las cosas (IoT) y sistemas de información se integraron en el proyecto MlabNariño de forma estratégica, lo que influyó significativamente en los resultados alcanzados en cada área de trabajo. Esta combinación tecnológica impulsó la capacidad del HUDN no solo para enfrentar la pandemia, sino también para establecer bases en la detección temprana y el monitoreo de enfermedades infecciosas.

Entender el alcance y funcionamiento de estas herramientas resulta esencial para valorar los logros obtenidos y visualizar sus aplicaciones futuras en proyectos de salud pública. Para una mejor comprensión de la tecnología aplicada en el laboratorio del HUDN y su impacto en la salud regional, se presentan a continuación definiciones de términos y conceptos necesarios, con el objetivo de facilitar la interpretación de los avances logrados en el proyecto MlabNariño.

Herramientas de la Cuarta Revolución Industrial (4RI)

El término “Cuarta Revolución Industrial” o “4RI” es común en los ámbitos científico y tecnológico. Muchas empresas lo utilizan como un gancho publicitario para atraer clientes e inversores, pero ¿qué significa realmente la sigla 4RI y por qué se ha vuelto tan relevante? Para entender su verdadero valor, es necesario hacer un breve recorrido histórico por las revoluciones industriales (Mayoral, 2006) anteriores, hitos que han transformado profundamente la vida humana.

A lo largo de la historia, las denominadas “revoluciones industriales” (Mayoral, 2006) han marcado cambios trascendentales, cada una caracterizada por innovaciones que representaron un avance importante en tecnología y condiciones de vida. Estas transformaciones son tan significativas que es posible identificar tres revoluciones industriales previas a la actual 4RI, documentadas ampliamente y, de manera lógica, nombradas consecutivamente como 1RI, 2RI y 3RI. Cada una de ellas ha establecido un antes y un después en la sociedad humana, con implicaciones

tecnológicas, económicas y sociales. En el contexto de la Cuarta Revolución Industrial, el 4 hace referencia al número secuencial de estos hitos, mientras que *RI* representa el término ‘revolución industrial’.

Cada una de estas revoluciones industriales ha sido impulsada por avances tecnológicos que facilitaron la vida cotidiana, expandieron el acceso a bienes y servicios y contribuyeron a enfrentar desafíos de supervivencia y bienestar. La Primera Revolución Industrial trajo la mecanización y el uso de energía a vapor, transformando los procesos de manufactura. La Segunda Revolución Industrial introdujo la electricidad y la producción en masa, lo cual aceleró significativamente la industrialización global. La Tercera Revolución Industrial, conocida también como la Revolución Digital, se caracterizó por el desarrollo de la electrónica, la informática y la automatización de procesos.

Hoy, en la Cuarta Revolución Industrial (en estos momentos ya se está hablando de la quinta revolución industrial (5RI), que se estructura por la IA principalmente), el cambio está impulsado por tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT), la biotecnología y la impresión 3D, entre otros. Estas herramientas no solo facilitan nuevas formas de interacción y productividad, sino que también permiten una integración sin precedentes de los sistemas físicos y digitales, generando un entorno inteligente y conectado.

La tabla 4 resume las características principales de cada revolución industrial, proporcionando un marco para entender cómo cada hito ha influido en la transformación de la humanidad. En particular, el proyecto MlabNariño se ha constituido como un claro ejemplo de cómo las herramientas de la 4RI se aplican a problemas de salud pública, demostrando el potencial de estas tecnologías para responder a necesidades críticas en sectores como el diagnóstico, el monitoreo y la prevención de enfermedades infecciosas.

Tabla 4. *Revoluciones industriales de la humanidad*

Revolución	Periodo	Hitos
Primera	1750 - 1840	Aumento de la producción gracias a la adopción de la energía de vapor
Segunda	1870 - 1914	Producción en masa gracias al uso de la energía eléctrica (Friedman, 1995)



Revolución	Periodo	Hitos
Tercera	1950 - 2006	Desarrollo y uso de la electrónica y las tecnologías de la información para introducir automatización en la industria (Roel, 1998)
Cuarta	2014 – Hasta la fecha	Desarrollo de sistemas ciberfísicos (CPS), evolución de internet a IoT, aplicaciones de la robótica, aplicación de algoritmos de IA, <i>machine learning</i> y <i>deep learning</i> , <i>simuladores</i> , <i>big data</i> , <i>cloud computing</i> , impresión 3D, realidad virtual y aumentada (Schwab, 2016)

Como se muestra en la tabla 4, cada revolución industrial ha aportado beneficios significativos a la humanidad, pero la Cuarta Revolución Industrial (4RI) tiene una relevancia especial en el contexto actual. Esta cuarta revolución está ocurriendo en un momento único en la historia, marcado por fenómenos de gran impacto global, como las pandemias, el desarrollo del metaverso y otros avances disruptivos. Además, es la era actual, y su influencia se extiende profundamente en los ámbitos económico, social y tecnológico.

Al profundizar en la 4RI, se encuentra que los servicios y tecnologías que la definen abarcan diversas áreas de aplicación que han transformado el manejo de la información y la automatización de procesos. Algunos de los servicios importantes, en los que coinciden numerosos autores (Becerra Sánchez, 2020), incluyen

- **cloud computing** o ‘computación en la nube’, que permite almacenar y acceder a grandes volúmenes de datos de forma remota, lo que facilita la gestión de información de manera eficiente (Qian et al., 2009);
- **internet de las cosas** (IoT), un sistema interconectado de dispositivos que se comunican entre sí, proporcionando datos en tiempo real para diversos procesos (Evans, 2011);
- **big data**, que implica la recopilación, almacenamiento y procesamiento a gran velocidad de enormes volúmenes de datos, generando información valiosa a partir de patrones y análisis complejos;
- **simuladores aplicados a procesos productivos**, permitiendo optimizar y prever el comportamiento de sistemas complejos;
- **impresión 3D**, que permite la creación de objetos físicos a partir de diseños digitales, revolucionando la manufactura y el desarrollo de prototipos;
- **robótica y automatización**, en particular en la industria, mejorando la eficiencia y precisión de los procesos;

- **sistemas ciberfísicos (CPS)**, que permiten la integración automática de procesos en tiempo real mediante la interacción entre maquinaria y redes digitales, en sinergia con tecnologías como M2M (*machine to machine*) e IoT;
- **IA**, con desarrollos avanzados en *machine learning* y *deep learning*, que permiten el análisis y la predicción de patrones complejos.

La 4RI trae consigo un amplio espectro de posibilidades que está revolucionando el manejo de la información y transformando la economía digital, con un crecimiento sostenido en la relevancia de las plataformas digitales y sus actores. Este cambio paradigmático posiciona a las tecnologías de la 4RI como esenciales para los nuevos escenarios de desarrollo y tecnología contemporáneos, donde el acceso y el análisis de datos juegan un papel fundamental (Se resalta que ya se está hablando de 5RI).

En el proyecto MlabNariño, el uso de estas tecnologías ha sido fundamental para cumplir varios objetivos de este. Desde el análisis de datos para el seguimiento de pacientes con COVID-19 y la contención del cerco epidemiológico, hasta el desarrollo de soluciones IoT en el diseño de un EPP especializado para el personal del laboratorio molecular del HUDN, el proyecto ha permitido evidenciar el potencial de la 4RI para abordar desafíos complejos en salud pública. Los detalles de estas aplicaciones tecnológicas se explorarán más adelante, donde se profundizará en el impacto de cada una de ellas en el fortalecimiento de las capacidades diagnósticas y preventivas del laboratorio del HUDN.

Machine learning y deep learning

La IA no es un concepto reciente ni exclusivo de la Cuarta Revolución Industrial (4RI), aunque es en esta era cuando su uso se ha expandido y adaptado ampliamente en múltiples sectores productivos y sociales. Históricamente, el concepto de IA se remonta a la década de 1840, cuando Lady Ada Lovelace anticipó algunos principios fundamentales de la IA al intentar mejorar la máquina analítica de Babbage de 1834 (Norvig y Russell, 2013). Sin embargo, fue en 1936 con Alan Turing cuando la IA comenzó a adquirir un enfoque práctico y estructurado, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial, con el desarrollo de sistemas que descifraban códigos. Esta base sentó las bases de las computadoras modernas y, gracias al avance de la electrónica y las telecomunicaciones, la IA se ha convertido en una herramienta versátil y potente con aplicaciones que probablemente seguirán expandiéndose en el futuro.

Para comprender su aplicación en el proyecto MlabNariño, es necesario explicar los conceptos de IA y su relación con *machine learning* (ML) y *deep learning* (DL). Aunque la IA puede ser difícil de definir de manera exhaustiva debido a su naturaleza interdisciplinaria, para este contexto se adopta la definición propuesta por McCarthy (2007), quien describe la IA como el proceso de crear máquinas inteligentes, especialmente mediante *software* y lo que él llama “computación inteligente”, que permite simular y comprender aspectos de la inteligencia humana en un contexto amplio.

ML y DL son aplicaciones especializadas de la IA que desempeñan un papel fundamental en muchos avances tecnológicos actuales (Salvador Maceira, 2019). ML es una técnica dentro de la IA en la que las computadoras aprenden y realizan tareas sin programación explícita para cada acción. En ML, el objetivo es construir modelos que puedan aprender automáticamente a partir de datos, identificar patrones y tomar decisiones basadas en estos patrones. Existen dos tipos principales de aprendizaje en ML: supervisado, donde se realiza una intervención humana que orienta el proceso de aprendizaje, y no supervisado, en el que la máquina desarrolla su aprendizaje de forma autónoma. Por su parte, DL es una técnica de IA caracterizada por el uso de redes neuronales con múltiples capas, que generalmente opera bajo aprendizaje no supervisado y es muy efectiva en el reconocimiento de voz, imágenes y la predicción de eventos a partir de datos complejos.

En el proyecto MlabNariño, se exploraron y aplicaron principalmente técnicas de ML, en un esfuerzo inicial de introducción y experimentación con estas herramientas en el contexto de la salud pública en el departamento de Nariño. Este primer acercamiento representa una apertura a futuras aplicaciones y colaboraciones que podrían tener un gran impacto en el fortalecimiento del sistema de salud pública local, especialmente en el análisis de datos epidemiológicos. La implementación de estas técnicas en el HUDN, en el fortalecimiento del laboratorio molecular, marca el inicio de un camino de innovación que, en el futuro, permitirá optimizar aún más los diagnósticos y la vigilancia de enfermedades.

SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN EL PROYECTO MLABNARIÑO

La información hoy en día se ha convertido en un recurso intangible de gran valor y un activo esencial tanto para las organizaciones como para la vida cotidiana de las personas. El manejo adecuado de datos, informes, reportes, documentos e

imágenes resulta vital para el desarrollo y la eficiencia en múltiples áreas. Esta dependencia creciente hacia los dispositivos tecnológicos y la gestión de información resalta la transformación digital que se está experimentando, donde conceptos como internet, las redes informáticas y los dispositivos conectados se han vuelto indispensables para casi todas las actividades humanas: desde el comercio y la educación hasta la salud, la comunicación y el transporte.

Este contexto resalta la relevancia de contar con sistemas de manejo y procesamiento de información que faciliten el análisis, la consulta y el uso efectivo de los datos. En el proyecto MlabNariño, los procesos de organización y gestión de los datos se constituyeron como los pilares fundamentales para el éxito en la toma de decisiones epidemiológicas. Los datos recopilados de los pacientes que acudieron al HUDN para hacerse pruebas de RT-PCR o que participaron en campañas masivas de diagnóstico fueron almacenados y sistematizados cuidadosamente, lo que permitió una clasificación y análisis efectivo de la información.

De acuerdo con el diseño del proyecto, el proceso de captación requirió el consentimiento informado de los pacientes que acudieron al HUDN para realizarse la prueba RT-PCR. Un miembro del equipo investigador explicó detalladamente el propósito del estudio, sus beneficios y las condiciones de participación, enfatizando su carácter voluntario y garantizando que la negativa a participar no afectaría la prestación del servicio. Cabe destacar que ningún paciente rechazó la invitación; por el contrario, mostraron una disposición favorable hacia el estudio. Los documentos de consentimiento fueron recolectados y resguardados en la Unidad de Docencia y Servicio del HUDN durante la ejecución del proyecto.

Adicional a lo anterior, la recolección de datos en el proyecto MlabNariño incluyó varias etapas importantes (véase la figura 7), con el objetivo principal de sistematizar y clasificar la información de los pacientes en dos grupos: aquellos que obtuvieron un resultado positivo para COVID-19 y aquellos cuyo resultado fue negativo. El primer grupo, con diagnóstico positivo, fue registrado y organizado para analizar múltiples variables, incluyendo aspectos sociodemográficos, enfermedades preexistentes y relaciones sociales, así como los posibles factores de exposición al virus. Este análisis no solo permitió contribuir al cierre del cerco epidemiológico en la región, sino también realizar un seguimiento pormenorizado a los pacientes para identificar y mitigar riesgos futuros en el departamento de Nariño.

Por otro lado, el grupo de pacientes con resultado negativo fue clasificado y registrado con un enfoque estadístico, lo que brindó una base de datos relevante para

futuros estudios que permitan analizar patrones y generar conocimiento sobre la incidencia de la enfermedad y sus características en diferentes segmentos de la población. Este proceso de clasificación y sistematización de datos no solo fortaleció las capacidades diagnósticas del HUDN, sino que también permitió sentar las bases para un sistema de vigilancia epidemiológica avanzada, que pueda ser aplicable a futuras investigaciones y necesidades de salud pública en la región.

En relación con el aspecto técnico, los datos se guardaron en una aplicación de *software* que se diseñó de manera específica para el proyecto, la cual consistió en un formulario y un sistema de base de datos que se estructuró con todas las variables necesarias para un análisis epidemiológico completo y con aquellas que permitían comprender el cerco epidemiológico del paciente. Este proceso fue apoyado y dirigido por el equipo médico y de epidemiología del HUDN.

La aplicación de *software* desarrollada fue fundamental y, de acuerdo con la figura 7, se puede observar que se constituyó en un componente fundamental y recurrente del proyecto, dado que los pacientes que acudieron al HUDN para la toma de muestras RT-PCR superaron las 22 000 personas, que fue un número mayor al inicialmente proyectado. Este proceso fue meticuloso y requirió el uso de varios formatos, incluyendo el formato SIVIGILA, el protocolo del proyecto, la historia clínica del paciente y los documentos de seguimiento que se elaboraron para el proyecto, con el fin de poder garantizar la trazabilidad y la calidad de la información recopilada. Cada toma de muestra incluyó el registro exhaustivo de datos para crear una base sólida que facilitara el análisis posterior y el seguimiento de los pacientes.

Figura 7. Momentos recolección de información proyecto MlabNariño



Fuente: elaboración propia.

En la fase de procesamiento de laboratorio, la recolección de información sobre los resultados se integró en el sistema de seguimiento, complementando los aplicativos y *softwares* específicos del laboratorio. Estos sistemas no solo permitieron un control preciso de cada prueba, sino que también aportaron datos fundamentales para el análisis epidemiológico en el contexto del proyecto MlabNariño. Este flujo de información fue especialmente útil durante los picos de contagio, cuando la demanda de pruebas era alta y se generaban grandes volúmenes de datos. La información, como se ha mencionado anteriormente, se salvaguardó en el aplicativo de *software* creado para el proyecto y se cargó en la nube que se contrató para el manejo de los datos.

Por otra parte, es importante mencionar que existieron periodos de menor incidencia de contagios en los cuales la toma de muestras disminuyó. Durante estos lapsos, fue necesario implementar estrategias de búsqueda activa de casos, para lo cual se organizaron campañas y salidas extramurales con el fin de llevar a cabo pruebas RT-PCR en la comunidad. Esta estrategia permitió captar casos asintomáticos o con poca visibilidad en áreas de difícil acceso y obtener una visión más completa del comportamiento del virus en la región. Así, el proyecto logró avanzar de manera continua hacia sus objetivos, ajustándose a las variaciones en la propagación del virus y manteniendo un enfoque preventivo y de control para mejorar la respuesta sanitaria en Nariño.

Tipos de datos a capturar para el proceso de sistematización

Luego de un análisis exhaustivo llevado a cabo por los profesionales del proyecto, incluyendo expertos en epidemiología, bacteriología, enfermería y monitoreo epidemiológico, se establecieron ocho categorías de datos (véase la figura 8), que permitirían capturar la información desde un enfoque integral y facilitarían el seguimiento de los pacientes y el análisis epidemiológico.

Luego de un análisis exhaustivo llevado a cabo por los profesionales del proyecto, incluyendo expertos en epidemiología, bacteriología, enfermería y monitoreo epidemiológico, se establecieron ocho categorías de datos (véase la figura 8), que permitirían capturar la información desde un enfoque integral y facilitarían el seguimiento de los pacientes y el análisis epidemiológico.

Figura 8. Tipos de conjuntos de datos proyecto MlabNariño

Fuente: elaboración propia.

Las categorías definidas fueron las siguientes:

- **Datos básicos.** Información de identificación y ubicación, que permite un seguimiento individualizado y preciso de cada paciente. Estos datos fueron sensibles en el manejo de estos, pero se utilizaron de manera exclusiva para determinar el cerco epidemiológico de los pacientes y evitar de esta manera el contagio masivo de los pacientes, sus familias y amigos de aquellos pacientes que resultaban con una prueba RT-PCR positiva para COVID-19.
- **Síntomas.** Registro detallado de síntomas presentados, que facilitó la caracterización clínica de los casos y permitió detectar patrones comunes en la presentación de la enfermedad. Estos datos indicaron secuelas, signos de alarma y la identificación de patrones de comportamiento en pacientes con COVID-19.
- **Vacunación COVID.** Información sobre el estado de vacunación de cada paciente, con detalles específicos sobre el número de dosis, fechas y tipo de vacuna; esta información fue fundamental para analizar la relación entre vacunación y severidad de la infección.
- **Datos socioeconómicos y culturales.** Variables como nivel de ingresos, ocupación, nivel educativo y condiciones de vida se convirtieron en datos esenciales para comprender los factores sociales que influyeron en la transmisión y el impacto de la enfermedad. Lamentablemente, un elemento identificado fue que personas con escasos recursos o pocos elementos para su cuidado eran los primeros en ser susceptibles de complicaciones por la enfermedad.

- **Hospitalización.** Detalles sobre el tiempo de hospitalización, tratamientos recibidos y estado clínico, lo cual permitió evaluar la carga sobre el sistema de salud y la evolución clínica de los pacientes. Este dato resulta sumamente importante para determinar la capacidad del HUDN en los tiempos de picos altos y para la toma de decisiones en cómo enfrentar estas situaciones de la mejor manera.
- **Antecedentes patológicos.** Información sobre enfermedades previas o condiciones de riesgo que podrían agravar el curso del COVID-19, como hipertensión, diabetes y enfermedades respiratorias. Lo que se convertía en una cadena que podría agravar la enfermedad y su cuidado en el centro hospitalario.
- **Tipo de contagio.** Clasificación de cada caso según el tipo de exposición, ya sea comunitaria, laboral, familiar, entre otras, para identificar patrones de transmisión y tratar de detener el cerco epidemiológico.
- **Nexos epidemiológicos.** Datos que identifican contactos cercanos y situaciones de exposición, facilitando la labor de seguimiento y la contención del virus en el cerco epidemiológico. Complementario a las variables iniciales de identificación, pero que se llevaban de manera directa a identificar posibles focos que se debían llamar o atender para evitar la expansión del contagio.

Cada uno de estos grupos de datos se diseñó para capturar información relevante y útil en el contexto del proyecto, maximizando la utilidad del proceso de sistematización y orientando el análisis hacia la identificación de tendencias, factores de riesgo y patrones de contagio que fueron y son críticos para la toma de decisiones en salud pública.

Los grupos de datos establecidos en el proyecto MlabNariño proporcionaron una estructura organizada y categorizada que facilitó la gestión de información, optimizando la búsqueda y el desarrollo de análisis específicos. Esta clasificación permitió que cada grupo de datos contuviera diversas variables relevantes para el proyecto, sumando un total de más de 150 variables en la unión de todos los dispositivos y formatos utilizados. Estas variables abarcaron desde datos básicos de identificación, como nombre, apellido y dirección, hasta información detallada sobre conductas y factores de exposición que pudieran haber contribuido al contagio de COVID-19. La diversidad y profundidad de estos datos facilitaron un enfoque integral en el análisis epidemiológico y el seguimiento de cada caso.

A partir de esta base de datos, se definieron tres etapas fundamentales para el proceso de sistematización, de acuerdo con los objetivos de MlabNariño (véase la figura 8), las cuales fueron las siguientes:

- **Diseño de una herramienta de *software* para capturar información de la toma de muestras.** Se desarrolló y adaptó una aplicación informática que permitió capturar datos de forma eficiente y en tiempo real durante el proceso de toma de muestras RT-PCR, integrando la información en un sistema unificado. Este *software* contribuyó a agilizar la recopilación de datos, reduciendo errores en el ingreso y facilitando la disponibilidad inmediata de información para el análisis posterior. Esta aplicación se instaló en un servidor web de uso exclusivo para el proyecto que utilizó herramienta de la nube para salvaguardar la información.
- **Análisis y aplicación de herramientas de ML.** Con la información sistematizada, se aplicaron técnicas de ML que permitieron identificar patrones en la propagación del COVID-19, evaluar factores de riesgo y prever situaciones complejas. Estos modelos, implementados en etapas preliminares del proyecto, proporcionaron valiosos insights sobre el comportamiento del virus, ayudando a personalizar intervenciones y estrategias de prevención.
- **Generación de reportes e informes con la información analizada.** Los datos procesados y analizados se tradujeron en reportes y análisis detallados que facilitaron la toma de decisiones. Estos informes contenían información importante para el seguimiento de casos y la contención del virus, permitiendo una respuesta rápida y eficiente por parte del equipo de salud pública del HUDN y otras entidades implicadas.

Este enfoque por etapas permitió una gestión de datos eficaz y bien fundamentada, que no solo respaldó el análisis y la generación de conocimiento sobre el COVID-19, sino que también dejó una infraestructura de análisis de datos lista para futuras emergencias de salud pública.

Descripción de la aplicación Mlab para captura datos de pacientes

En esta fase del proyecto se desarrolló una herramienta de *software* para la captura y almacenamiento de datos de los pacientes a los que se les efectuaron pruebas RT-PCR en el laboratorio molecular del HUDN. La aplicación se denominó Mlab, la cual se diseñó no solo para registrar los datos básicos y clínicos de cada paciente, sino también para facilitar el seguimiento de su cerco epidemiológico, especialmente en aquellos casos de pacientes que resultaron positivos para COVID-19.

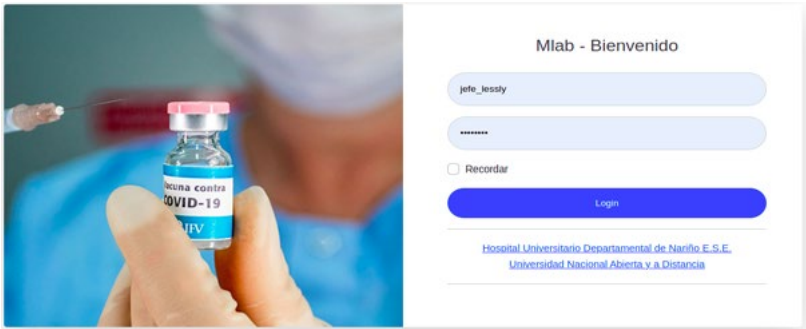
La herramienta se configuró para integrar varias funcionalidades orientadas a la gestión y análisis de datos, asegurando que la información se organizara de manera precisa y completa. Cada vez que un paciente se sometía a la prueba RT-PCR, un miembro del equipo de investigación utilizaba la aplicación Mlab para registrar los datos personales, el historial clínico, posibles síntomas, contactos recientes y factores de riesgo asociados al paciente. Para los pacientes con resultado positivo para COVID-19, se activaba un protocolo de seguimiento que permitía registrar y monitorear el progreso del paciente y de aquellos contactos identificados en su cerco epidemiológico.

Este sistema de captura de datos fue esencial para varios aspectos del proyecto:

- **Centralización de datos.** La aplicación Mlab funcionó como una base de datos centralizada, asegurando que toda la información de los pacientes estuviera organizada en un solo sistema, accesible para los profesionales de salud autorizados, lo cual mejoró la eficiencia en la gestión de casos.
- **Automatización de reportes.** La aplicación permitió automatizar la generación de reportes que contenían información relevante sobre el número de casos positivos, la tasa de contagio y los nexos epidemiológicos. Esto proporcionó un panorama claro y actualizado sobre la situación del COVID-19 en la región.
- **Seguimiento epidemiológico.** La herramienta facilitó el seguimiento de los contactos y el mapeo de la propagación del virus en la comunidad, apoyando las labores de contención y permitiendo tomar decisiones de salud pública con base en información precisa y actualizada.
- **Seguridad y confidencialidad de los datos.** La aplicación se desarrolló con algoritmos de encriptación para proteger la privacidad de los datos personales de los pacientes (AES256), garantizando que la información solo fuera accesible para el personal autorizado del HUDN y respetando los principios éticos establecidos en el proyecto.

En resumen, la aplicación Mlab representó un avance significativo en el manejo de datos durante la pandemia, permitiendo una gestión integral de la información y facilitando tanto el diagnóstico como el seguimiento de los casos de COVID-19 en Nariño. Este sistema, además de haber sido un recurso importante durante la emergencia sanitaria, sienta una base para futuros proyectos de vigilancia epidemiológica y gestión de datos en salud pública. En la figura 9, se puede observar la pantalla de acceso al sistema.

Figura 9. Pantalla de acceso al sistema de captura Mlab



Fuente: elaboración propia.

La herramienta diseñada para el proyecto MlabNariño permitió gestionar de forma eficiente las variables del estudio, facilitando la captura y seguimiento de datos de pacientes a los que se llevaron a cabo pruebas RT-PCR en el laboratorio molecular del HUDN, así como el monitoreo del cerco epidemiológico de los casos positivos.

La interfaz inicial de la aplicación (<https://davinci.mlabnarino.co>) se alojó en un dominio y *hosting* adquiridos específicamente para el proyecto (<https://mlabnarino.co>). En la figura 10, se muestra la pantalla de captura, que organizaba las variables en pestañas para clasificar datos básicos, síntomas, estado de vacunación, antecedentes y nexos epidemiológicos, logrando una estructura clara y efectiva para el análisis y toma de decisiones. Esta aplicación fue una herramienta importante en la recolección y procesamiento de información, facilitando una respuesta organizada y rápida en el contexto de la pandemia.

Figura 10. Pantalla de captura y pestañas MlabNariño

Fuente: elaboración propia.

Con las variables identificadas y la herramienta de *software* optimizada para la captura de datos de los pacientes en el laboratorio molecular del HUDN, el paso siguiente fue organizar los *datasets* (conjuntos de datos estructurados para su análisis en ML) que permitieran extraer información necesaria de los aspectos definidos en el análisis epidemiológico. Este proceso de organización es complejo y requiere diversos elementos, incluyendo un profundo conocimiento del tema abordado, lo cual resaltó la importancia de contar con un equipo multidisciplinario. En el caso del proyecto MlabNariño, la dirección estuvo a cargo de la epidemióloga e investigadora principal, apoyada por un equipo de enfermeras, bacteriólogas y otros responsables de la toma de muestras y seguimiento de los pacientes positivos para COVID-19.

La calidad de los datos fue un aspecto fundamental en el proyecto MlabNariño; cuanto más completos y precisos fueran los datos ingresados, más eficiente sería la organización de un *dataset* robusto. La ausencia de calidad en los datos implica tiempo adicional para su organización y preparación, ya que es necesario llevar a cabo ajustes y depuración para asegurar su fiabilidad. En este sentido, fue fundamental que el equipo de análisis mantuviera una comunicación constante con el equipo de captura de datos, asegurando así que el ingreso se realizara adecuadamente desde el inicio. Esto facilitó los procesos de ML y los análisis posteriores que apoyaron las decisiones en salud pública.

Cuando estos criterios de calidad se cumplieron o se efectuaron los ajustes necesarios (como completar manualmente la información faltante, eliminar registros duplicados o corregir datos inexactos), los *datasets* resultantes estuvieron listos para utilizarse en ML y otros análisis. En la tabla 5, se muestra un listado de algunos de los *datasets* generados en el proyecto MlabNariño, que proporcionaron la base para los procesos de análisis y toma de decisiones epidemiológicas en la región.

Tabla 5. *Datasets generados en MlabNariño*

N.º	Datasets
1	Historia patología en estudio
2	Evolución agente infeccioso en estudio
3	Historia clínica pacientes investigación
4	Pruebas diagnósticas
5	Agentes externos relacionados
6	Clasificación demográfica
7	Acciones médicas realizadas
8	Efectos secundarios (desenlaces)
9	Característica epidemiológica del EISP



Todos los *datasets* listados en la tabla 5 fueron validados y procesados como parte del trabajo interno del HUDN. Estos análisis permitieron un seguimiento detallado de los pacientes durante la pandemia, lo cual fue esencial para mitigar el riesgo epidemiológico. Al trabajar con los cercos epidemiológicos identificados, los *datasets* facilitaron la identificación y el monitoreo de contactos cercanos, actuando como una herramienta adicional para la toma de decisiones.

Cloud computing para los datos

En el proceso de sistematización de la información del proyecto MlabNariño, un elemento fundamental fue la decisión sobre el almacenamiento seguro y eficiente de los datos generados. La tecnología actual ofrece múltiples opciones para el almacenamiento de grandes cantidades de información, desde dispositivos portátiles como discos duros y memorias USB hasta servicios avanzados de *cloud computing* ('computación en la nube'). Esta última opción, un pilar de la Cuarta Revolución Industrial, permite que las organizaciones accedan a servidores externos o "en la nube" de manera remota, independientemente de su ubicación física, facilitando el acceso y la administración de datos a gran escala.

Para MlabNariño, se contrataron servicios de *cloud computing* que soportaran desde el alojamiento del sitio web hasta la gestión y almacenamiento de los datos generados diariamente por las pruebas RT-PCR. Esta elección buscaba no solo dar respuesta a las necesidades inmediatas del proyecto, sino también asegurar la continuidad del fortalecimiento del laboratorio molecular del HUDN.

A continuación, se describen los tipos de servicios de *cloud computing* más comunes y cómo se aplicaron en el proyecto:

- **SaaS (Software as a Service ['software como servicio']).** SaaS es el servicio más común y permite a los usuarios acceder a aplicaciones alojadas en un servidor en la nube, sin la necesidad de gestionar el hardware, el almacenamiento, las copias de seguridad o el mantenimiento técnico (Cusumano, 2010). Ejemplos conocidos incluyen Google Drive, Dropbox, Google Apps y Office 365. En MlabNariño, se utilizó SaaS para alojar el sitio web del proyecto y desplegar la aplicación Mlab de captura de datos, además de generar conjuntos de datos iniciales para el proceso de ML.
- **PaaS (Platform as a Service ['plataforma como servicio']).** Este servicio se orienta a desarrolladores de *software*, permitiéndoles crear aplicaciones sin preocuparse por la infraestructura de hardware necesaria (Pahl, 2015).

Proveedores como AWS (Amazon Web Services), Google App Engine y Azure de Microsoft ofrecen este tipo de servicio. Aunque en MlabNariño no se contrató un servicio PaaS específico, esta modalidad sería útil en futuros proyectos que requieran desarrollos adicionales.

- **IaaS (*Infrastructure as a Service* ['infraestructura como servicio'])**. IaaS proporciona un control más profundo sobre los recursos de hardware y *software* en la nube, permitiendo a los usuarios configurar su entorno según sus necesidades sin preocuparse por el mantenimiento de los equipos (Gorelik, 2013). Para MlabNariño, se contrató un servicio de IaaS, esencial para procesar los modelos de ML que se desarrollaron. Este servicio fue fundamental para ejecutar *software* especializado y utilizar equipos de alto rendimiento en la nube, necesarios para manejar la cantidad de datos y la complejidad del análisis epidemiológico.

La combinación de SaaS e IaaS en el proyecto MlabNariño permitió un flujo continuo y seguro de datos desde la captura hasta el análisis. SaaS facilitó la recolección y clasificación inicial de datos, mientras que IaaS proporcionó la capacidad de procesamiento necesaria para el análisis de ML.

ANALÍTICA DE DATOS Y ML APLICADA A MLABNARIÑO

Con el aplicativo de captura de información y los reportes generales establecidos, el siguiente paso fue profundizar en la investigación y selección de herramientas de analítica de datos adecuadas para el proyecto. Dada la necesidad de aprovechar al máximo los datos recolectados, se definió el uso de algoritmos de ML que, mediante técnicas de análisis predictivo, pudieran transformar los datos en información valiosa para comprender la situación actual de la pandemia y anticipar posibles escenarios en el área de la salud pública.

Para MlabNariño, la aplicación de ML se enfocó en identificar patrones y tendencias en los datos que facilitarían la toma de decisiones en salud pública, ayudando a mitigar el riesgo epidemiológico en la región. Las herramientas seleccionadas se orientaron a modelos de predicción que, mediante datos históricos y variables socio-demográficas, ofrecieran *insights* sobre el comportamiento del virus en la comunidad.

En este ejercicio de analítica, se implementaron los siguientes modelos de ML:

- **Árboles de decisión.** Los árboles de decisión fueron fundamentales para segmentar la información y entender las relaciones entre diferentes variables,



facilitando la categorización de pacientes en función de sus características y síntomas. Este modelo ayudó a establecer reglas de clasificación para el seguimiento de pacientes, permitiendo la rápida identificación de casos que requerían intervenciones prioritarias.

- **Naïve Bayes.** Este algoritmo probabilístico se aplicó para el análisis de variables epidemiológicas, proporcionando una herramienta eficaz para trabajar con grandes conjuntos de datos y hacer predicciones basadas en la probabilidad de infección en poblaciones específicas. Naïve Bayes resultó útil para identificar grupos de alto riesgo y estimar la probabilidad de transmisión dentro de diferentes subpoblaciones, considerando la exposición y el historial de contactos.

Estos modelos de ML generaron reportes que se utilizaron para guiar las decisiones del HUDN, permitiendo la implementación de intervenciones basadas en datos y reforzando la respuesta ante la pandemia en el departamento de Nariño.

Modelos de ML seleccionados

Árboles de decisión

De acuerdo con Berlanga et al. (2013), los árboles de decisión son modelos estadísticos que representan visual y analíticamente los eventos que resultan de decisiones tomadas en determinados momentos, basándose en las condiciones específicas presentadas en cada situación. Este modelo es particularmente útil en la selección de la decisión probabilísticamente más acertada y en la identificación de patrones mediante una estructura gráfica clara. La visualización permite no solo comprender cómo fluye la información, sino también definir los subgrupos resultantes de un análisis específico.

Entre las características importantes de los árboles de decisión se encuentran la segmentación y estratificación de datos, así como su capacidad para realizar predicciones, reducir datos, filtrar variables, identificar interacciones, fusionar categorías y transformar variables continuas en discretas. Estos elementos hacen que los árboles de decisión sean altamente efectivos para el análisis en contextos complejos, como el proyecto MlabNariño, donde se busca entender cómo múltiples variables pueden influir en los resultados de salud de pacientes con COVID-19.

Para el proyecto MlabNariño, los árboles de decisión se seleccionaron, debido a que este modelo permitió prever ciertos resultados con alta precisión, y fue

especialmente útil en casos donde las relaciones entre variables no eran lineales. Además, los árboles de decisión utilizan métricas de importancia, como el índice de Gini, la entropía y la suma de cuadrados de los residuos (RSS), para mejorar la precisión en la clasificación y predicción de los datos:

- **Índice de Gini.** El índice de Gini mide la pureza de los nodos en un árbol de decisión, evaluando el error de clasificación y buscando minimizarlo en cada división. Este índice se calcula según la fórmula (2):

$$Gini = 1 - \sum_{i=1}^n (p_i)^2 \quad (2)$$

donde

p_i es la probabilidad de que un ejemplo pertenezca a la clase i .

- **Entropía.** La entropía mide el grado de desorden en el sistema, lo que ayuda a seleccionar las divisiones más efectivas en el árbol. Cuanto menor sea la entropía, más equilibrado y preciso será el nodo resultante en la predicción. La fórmula de la entropía es (3):

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

donde

H representa la entropía total del nodo.

- **RSS (residual sum of squares [‘suma de cuadrados de los residuos’]).** La RSS es una medida de discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. El objetivo es minimizar la RSS para mejorar la precisión de las predicciones, especialmente en problemas de regresión. Se calcula según la fórmula (4):

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

donde

y_i son los valores reales y $\hat{y}_i$ son los valores predichos por el modelo.

El uso de árboles de decisión en MlabNariño permitió clasificar y analizar con mayor precisión los factores asociados con el COVID-19, como antecedentes médicos y datos sociodemográficos.

Naïve bayes

El modelo de Naïve Bayes, según Pacheco Leal et al. (2005), es una técnica de ML basada en la teoría de probabilidad, que utiliza frecuencias y probabilidades condicionales para hacer predicciones sobre nuevos casos. Este enfoque es tanto predictivo como descriptivo, lo que lo convierte en una herramienta útil para la clasificación de datos complejos y para proporcionar una interpretación estadística de las relaciones entre variables.

En el proyecto MlabNariño, el modelo de Naïve Bayes se seleccionó debido a su eficacia en el análisis de variables poco o nada relacionadas entre sí. Esta técnica calcula la probabilidad de cada variable de forma independiente, lo cual resulta particularmente útil en situaciones donde existen múltiples características a evaluar. En este caso, Naïve Bayes permitió analizar características de los pacientes, como antecedentes médicos y datos sociodemográficos, de manera independiente y rápida, facilitando una clasificación más eficiente y precisa de los casos.

La fórmula básica de Naïve Bayes es la siguiente (5):

$$P(C | X) = \frac{P(X | C) \cdot P(C)}{P(C)} \quad (5)$$

donde

- $P(C | X)$ es la probabilidad posterior de que ocurra la clase C dados los datos X .
- $P(X | C)$ es la probabilidad de observar los datos X en la clase C .
- $P(C)$ es la probabilidad previa de la clase C .
- $P(C)$ es la probabilidad de observar los datos X en todas las clases.

La probabilidad de un evento o clase puede calcularse mediante la fórmula (6), utilizando las características observadas en los datos, donde cada característica X_i es independiente de las demás:

$$P(C | X_1, X_2, \dots, X_n) = P(C) \prod_{i=1}^n P(X_i | C) \quad (6)$$

Este modelo fue efectivo en el proyecto MlabNariño para clasificar y predecir factores de riesgo relacionados con el COVID-19, proporcionando una forma robusta de identificar patrones y tendencias en los datos clínicos y epidemiológicos.

Trabajo con los datos del proyecto MlabNariño

Una vez definidos los modelos de ML para el proyecto MlabNariño, el siguiente paso fue la depuración y organización de los datos, un proceso fundamental que asegura que los datos sean precisos y estén estructurados adecuadamente para el análisis. Este paso de preprocesamiento es necesario en cualquier proyecto de ML, debido a que los resultados obtenidos dependen en gran medida de la calidad y coherencia de los datos con los que se trabaja. El nivel de complejidad de este proceso puede variar según la forma en que se capturen los datos y cómo estos se integren en los sistemas de análisis y reporte.

La herramienta de captura de datos Mlab, utilizada en el proyecto, permitió almacenar información detallada sobre los pacientes que se hicieron pruebas RT-PCR en el laboratorio molecular del HUDN. En la figura 11 se presenta una muestra de los datos descargados en un archivo de hoja de cálculo, que se empleó para organizar y verificar la información antes de su procesamiento. Esta hoja de cálculo fue un recurso inicial importante para el análisis, dado que ofrecía una visualización completa de las variables seleccionadas en cada prueba de diagnóstico, facilitando la limpieza y estructuración de los datos en un formato adecuado para su análisis posterior. Esto, como se mencionó antes en las fases iniciales, luego, por la cantidad de datos, ya no fue una alternativa viable y se utilizó R y Python.

El trabajo de preparación incluyó la eliminación de datos redundantes, la corrección de valores erróneos y el tratamiento de datos faltantes, garantizando que la información estuviera lista para el procesamiento con los modelos de ML. A partir de esta depuración, el equipo pudo estructurar *datasets* confiables, con los que se generaron reportes detallados y se aplicaron modelos predictivos de ML, optimizando así el análisis de tendencias y patrones de los datos recolectados en relación con la pandemia que se atendía en dicho momento. Esta preparación de datos fue, sin duda, una etapa determinante en la calidad y precisión de los resultados obtenidos en MlabNariño.

Tabla 6. Pantalla hoja de cálculo con datos de Mlab

Barrios. comuna	Datos	Pacientes. are	Pacientes. localidad	Datos	Pacientes. cen_pob	Pacientes. vereda	Datos	Pacientes. ocu	Pacientes. tip	Pacientes. cod
Null			Sibundoy		N/a	N/a		5141	S	Epsic3
Comuna 1		1						9629	C	Eps016
Comuna 2		1						9629	C	Eps016
Null										
Null			1	Mocoa				9622	S	Epsic3
Null										
Comuna 5		1	Pasto					9629	C	Ess118
Comuna 5		1	Pasto					9629	S	Ess118
Comuna 4		1	Pasto					9629	S	Ess118
Comuna 5		1	Pasto					5414	C	Ess118
El encano		1	Pasto					5414	C	Ess118
Null		2	Pasto		Catambuco	Kilómetro 9		9629	S	Ess118
Comuna 3		1	Pasto					7231	S	Ess118
Comuna 4		1	Pasto					7522	C	Eps005
Null										
Comuna 8		1	Pasto					2269	C	Eps016
Comuna 6		1	Pasto					9629	C	Eps005
Null										
Null										
Null		1	Ipiales		N/a	N/a		8323	C	Epsi05
Null										
Null		1	Pasto		N/a	N/a		9629	C	Ess118

Barrios. comuna	Datos	Pacientes. are	Pacientes. localidad	Datos	Pacientes. cen_pob	Pacientes. vereda	Datos	Pacientes. ocu	Pacientes. tip	Pacientes. cod
Comuna 12		1	Pasto					3221	C	Eps037
Buesaquillo		2	Pasto		Buesaquillo	N/a		3152	P	7
Comuna 1		1	Pasto					3339	C	Eps037
Comuna 12		1	Pasto		N/a	N/a		7112	C	Eps016
Null		3	Pasto		Obonuco	Sector santander		9629	S	Ess118
Comuna 5		1	Pasto					9629	S	Ess118
Comuna 2		1	Pasto		N/a	N/a		5221	C	Eps005
Comuna 6		1	Paato		N/a	N/a		4419	C	Eps037
Comuna 3		1	Pasto		N/a	N/a		9629	S	Ess118
Catambuco		3	Catambuco			Via al sur		9629	S	Ess118
Comuna 12		1	Pasto		N/a	N/a		4419	C	Eps016
Null		1	San andres de tumaco		N/a	N/a		2611	C	Eps037
Null		3	Catambuco		Catambuco	Sagrada familia		9629	S	Ess118
Comuna 4		1	Pasto					9629	S	Ess118
Null			Pasto					9629	S	Ess118

Fuente: elaboración propia.



Al preparar los datos para aplicar algoritmos de ML, es común que los primeros conjuntos contengan ruido o información incorrecta. Esto se debe a errores de captura, datos incompletos, valores atípicos o incoherencias en las fuentes de información. Por ello, una fase indispensable en el proyecto MlabNariño fue la depuración de datos, utilizando diversas herramientas computacionales. Dependiendo de la cantidad y complejidad de los datos, esta tarea puede realizarse con lenguajes de programación como Python o R, o en algunos casos, mediante hojas de cálculo. Sin embargo, cuando se trata de grandes volúmenes de datos, como millones de registros, el uso de lenguajes de programación de alto nivel es preferible, ya que estos permiten procesar y limpiar los datos con mayor eficiencia y precisión.

En el siguiente código, se presenta una muestra de este proceso de depuración realizado en el proyecto MlabNariño utilizando el lenguaje de programación Python en un entorno de Jupyter Notebook. Este entorno web permite aplicar comandos de Python en tiempo real, lo que facilita la exploración y limpieza de datos en múltiples etapas. La combinación de Python y Jupyter fue importante en MlabNariño para lograr la calidad de datos requerida, proporcionando un flujo de trabajo que permitió al equipo del proyecto obtener *datasets* robustos y confiables para el análisis y aplicación de los modelos de ML.

Figura 11. Depuración de datos Mlab con Jupyter y Python

```
}

datos["medicamentos_recetados"] = datos["medicamentos_
recetados" ] .map (medicamentos_recetados)

plt.plot()

x_values = datos['medicamentos_recetados' ] . unique()

y_values = datos['medicamentos_recetados']. value_
counts().tolist()

print(y_values, sum(y_values), [100*y/sum(y_values) for y
in y_values])

plt.bar(x_values, y_values)
```

```
plt.xticks(rotation=90)

plt.yticks(rotation=90)

plt.show()

plt.close('all')
```

Fuente: elaboración propia.

A modo de resumen, el primer paso de depuración de los datos de Mlab para la aplicación de ML en el proyecto MlabNariño incluyó las siguientes actividades:

- **Organización de datos en dos grupos.** Se crearon dos conjuntos de datos, uno para pacientes con resultados positivos para COVID-19 y otro para aquellos con resultados negativos, permitiendo análisis específicos según cada grupo.
- **Revisión y tratamiento de registros incompletos.** Se identificaron los registros con información faltante y se evaluaron tres posibles acciones: a) eliminación del registro incompleto; b) completar el registro automáticamente cuando fuera factible; y c) completar el registro de forma manual para garantizar precisión.
- **Eliminación de registros duplicados.** Se localizaron y eliminaron registros duplicados para evitar redundancias y asegurar la calidad de los datos.
- **Categorías y tipos de datos.** Los datos se categorizaron según su naturaleza, diferenciando entre variables numéricas y categóricas o textuales, para facilitar su análisis y procesamiento.
- **Conversión de columnas a valores numéricos.** Las columnas con datos categóricos se transformaron en valores numéricos, lo cual facilitó la aplicación de modelos de ML y optimizó el rendimiento de los algoritmos.
- **Validación final de los archivos.** Se llevó a cabo una revisión exhaustiva para corregir errores por caracteres inválidos, datos en blanco u otros posibles problemas que pudieran interferir en el análisis.
- **Documentación de hallazgos y ajustes realizados.** Se documentó cada hallazgo significativo durante el proceso de depuración, proporcionando un registro útil para futuras referencias y mejoras en los procesos de análisis.
- **Generación de *datasets* finales para positivos y negativos.** Se crearon los conjuntos de datos completos, confiables y listos para el análisis, tanto para el grupo de pacientes positivos como para el de negativos.



Estos pasos permitieron que los *datasets* resultantes fueran adecuados para el análisis y aplicación de modelos de ML en el contexto del proyecto MlabNariño, proporcionando una base confiable para los siguientes niveles de investigación.

Datasets y aplicación de los algoritmos

Luego del proceso de depuración descrito anteriormente, se logró consolidar un *dataset* inicial con más de 150 columnas o variables. Dada la magnitud de los datos, fue necesario ajustar aún más este conjunto para obtener información relevante acerca de los pacientes que acudieron al HUDN para pruebas RT-PCR. Al finalizar la depuración, los datos estaban completos, sin duplicados ni errores de forma, listos para aplicar modelos de ML. Sin embargo, el siguiente desafío fue determinar qué variables priorizar y cómo estructurarlas para su uso en el proyecto.

A continuación, se describen las actividades realizadas junto con la organización de las variables que constituyeron los *datasets* aplicables a ML en el proyecto MlabNariño:

- **Diseño y aplicación de protocolos de caracterización y validación.** Se crearon protocolos para caracterizar, seguir y validar posibles casos de infección, específicamente para COVID-19, a fin de parametrizar y organizar adecuadamente los datos recolectados.
- **Extracción de variables relevantes.** Como resultado, se obtuvieron 33 variables de fichas SIVIGILA, 24 específicas de historias clínicas del HUDN, 36 del aplicativo MlabNariño y 20 de seguimiento a contactos de pacientes positivos para COVID-19. En total, la cantidad de variables fue de 113, que tras un análisis más profundo llegaron a ser más de 150.
- **Organización de variables por categorías relevantes.** Las variables se estructuraron en categorías específicas para facilitar su análisis en ML, incluyendo datos demográficos, socioeconómicos, de prueba, de sintomatología y de seguimiento de contactos.
- **Formulación de preguntas para aplicación en ML.** Se definieron preguntas clave que guiaron el uso de ML en el proyecto, como la probabilidad de hospitalización o el riesgo de secuelas, estableciendo así un enfoque de análisis predictivo para la salud pública.

Tabla 7. Conjuntos datasets y aplicación ML proyecto MlabNariño

Tipo Conjunto	Cantidad Variables	Predicción ML	Modelos Aplicados
Conjunto Síntomas Paciente	21	¿Probabilidad de que el paciente pueda ser hospitalizado? Sí/No	Árboles de decisión, Naïve Bayes (CNB)
		¿Probabilidad de que el paciente pueda perder la vida?	
Conjunto Síntomas-Secuelas Paciente	41	¿Probabilidad de que el paciente pueda padecer una infección respiratoria aguda (IRA) además de COVID?	
		¿Probabilidad de secuelas si no se medica?	
Conjunto de datos sociodemográficos - Secuelas	38	¿Probabilidad de complicaciones según la edad?	

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, las variables seleccionadas para responder las preguntas de la tabla 7 fueron *edad, síntomas como gripe, tos, fiebre, congestión nasal, escalofrío, osteomialgia, adinamia, vómito, náuseas, diarrea, odinofagia, pérdida de gusto y olfato, condición asintomática, dificultad para respirar, cefalea, resultado de supervivencia, hospitalización y necesidad de ingreso en UCI*. Estas 18 variables incluyen 17 independientes y una dependiente, siendo la última “hospitalización”.

Dataset inicial trabajo ML

```
| df_sintomas_mlabnarino | 'edad', 'vive', 'gripa',  
'tos', 'fiebre', 'congestion_nasal', 'escalofrio', 'os-  
teomialgias', 'adinamia', 'vomito', 'nauseas', 'diarrea',  
'odinofagia', 'sin_gusto', 'sin_olfato', 'asintomatico',  
'dificultad_respirar', 'cefalea', 'hospitalizado' |
```

Posteriormente, se realizó una segunda depuración agrupando variables comunes en subgrupos, resultando en cuatro nuevas categorías.

Dataset gripales

```
df_sintomas_mlabnarino['s_gripales'] = ['gripa', 'tos',
    'fiebre', 'congestion_nasal', 'escalofrio']
```

Dataset síntomas pérdida de fuerza en huesos

```
df_sintomas_mlabnarino['s_fuerza_huesos'] = ['osteo-
    mialgias', 'adinamia']
```

Dataset síntomas estomacales

```
df_sintomas_mlabnarino['s_estomacales'] = ['vomito',
    'nauseas', 'diarrea']
```

Dataset síntomas odinofagia y otros

```
df_sintomas_mlabnarino['s_odinofagia_otros'] = ['odin-
    ofagia', 'sin_gusto', 'sin_olfato']
```

El *dataset* definitivo utilizado para el modelo ML incluyó variables como edad, dificultad respiratoria, hospitalización, síntomas agrupados y supervivencia.

Dataset definitivo para ML

```
| df_sintomas_mlabnarino_final | 'edad', 'dificultad_res-
    pirar', 'hospitalizado', 's_gripales', 's_fuerza_huesos',
    's_estomacales', 's_odinofagia_otros', 'vive', 'UCI' |
```

Este conjunto de datos, como se observa en las figuras 11 y 12, se configuró en Python, que fue el lenguaje base para aplicar los modelos ML seleccionados para el proyecto MlabNariño. Esta estructura de datos y variables permitió un análisis robusto y adaptable a distintos escenarios epidemiológicos.

Después de organizar los datos y seleccionar las variables necesarias para responder las preguntas planteadas en la tabla 7, se llevó a cabo un análisis adicional para

evaluar si los datos estaban desbalanceados. Según Hadad et al. (2009), el desbalance en un *dataset* ocurre cuando hay una notable desproporción en las instancias de cada clase, lo que puede llevar a sesgos en el desempeño de los modelos de ML, lo que resultó en falsos positivos o predicciones imprecisas.

Tabla 8. *Dataset final depurado síntomas*

ID	edad	sexo	asintomatico	dificulta_respirar	cefalea	hospitalizado	gripales	fuerza_huesos	estomacales	odinofagia_otros
0	40	1	1	2	2	2	10	4	6	6
1	58	2	2	2	2	1	9	4	6	4
2	83	2	2	2	1	1	10	4	3	6
3	42	1	2	2	2	1	9	4	6	6
4	68	1	2	1	2	1	9	3	6	6
5	57	1	1	2	2	1	10	4	6	6
6	66	1	1	2	2	2	10	4	6	6
7	27	2	1	2	2	2	10	4	6	6
8	43	1	2	1	2	1	9	4	6	6
9	81	1	1	2	2	1	10	4	6	6

Fuente: elaboración propia.

En este caso, se encontró que las variables de interés, como “hospitalizado”, “UCI” y “vive o muere”, estaban desbalanceadas, dado que la mayoría de los registros mostraban que pocos pacientes se hospitalizaron, ingresaron a UCI, o fallecieron. Este desbalance podía afectar la precisión de las predicciones, por lo que se implementaron métodos de balanceo específicos para cada modelo de ML utilizado en el proyecto MlabNariño:

Tabla 9. *Funciones de balanceo aplicadas a los modelos seleccionados*

Modelo	Función de Balanceo	Descripción
Árboles de Decisión	Ajuste por parámetros	Se aplicaron criterios específicos como <code>min_samples_split</code> , <code>min_samples_leaf</code> , <code>max_depth</code> , y <code>class_weight</code> para balancear la clase minoritaria.
Naïve Bayes	ComplementNB	Se utilizó el modelo <code>ComplementNB</code> , una variante del Naïve Bayes estándar que calcula la probabilidad de que una instancia no pertenezca a cada clase, seleccionando la de menor probabilidad (Anagaw y Chang, 2019).

Fuente: elaboración propia.



Con los *datasets* preparados y balanceados, se aplicó un último procedimiento, que fue utilizar PCA (*principal component analysis* ['análisis de componentes principales']), que corresponde a una técnica estadística utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, transformando un conjunto grande de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto más pequeño de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. En los *datasets* del proyecto, su funcionalidad principal fue la de simplificar la complejidad de los datos conservando la mayor parte de la variabilidad presente, lo que permitió eliminar redundancias, facilitó la visualización en tres dimensiones, lo anterior con el fin de mejorar la eficiencia de los algoritmos de aprendizaje automático seleccionados. Acorde con lo anterior, se aplicaron los modelos definidos en la tabla 8 siguiendo estos pasos:

a. Definir variables de entrada y salida

```
y = df_sintomas_mlabnarino_final['hospitalizado']
X = df_sintomas_mlabnarino_final.drop('hospitalizado',
axis=1)
```

b. Dividir el *dataset* en entrenamiento y prueba

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X,
y, train_size = 0.7)
```

c. Ejecutar los modelos según lo especificado en la tabla 8 y validar resultados

- En las figuras 12 y 13 se presentan las implementaciones de los algoritmos y el análisis de sus resultados, evidenciando cómo estos modelos permitieron predecir y analizar diferentes aspectos clínicos de los pacientes con COVID-19 en el HUDN.

Figura 12. Modelo árboles de decisión MlabNariño

```
decision_tree = tree.DecisionTreeClassifier(criteri-
on='entropy',
min_samples_split=5,
min_samples_leaf=2,
max_depth = 7,
class_weight = {1:182.5})
decision_tree.fit(X_train2, y_train2)
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Modelo Naïve Bayes MlabNariño

```
from sklearn.naive_bayes import ComplementNB

from sklearn.metrics import accuracy_score, classifica-
tion_report

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X,
y, test_size = 0.15, random_state = 42)

classifier = ComplementNB()

classifier.fit(X_train, y_train)
```

Fuente: elaboración propia

d. Generar y comparar la matriz de confusión para cada modelo aplicado

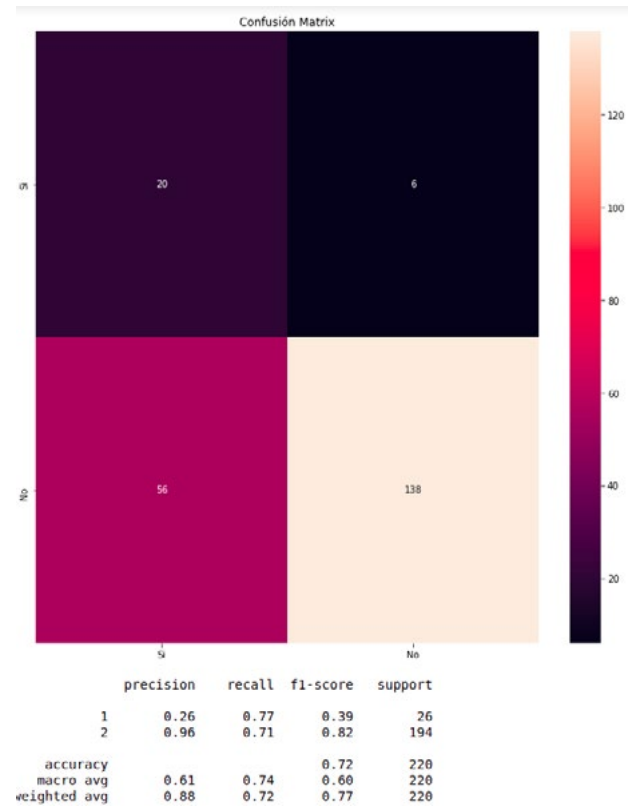
Este paso fue importante para evaluar la eficiencia de cada modelo en relación con los datos utilizados, permitiendo visualizar los aciertos y errores en las predicciones. En la figura 14, se presenta un ejemplo de matriz de confusión obtenida a partir de los algoritmos implementados, la cual muestra el desempeño predictivo y la precisión de cada modelo en el contexto del proyecto.

La matriz de confusión es un reporte fundamental al aplicar un modelo de ML, ya que permite evaluar el desempeño del modelo al revelar tanto los aciertos como los errores en sus predicciones. Este análisis se compone de los siguientes elementos (Moreno Zapata, 2021):

- **Verdaderos positivos (TP).** Casos en los que tanto el valor real como la predicción son positivos (1).
- **Verdaderos negativos (TN).** Casos en los que tanto el valor real como la predicción son negativos (0).
- **Falsos positivos (FP).** Casos en los que el valor real es negativo (0), pero la predicción es positiva (1), indicando una predicción incorrecta.
- **Falsos negativos (FN).** Casos en los que el valor real es positivo (1), pero la predicción es negativa (0), señalando también un error en la predicción.



Figura 14. Ejemplo de matriz de confusión generada con los modelos aplicados en el proyecto MlabNariño



Fuente: elaboración propia.

Evaluación de rendimiento del modelo

Para evaluar el rendimiento del modelo, la matriz de confusión proporciona diversas métricas esenciales.

Exactitud (*accuracy*) (Foody, 2023)

Mide la proporción de predicciones correctas sobre el total de predicciones realizadas, calculada con la ecuación (5).

$$Exactitud = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

Precisión (Foody, 2023)

Indica la consistencia de las predicciones positivas, calculada como la proporción de verdaderos positivos sobre el total de predicciones positivas (6).

$$\text{Presición} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

Sensibilidad o recall

También conocida como *tasa de verdaderos positivos*, mide la proporción de casos positivos correctamente identificados, calculada con la ecuación (7).

$$\text{Sensibilidad} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

Especificidad

Mide la capacidad del modelo para detectar correctamente los casos negativos, utilizando la ecuación (8).

$$\text{Especificidad} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (8)$$

Aplicación del modelo a datos específicos

Tras programar y entrenar los modelos, y con resultados satisfactorios en las matrices de confusión, el modelo puede aplicarse a conjuntos de datos o registros específicos para generar predicciones. En la figura 15, se muestran los resultados generados a partir del uso de aplicación de un modelo de ML. Este proceso permite no solo evaluar la precisión de los modelos, sino también realizar predicciones aplicables en salud pública, contribuyendo significativamente al control epidemiológico y la toma de decisiones en el contexto del proyecto MlabNariño.

Figura 15. Ejemplo de matriz de confusión generada con los modelos aplicados en el proyecto MlabNariño

```
#Test Naive Bayes Complement

#case 1: age: 85, dificultad_respirar = 1, cefalea = 1,
gripales = 5, fuerz_huesos = 2,

#Case 2: age: 25, dificultad_respirar = 2, cefalea = 2,
gripales = 10, fuerz_huesos = 4,

print(classifier.predict([[85, 1, 1, 5, 2, 3, 3],
[25, 2, 2, 10, 4, 6, 6] ]))

#Estimated result: 1-Hospitalized, 2 No Hospitalized

[1 2]
```

Fuente: elaboración propia.

Resultados obtenidos

A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos al aplicar los modelos de ML descritos en los diferentes *datasets* del proyecto MlabNariño. Este análisis responde a las preguntas planteadas en la tabla 8 y muestra solo una parte de las múltiples aplicaciones posibles de la IA, utilizando ML y DL, en el procesamiento de datos de pacientes con pruebas positivas para COVID-19. Los resultados de cada modelo se evaluaron principalmente mediante la métrica de *recall* de la matriz de confusión, que mide la tasa de verdaderos positivos y permite analizar la capacidad del modelo para predecir correctamente los casos positivos.

¿Probabilidad de que el paciente pueda ser hospitalizado de acuerdo con sus síntomas?

Tabla 10. Resultados para probabilidad de hospitalización

Modelo	Recall para 1 (Sí)	Recall para 2 (No)
Árboles de Decisión	0.84	0.89
Naïve Bayes	0.87	0.81

Fuente: elaboración propia.

La tabla 10 muestra que los árboles de decisión tuvieron un buen rendimiento, con un *recall* de 0.84 para predecir hospitalización (Sí) y de 0.89 para no hospitalización (No). El modelo de Naïve Bayes también obtuvo valores aceptables, con un *recall* de 0.87 y 0.81, lo que indica que todos los modelos lograron una tasa de verdaderos positivos superior al 80 %, lo cual es relativamente aceptable para este tipo de análisis.

¿Probabilidad de que el paciente tienda a un desenlace fatal de acuerdo con sus síntomas?

Tabla 11. Resultados para probabilidad de desenlace fatal

Modelo	Recall para 1 (Sí)	Recall para 2 (No)
Árboles de Decisión	0.67	0.50
Naïve Bayes	0.79	0.00

Fuente: elaboración propia.

En esta evaluación, los resultados indican una baja precisión en todos los modelos para predecir un desenlace fatal (véase la tabla 11), especialmente en Naïve Bayes, que obtuvo un *recall* de 0 para la predicción negativa (No). Este bajo rendimiento se atribuye a la limitada cantidad de datos y al marcado desbalance en los casos, lo que dificulta la capacidad del modelo para generar predicciones confiables.



¿Probabilidad de que el paciente pueda padecer una IRA además del COVID-19?

Tabla 12. Resultados para probabilidad de padecer IRA

Modelo	Recall para 1 (Sí)	Recall para 2 (No)
Árboles de Decisión	0.86	0.98
Naïve Bayes	0.43	0.61

Fuente: elaboración propia.

En este caso, el modelo de árboles de decisión demostró un rendimiento bastante bueno, con valores altos de *recall* en ambas predicciones, lo que sugiere un buen balance en el modelo. Sin embargo, el modelo de Naïve Bayes no obtuvo resultados satisfactorios debido a una menor correlación entre las variables.

¿Probabilidad de que el paciente pueda tener secuelas si no toma medicamentos para combatir el COVID-19?

Tabla 13. Resultados para probabilidad de secuelas sin medicación

Modelo	Recall para 1 (Sí)	Recall para 2 (No)
Árboles de Decisión	0.13	0.87
Naïve Bayes	0.48	0.51

Fuente: elaboración propia.

En este escenario, los modelos aplicados no mostraron un rendimiento satisfactorio, con disparidades significativas en los valores de *recall* y baja correlación entre las variables, lo que impide obtener una predicción confiable sobre las secuelas sin medicación.

¿Probabilidad de que el paciente no tenga secuelas si toma remedios caseros?

Tabla 14. Resultados para probabilidad de ausencia de secuelas con remedios caseros

Modelo	Recall para 1 (Sí)	Recall para 2 (No)
Árboles de Decisión	0.89	0.47
Naïve Bayes	0.83	0.60

Fuente: elaboración propia.

Los resultados son prometedores para la predicción de que el uso de remedios caseros puede reducir la probabilidad de secuelas (Sí) en los dos modelos: árboles de decisión y Naïve Bayes. Sin embargo, el valor bajo en la opción de no tener secuelas (No) para árboles de decisión sugiere que aún se necesita entrenar más el modelo para mejorar su precisión y confiabilidad.

Los resultados obtenidos demuestran el potencial de aplicar modelos de ML en el análisis de datos médicos. Si bien algunos modelos mostraron alta precisión, otros requieren mayor refinamiento y balanceo de datos para mejorar su rendimiento. La implementación de estas técnicas en MlabNariño es solo el comienzo; con ajustes y entrenamiento continuos, estas herramientas pueden ser fundamentales para la predicción y la toma de decisiones en salud pública en el futuro.

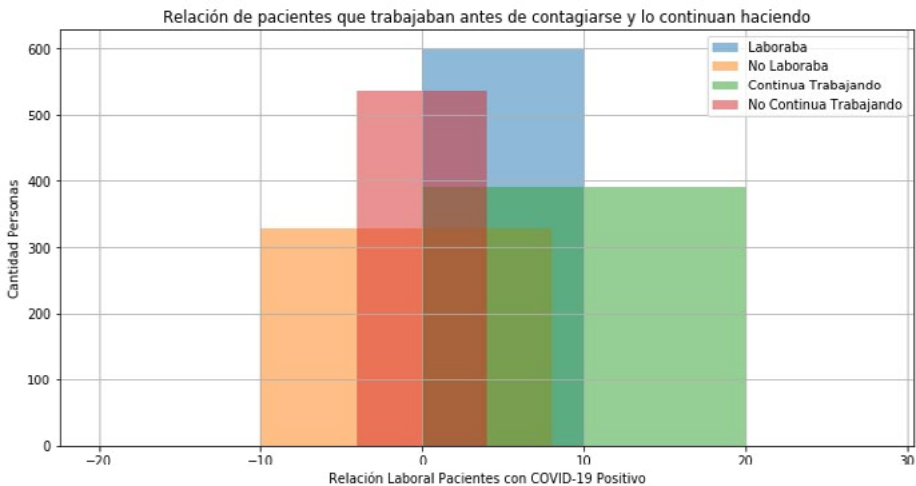
Como parte del análisis de datos y de la generación de resultados mediante la aplicación de ML, el proyecto MlabNariño implementó una aplicación para generar reportes de información, con el fin de facilitar la visualización y comprensión de los modelos aplicados y sus resultados. En las figuras 16 y 17 se presentan algunos de estos reportes preliminares.

En la figura 16 se puede observar un gráfico que muestra la relación de personas que, tras haber padecido COVID-19, mantuvieron su empleo, dejaron de trabajar temporalmente o perdieron su empleo de forma definitiva. Este análisis permite observar cómo la enfermedad afectó la actividad laboral, proporcionando *insights* relevantes para estudios sobre el impacto socioeconómico de la pandemia en la región. Por otro lado, la figura 17 presenta un análisis gráfico de los fallos de bioseguridad más comunes reportados durante la pandemia, identificando los errores más frecuentes en la aplicación de las medidas preventivas. Este tipo de reportes



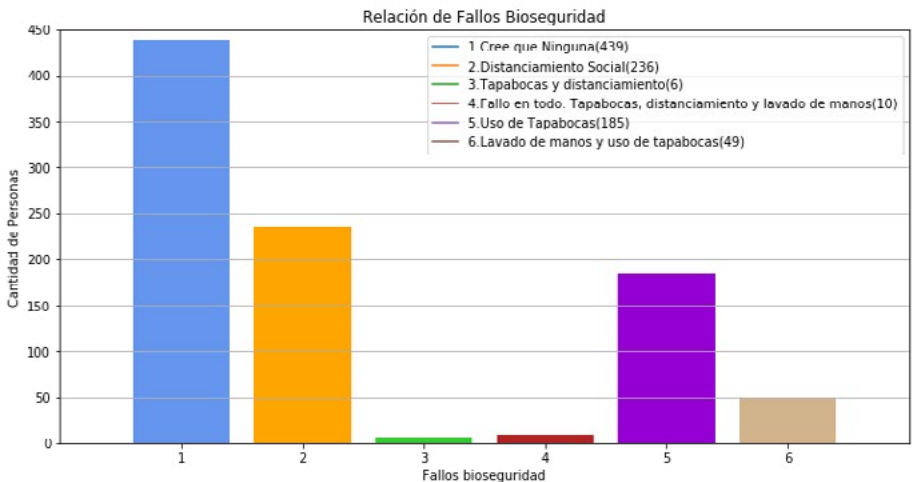
resulta fundamental para ajustar y reforzar protocolos de seguridad en casos de brotes futuros, ayudando a minimizar los riesgos de transmisión en ambientes laborales y sociales.

Figura 16. Reporte gráfico situación laboral personas con COVID-19, proyecto MlabNariño



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Reporte gráfico fallas bioseguridad personas con COVID-19, proyecto MlabNariño



Fuente: elaboración propia.

INTERNET DE LAS COSAS (IOT) COMO SOLUCIÓN EPP

En el proyecto MlabNariño, la aplicación de tecnología IoT (internet de las cosas) se extendió hacia el desarrollo de un innovador equipo de protección personal (IoT-EPP) diseñado específicamente para el laboratorio molecular del HUDN. Este dispositivo prototipo se concibió como una solución de protección para el personal en áreas de alto riesgo, alertando sobre condiciones que puedan aumentar el riesgo de exposición a agentes infecciosos y promoviendo así la seguridad y el monitoreo constante de las condiciones del entorno.

Los EPP (Arenas Soto et al., 2020) son fundamentales para reducir el riesgo de exposición a agentes infecciosos en entornos de salud, y su correcta aplicación es esencial para la seguridad del personal sanitario. Durante la pandemia de COVID-19, se utilizaron diversos EPP en hospitales, como guantes, batas, respiradores y pantallas faciales. Sin embargo, MlabNariño buscó llevar estos elementos de protección a un nivel superior mediante el uso de tecnología IoT, agregando sensores que capturan información en tiempo real sobre condiciones ambientales, tales como la calidad del aire, la temperatura y la humedad en los espacios sensibles del laboratorio.

El IoT-EPP cuenta con sensores para la detección y el monitoreo constante de la calidad del aire, identificando la presencia de partículas que podrían indicar contaminación en el ambiente, lo cual es importante en un entorno donde se manipulan muestras de agentes infecciosos. También incluye sensores de temperatura y humedad que alertan al personal sobre desviaciones fuera de los rangos seguros, las cuales podrían representar un riesgo de contaminación o afectar la estabilidad de las muestras.

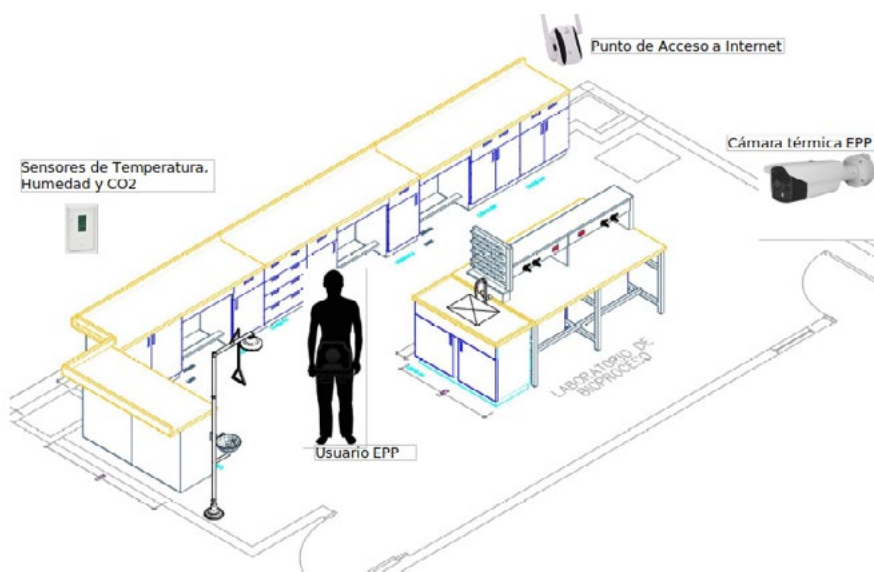
Los datos recogidos por el IoT-EPP son almacenados en una plataforma en la nube, como se describió anteriormente en relación con los servicios de *cloud computing*, lo que permite que el personal de supervisión del laboratorio acceda a estos datos y los monitoree en tiempo real. Esta conectividad asegura que cualquier irregularidad sea detectada de inmediato, permitiendo tomar acciones rápidas para corregir las condiciones ambientales y garantizar un espacio de trabajo seguro.

La implementación del IoT-EPP en el proyecto MlabNariño destaca el potencial de las tecnologías de la 4RI en entornos de salud, promoviendo una visión futurista de los EPP. Al incorporar monitoreo inteligente y proactivo, esta tecnología refuerza las barreras de protección personal y ayuda a mantener la integridad y la seguridad del ambiente de trabajo en el laboratorio molecular del HUDN.

Elementos del IoT-EPP

La solución IoT-EPP diseñada para el HUDN incluye una serie de elementos tecnológicos integrados que permiten monitorear variables ambientales críticas en tiempo real. Según se ilustra en la figura 18, los componentes clave del sistema abarcan sensores, dispositivos de conectividad e infraestructura de red dedicada. A continuación, se detallan los elementos principales que conforman esta solución.

Figura 18. Diseño solución IoT-EPP



Fuente: elaboración propia.

- Sensor de temperatura ambiente: Este sensor monitorea la temperatura en los espacios cerrados del HUDN donde se instalaron los dispositivos IoT-EPP, generando alertas ante variaciones bruscas que podrían afectar la seguridad o el desarrollo de tareas sensibles en dichos entornos.
- Sensor de humedad: Complementario al sensor de temperatura, este dispositivo mide los niveles de humedad ambiental en los espacios monitoreados,

proporcionando datos constantes para asegurar que se mantengan en niveles seguros y adecuados para el trabajo de laboratorio.

- **Sensores de calidad del aire:** En el contexto de la pandemia, el control de la contaminación del aire es fundamental. Este sensor mide la presencia de partículas y agentes potencialmente contaminantes, alertando al personal cuando los niveles superan los límites seguros establecidos.
- **Puntos de acceso a internet (AP):** Estos dispositivos actúan como enlace para enviar los datos capturados por los sensores hacia la nube, instalados en posiciones estratégicas para asegurar una transmisión de datos confiable y sin interrupciones.
- **Sensores de temperatura para neveras y ultracongeladores:** Atendiendo un requerimiento específico del personal del laboratorio, se incorporaron sensores para monitorizar la temperatura en los dispositivos de almacenamiento de reactivos y muestras, garantizando que se mantengan en condiciones óptimas de conservación.
- **Infraestructura de red dedicada:** Para asegurar un funcionamiento continuo y sin interferencias, se creó una red independiente para el IoT-EPP, con acceso directo a internet y a la nube de datos. Esto evita la saturación de la red principal del HUDN y asegura que el flujo de datos sea constante.

El esquema de la red diseñada para la solución propuesta en torno al IoT-EPP incluyó

- **Servicio de internet.** Proporcionado por un proveedor local (ISP), garantiza el acceso constante para el sistema.
- **Almacenamiento en la nube.** Los datos capturados por los sensores se almacenan en la nube, gestionada por un proveedor especializado.
- **Router ISP.** Gestiona la distribución inicial del servicio de internet en las áreas conectadas.
- **Router MikroTik.** Administra y protege el acceso a internet para los dispositivos IoT-EPP, con configuraciones de seguridad específicas para el entorno del laboratorio.
- **Switches.** Distribuyen el servicio de red al laboratorio molecular y al área de Patología, tanto en el primer como en el segundo piso.
- **AP inalámbricos.** Proveen conectividad inalámbrica a todos los dispositivos IoT-EPP, permitiendo que el personal monitoree los datos en tiempo real.
- **Cableado eléctrico.** Asegura el suministro de energía a todos los dispositivos, garantizando su funcionamiento continuo.



Esta infraestructura de red independiente y robusta se propuso para respaldar la operatividad del IoT-EPP, asegurando que el personal del HUDN pueda realizar un monitoreo constante y eficiente del entorno de trabajo, minimizando riesgos y mejorando la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia.

Desarrollo y funcionamiento IoT-EPP

El dispositivo IoT-EPP se diseñó para realizar un monitoreo remoto y constante de las condiciones ambientales en el laboratorio molecular del HUDN. Su objetivo principal es generar alertas en tiempo real cuando los valores de temperatura, humedad o calidad del aire excedan los rangos seguros, permitiendo que el personal a cargo de la seguridad tome acciones rápidas y efectivas para resolver cualquier anomalía. Este sistema de alerta temprana es esencial para proteger tanto al personal como a los pacientes y garantizar la integridad del entorno en el laboratorio.

El desarrollo del IoT-EPP se realizó utilizando una combinación de hardware y *software* libre. Para el hardware, se emplearon tarjetas de desarrollo y sensores de código abierto, lo cual facilitó su adaptación y configuración específicas para el proyecto. En el ámbito del *software*, se optó por herramientas accesibles y robustas: el diseño de la aplicación web se realizó en PHP y Django, mientras que la gestión de la base de datos se manejó con MySQL y MongoDB, sistemas reconocidos por su versatilidad y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos de manera eficiente.

En la figura 18, se presenta un ejemplo de la interfaz de monitoreo en el *front-end* de la aplicación, donde se pueden visualizar en tiempo real los valores capturados de cada variable. Esta interfaz intuitiva y de fácil acceso permite al personal del HUDN vigilar de manera remota las condiciones ambientales en el laboratorio, reforzando así la seguridad y el control en el área molecular. Asimismo, en esta imagen se presenta un panel de la aplicación de la solución IoT-EPP, en el que se muestra el área específica bajo monitoreo, junto con las variables ambientales de interés. En el ejemplo, el corredor 1 del laboratorio molecular del HUDN se monitorea con lecturas detalladas de la temperatura ambiente, la humedad relativa y el nivel de contaminación, lo cual permite al personal verificar las condiciones en tiempo real y con precisión. En este caso, el panel indica una temperatura de 15 °C, que se encuentra dentro del rango normal; una humedad relativa del 38 %, apenas por debajo del rango óptimo de 40-60 %; y un nivel de contaminación de 40, bajo el límite de 50 estipulado por la escala ICA (Santos et al., 2002), lo que garantiza un entorno seguro para el personal en esa área.

Figura 19. Pantalla monitoreo front-end (IoT-EPP)



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 15, se muestra la relación completa de áreas del HUDN que se monitorean con la solución IoT-EPP, desplegada a través del proyecto MlabNariño. Este monitoreo detallado es esencial para la prevención y la detección temprana de situaciones de riesgo, asegurando que cada área cumpla con los estándares ambientales requeridos para un entorno controlado en el laboratorio.

Tabla 15. Relación de áreas y espacios EPP en el HUDN

Zona	Descripción	Cantidad kit T, H, CO ₂	Cámara térmica
1	Laboratorio Molecular – cuarto de Insumos	1	
2	Laboratorio Molecular – área química	1	
3	Laboratorio Molecular – Pasillos principales	1	1



Zona	Descripción	Cantidad kit T, H, CO ₂	Cámara térmica
4	Laboratorio Molecular - Subproductos	1	
5	Laboratorio Molecular – área lavado	1	
6	Laboratorio Molecular – Química	2	
7	Laboratorio Molecular – Hematología	1	
8	Laboratorio Molecular – Especiales	1	
9	Laboratorio Molecular – Microbiología	1	
10	Laboratorio Molecular – área lavado 2	1	
11	Laboratorio Molecular – TBC	2	
12	Laboratorio Molecular – Desembalaje	1	
13	Laboratorio Molecular – Pasillo interno	2	
14	Laboratorio Molecular – Amplificación	1	
15	Laboratorio Molecular – Extracción	1	
16	Laboratorio Molecular – Máster Mix	1	
17	Banco de sangre - Recepción	1	1
18	Banco de sangre - Inmunohematología	1	
19	Banco de sangre - Flebotomía	1	
20	Banco de sangre - Consultorio	1	
21	Consulta externa laboratorio – Fraccionamiento	1	

Zona	Descripción	Cantidad kit T, H, CO ₂	Cámara térmica
22	Consulta externa laboratorio – Cuarto frío	1	
23	Consulta externa laboratorio – pruebas Infecciosas	3	
24	Consulta externa laboratorio – Inmunohematología	1	
25	Consulta externa laboratorio – Almacen Insumos	1	
26	Consulta externa laboratorio – Coloración	1	
27	Consulta externa laboratorio – Sala de Espera	1	1
Total		32	3

Fuente: elaboración propia.

Como se detalla en la tabla 15, el proyecto implementó un total de 32 kits de sensores, integrando tecnología IoT propia de la Cuarta Revolución Industrial (4RI) en el laboratorio molecular del HUDN. Esto convierte al HUDN en una de las primeras instalaciones en incorporar este tipo de tecnología en un laboratorio molecular y en transformar el concepto de EPP, ya que, aunque no es un dispositivo que el usuario lleva consigo, proporciona una protección indirecta al monitorear el ambiente y alertar ante condiciones de riesgo en las áreas de trabajo.

La información capturada por estos sensores incluye datos ambientales en tiempo real de cada área del laboratorio mencionada en la tabla 15. Estos datos se almacenan de manera segura en una nube contratada especialmente para el proyecto, lo que permite su acceso remoto y continuo. En términos técnicos, los datos se registran en una base de datos MySQL en un formato estructurado, con campos que incluyen

`id_registro`, `fecha_registro`, `id_sensor`, `vr_sensor`, `area_hudn`, `hora_reg` y `novedad`

tal como se muestra en la tabla 16.



Esta estructura de datos facilita el monitoreo sistemático y la revisión histórica de las condiciones ambientales, permitiendo una respuesta rápida ante cualquier variación que represente un posible riesgo.

Tabla 16. *Registros en MySQL de los datos capturados por los sensores*

id_reg	fecha_reg	id_sensor	vr_sensor	area_hudn	hora_reg	novedad
202201	22-06-06	LC001	15	Corredor	10:00:35	Ninguna
202202	22-06-06	LC002	38	Corredor	10:00:36	Bajo
202203	22-06-06	LC003	40	Corredor	10:00:37	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

Como se ha descrito, la solución IoT-EPP implementada en el HUDN es un prototipo actualmente en fase de evaluación productiva. Los resultados preliminares obtenidos durante las pruebas y el desarrollo confirman su potencial como un componente esencial para los fines del proyecto. En primer lugar, el IoT-EPP proporciona una herramienta eficaz para monitorear las condiciones ambientales en espacios críticos, alertando automáticamente sobre cualquier desviación de los parámetros normales de temperatura, humedad y calidad del aire. Esta función es fundamental, ya que permite al personal a cargo tomar decisiones informadas que reduzcan el riesgo de exposición a condiciones insalubres, protegiendo así la salud del equipo de trabajo en áreas potencialmente contaminadas.

Además, la investigación plantea el potencial de ampliar las capacidades de esta solución en el futuro, incluyendo sensores adicionales que permitan detectar no solo variables ambientales básicas, sino también sustancias químicas o contaminantes específicos. Esto abriría nuevas posibilidades para el IoT-EPP, que podría entonces servir como una herramienta de prevención más avanzada y precisa para la identificación de riesgos ambientales, mejorando la seguridad de los espacios y asegurando una respuesta inmediata y eficaz frente a amenazas emergentes para la salud.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El impacto de las pandemias es una realidad creciente y de alta prioridad para la salud pública. Científicos y profesionales de la salud coinciden en que las pandemias se presentan como uno de los desafíos más grandes que enfrentará la humanidad y, aunque el COVID-19 fue la primera gran crisis sanitaria de esta generación,

posiblemente no será la última. Es esencial, entonces, que la humanidad esté preparada, no solo con herramientas clínicas de vanguardia, sino también con tecnologías informáticas que permitan anticipar y mitigar los riesgos de futuras emergencias sanitarias.

La IA y, en particular, los algoritmos de ML ofrecen una poderosa capacidad para detectar, clasificar y predecir eventos críticos en salud pública. Su aplicación en situaciones como la pandemia de COVID-19 ha demostrado ser una herramienta precisa y exhaustiva, generando análisis que los métodos tradicionales no pueden alcanzar. Así, el ML se presenta como una tendencia tecnológica indispensable, con aplicaciones que van desde la detección de enfermedades hasta el análisis predictivo para la gestión de crisis sanitarias.

El éxito de los modelos de ML en el ámbito de la salud, sin embargo, depende de la calidad y cantidad de datos disponibles. Disponer de conjuntos de datos bien estructurados y adecuadamente balanceados permite entrenar algoritmos con alta precisión y obtener tasas de recuperación aceptables. Esto, a su vez, refuerza el valor predictivo y la efectividad en la detección de infecciones y secuelas en los pacientes, brindando una herramienta crítica para la toma de decisiones en salud pública. Los resultados obtenidos en el proyecto MlabNariño son susceptibles de muchas mejoras, pero sientan una base sólida que permitirá mejorar la precisión a medida que se amplíe el conjunto de datos y se apliquen nuevas métricas y ajustes en los modelos.

Además, los EPP demostraron ser una barrera importante contra el COVID-19, especialmente para quienes trabajan en primera línea en el sector de la salud. La propuesta IoT-EPP desarrollada en el marco de este proyecto refuerza esta protección mediante la integración de sensores y tecnologías de la 4RI, proporcionando un monitoreo continuo del aire y las condiciones ambientales en el laboratorio molecular del HUDN. Este sistema de alerta temprana complementa las medidas tradicionales de EPP y actúa como un aliado tecnológico que previene y protege al personal ante posibles riesgos de exposición a agentes infecciosos, contribuyendo al fortalecimiento de la infraestructura del laboratorio para responder mejor a futuras amenazas sanitarias.

En conclusión, el proyecto MlabNariño no solo ha dado un paso importante en la aplicación de ML y la tecnología IoT para la salud pública, sino que también marca un precedente para el uso de herramientas avanzadas en el ámbito clínico, al establecer una base tecnológica que, con el tiempo, permitirá al HUDN y a otros centros de salud estar mejor preparados para afrontar los retos de la próxima generación en salud pública.



IMPACTOS DEL PROYECTO MLABNARIÑO

El proyecto MlabNariño ha generado impactos significativos en diversas áreas, beneficiando a más de 22 000 personas mediante la realización de pruebas RT-PCR, de las cuales más de 2600 resultaron positivas para COVID-19. Estos logros han tenido un efecto profundo en la comunidad, la investigación y los servicios del HUDN, demostrando que un enfoque integral y tecnológico puede transformar la gestión de la salud pública.

Para iniciar la descripción de los impactos, es preciso, en estricto apego a la formulación metodológica y a los lineamientos éticos del proyecto, mencionar dónde se originó la fuente para el desarrollo tecnológico, que refiere al proceso de captación de la población de estudio, que requirió, como paso ineludible, la obtención del consentimiento informado. Este procedimiento, fundamental y éticamente necesario, se llevó a cabo con los pacientes que acudieron a las instalaciones del HUDN con indicación clínica para la toma de prueba diagnóstica RT-PCR.

Ahora, la captación de la información de los pacientes no se limitó a la entrega de un documento, sino que implicó un abordaje personalizado. Un profesional designado del equipo investigador se encargó de establecer un diálogo directo con cada paciente, explicando de manera clara y en lenguaje accesible los objetivos del proyecto, la justificación científica y los beneficios esperados en el ámbito de salud pública (es importante recordar que se realizaron más de 22 000 pruebas, lo que significa que este fue el número de veces que se hizo el procedimiento). Durante este espacio, se hizo especial énfasis en el principio de autonomía, aclarando las condiciones de participación y garantizando que esta era de carácter estrictamente voluntario. Como parte fundamental de este protocolo ético, se le aseguró a cada paciente que, en caso de negarse

a participar, dicha decisión no generaría ningún tipo de represalia ni afectaría en absoluto la oportunidad, calidad o continuidad en la prestación de sus servicios médicos y de laboratorio en el HUDN.

Ahora bien, el impacto de esta estrategia de comunicación asertiva y transparente se reflejó de manera directa en la receptividad de la población. A lo largo de la fase de recolección, se evidenció una particularidad muy importante para el proyecto: ningún paciente desistió o rechazó la invitación a vincularse al estudio tras recibir la explicación. Por el contrario, el abordaje empático generó un alto grado de interés y confianza; los pacientes mostraron una actitud colaborativa, reconociendo la importancia de su aporte para la generación de conocimiento científico en el contexto de la emergencia sanitaria. Este impacto se traduce en una tasa de aceptación que garantizó el tamaño de la muestra requerida y minimizó los sesgos por no respuesta.

Como sustento de la legitimidad de este proceso y con el fin de dar cumplimiento a las normativas de ética en investigación y protección de datos personales (*habeas data*), el impacto de esta captación cuenta con evidencias físicas que permitieron el manejo de la información recolectada. Cada consentimiento firmado quedó formalmente registrado mediante la firma del formato correspondiente. La totalidad de estos documentos originales se recolectó, revisó y sistematizó de forma continua durante la ejecución del proyecto. Este archivo físico se encuentra debidamente resguardado, organizado y custodiado en la Unidad de Docencia y Servicio del HUDN. Estos soportes documentales constituyen la evidencia principal que avala el rigor ético del proyecto, garantizando que el uso de las muestras y la información clínica posterior se realizó bajo el pleno conocimiento y autorización de los participantes.

Por otra parte, más allá del exitoso proceso de la fase de captación y recolección de muestras, la ejecución del proyecto MlabNariño generó una serie de impactos estructurales que trascendieron la investigación e incidieron directamente en los ámbitos científico, tecnológico y de salud pública en la región. A continuación, se mencionan algunos.

IMPACTO TECNOLÓGICO Y FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA

Uno de los impactos más significativos fue la optimización de los procesos diagnósticos en el entorno hospitalario, en este caso, del HUDN. La implementación y articulación con el laboratorio de biología molecular (Mlab) permitió estandarizar

los flujos de trabajo para el procesamiento de pruebas RT-PCR. Como soporte y evidencia de ese impacto se encuentran el laboratorio implementado, las bitácoras de uso de los equipos adquiridos y los reportes que se generaron en el proceso, así como los resultados que se entregaron a los pacientes, los cuales demuestran la modernización del área de diagnóstico molecular. En este impacto, es preciso mencionar que, antes del proyecto, el HUDN carecía de un laboratorio molecular para el diagnóstico de enfermedades infecciosas. Con la implementación de esta infraestructura, se posicionó como un referente en la región, ofreciendo servicios que beneficiaron no solo a Nariño, sino también a Cauca, Putumayo y el norte de Ecuador. Este laboratorio continuará sirviendo a la comunidad, enfrentando nuevos retos y fortaleciendo la capacidad de respuesta ante futuras emergencias sanitarias.

IMPACTO EPIDEMIOLÓGICO Y TOMA DE DECISIONES EN SALUD PÚBLICA

La caracterización de las muestras recolectadas bajo estricto rigor ético se tradujo en información epidemiológica de alto valor. El proyecto permitió identificar la presencia del patógeno asociado al COVID-19 y aportar datos fundamentales sobre su comportamiento poblacional, facilitando una respuesta clínica más ágil. En los momentos de pico, se logró conocer patrones de comportamiento de la comunidad; en momentos en que la pandemia dio tregua, se hicieron salidas extramurales y, de manera permanente, se buscó apoyar a la comunidad y fortalecer las acciones de salud pública. Como soportes y evidencias de este impacto, se tienen las bases de datos anonimizadas y depuradas, las cuales se configuraron como *datasets* del proyecto, así como los informes de resultados consolidados y artículos científicos publicados, los cuales sirvieron de insumo para los comités de vigilancia epidemiológica de la institución.

Adicional a lo anterior, el proyecto se alineó con la estrategia PRASS, lo que permitió hacer pruebas masivas de RT-PCR y seguir los contactos de los casos positivos. Esta labor no solo se centró en la capital del departamento de Nariño, sino que también se extendió a municipios como Ipiales, Túquerres, Sandoná y Samaniego. Como se mencionó anteriormente, las campañas extramuros se convirtieron en una herramienta importante, en la que equipos de profesionales se desplazaron para realizar tomas de muestras y seguimientos epidemiológicos en zonas remotas, ayudando a contener la propagación del virus y ofreciendo un apoyo vital a comunidades de bajos recursos, trabajadores de la salud, reclusos y comerciantes. Estas iniciativas lograron brindar seguridad a los ciudadanos al conocer su estado de salud y poder continuar con sus actividades bajo las medidas de bioseguridad adecuadas.

IMPACTO INVESTIGATIVO

El proyecto posibilitó una caracterización integral de la población con diagnóstico de COVID-19 en el departamento de Nariño, identificando una mayor afectación en los estratos socioeconómicos 1 y 2. El análisis evidenció que una proporción relevante de casos positivos cursaba sin síntomas, lo que resaltó la necesidad de estrategias de búsqueda activa, seguimiento preventivo y control comunitario para reducir la transmisión silenciosa. Asimismo, se sistematizó información sobre condiciones de vivienda, patrones de alimentación, nexos epidemiológicos y comorbilidades frecuentes, generando insumos fundamentales para orientar intervenciones focalizadas, fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia y optimizar futuras estrategias de salud pública en el territorio.

Como respaldo de los resultados, el proyecto consolidó una base de datos anonimizada de los casos caracterizados con variables socioeconómicas, clínicas y epidemiológicas, y un informe técnico final en el cual se documentan la metodología, los criterios de inclusión y exclusión, y los principales hallazgos. La evidencia se complementó con tablas y gráficas (que se generan de manera automática en un *software* de reportes), así como con indicadores estadísticos. Además, se contó con los instrumentos de recolección (encuestas, fichas epidemiológicas, formatos de seguimiento y diccionario de datos), registros de seguimiento para la trazabilidad de contactos y verificación de medidas. Finalmente, se soportó la apropiación de los resultados mediante la publicación de informes y artículos de socialización con la comunidad científica.

IMPACTO ACADÉMICO Y GENERACIÓN DE NUEVO CONOCIMIENTO

Uno de los logros más destacados del proyecto fue la creación de un ecosistema de aprendizaje permanente entre la academia y el sector hospitalario. El proyecto sirvió como plataforma para la formación de talento humano de alto nivel, capacitando a profesionales en técnicas que antes no se realizaban de forma rutinaria en la institución. Como evidencia, se tiene la publicación de la Memoria Técnica (este libro), que constituye la evidencia de la sistematización de la experiencia y el conocimiento generado. También se realizaron eventos académicos especializados y formación continua al personal de laboratorio y áreas asistenciales.

LOGROS ADICIONALES DEL PROYECTO

Capacitación del personal

El personal médico y técnico del HUDN se cualificó en nuevas tecnologías para el diagnóstico y el manejo de enfermedades infecciosas, ampliando sus competencias y fortaleciendo el servicio hospitalario.

Desarrollo de herramientas tecnológicas

Se creó una aplicación de *software* para el registro y seguimiento de pacientes con pruebas RT-PCR, facilitando la gestión del cerco epidemiológico y contribuyendo al análisis de datos a gran escala.

Implementación de *machine learning*

La aplicación de modelos de ML permitió analizar datos y desarrollar un modelo preliminar para evaluar el posible comportamiento del virus en algunos pacientes. La tarea continúa y el reto ahora es continuar con esta iniciativa y fortalecer el uso y la aplicación de estas herramientas.

Campañas extramuros

Estas campañas llevaron la toma de muestras a diferentes comunidades, permitiendo un control epidemiológico más amplio y proactivo y favoreciendo el acceso a pruebas diagnósticas en áreas con menor capacidad sanitaria.

Generación de empleo

Durante la ejecución del proyecto, se empleó a enfermeras, bacteriólogas, personal administrativo, desarrolladores de *software* y médicos, contribuyendo al desarrollo económico local y reforzando la respuesta ante la crisis.

Adopción de tecnologías de la 4RI

El proyecto integró tecnologías avanzadas como IoT para monitorear las condiciones ambientales del laboratorio y garantizar la seguridad del personal.

Este enfoque integral y multidisciplinario ha permitido que MlabNariño no solo supere los retos presentados durante la pandemia, sino que también sienta las bases para una gestión más eficiente y avanzada de futuros riesgos epidemiológicos.



GLOSARIO

Aislamiento. Separación de las personas infectadas o sintomáticas de las personas que no lo están para evitar la transmisión a los individuos susceptibles (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Brote. Ocurrencia de dos o más casos de la misma enfermedad que coinciden en tiempo y lugar [47-48].

Caso confirmado. Es aquel individuo que reúne los síntomas que lo identifican como caso y tiene, además, pruebas de laboratorio positivas (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Caso descartado. Es aquel que presenta síntomas que lo identifican como caso, con pruebas de laboratorio confirmatorias negativas (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Caso importado. Individuo que adquirió la enfermedad fuera del área geográfica estudiada (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Caso probable. Individuo que presenta signos o síntomas sugerentes de la enfermedad o evento bajo vigilancia (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Caso. Persona o animal, enfermo o infectado, con características clínicas y epidemiológicas específicas en un tiempo definido (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Casos sospechosos. Individuos que presentan la sintomatología de la enfermedad en estudio, pero cuyo diagnóstico está a la espera de ser confirmado por algún método autorizado. Ej. COVID-19 confirmada por prueba molecular de reacción en cadena de la polimerasa (PCR por sus siglas en inglés) (Botero-Rodríguez et al., 2020).



Cerco sanitario. Son las acciones realizadas por las autoridades sanitarias con el fin de disminuir o evitar la propagación de enfermedades en comunidades (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Contagio. Transmisión de una infección por contacto directo o indirecto (Botero-Rodríguez et al., 2020).

COVID-19. Es una nueva enfermedad causada por un nuevo coronavirus que no se había visto antes en seres humanos. El nombre de la enfermedad se escogió siguiendo las mejores prácticas establecidas por la OMS para asignar nombres a las nuevas enfermedades infecciosas (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020b).

Cuarentena. Separar y restringir el movimiento de personas sanas que pueden haber estado expuestas a una enfermedad contagiosa, muestren o no señales de la enfermedad (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Curva epidemiológica. Sirve para detallar el patrón, la magnitud y la tendencia de la epidemia. En este sentido, se habla de “aplanamiento de la curva”, es decir, el comportamiento de la curva epidemiológica cuando el número de casos activos se mantiene estable y constante en el tiempo, o sea, cuando disminuye la tasa de contagio (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Distanciamiento social. Práctica de comportamiento humano para tomar distancia física respecto de los demás, que debe ser llevada a cabo para disminuir la transmisión y evitar diseminar la infección. Ejemplo del COVID-19: se recomendó una distancia equivalente a los 2 metros (Botero-Rodríguez et al., 2020).

Enfermedad transmisible. Enfermedad infecciosa, causada por un agente contagioso, que se transmite entre personas por contacto directo con un infectado, o por medio indirecto, mediante un vector, animal, producto o ambiente, o por intercambio de fluido contaminado por el agente infeccioso (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Epidemia. Importante aumento de una enfermedad generalmente infecciosa, no habitual en un territorio o grupo de población, que se produce de forma inesperada y que afecta a un número de personas en tiempo corto y de fácil propagación (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Epidemiología. Ciencia esencial de la salud pública, que estudia la dinámica del proceso salud-enfermedad en la población, a fin de intervenir en el curso natural de la misma (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fases o niveles de alerta de la pandemia. Fases que determinan la evolución de una pandemia.

Fase 1. No se ha notificado que un virus que circula entre los animales cause infección en los seres humanos (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fase 2. Se ha confirmado que un virus que circula entre los animales domésticos o silvestres ha causado infección en los seres humanos y, por lo tanto, se considera una amenaza específica en potencia pandémica (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fase 3. Un virus animal o un virus asociado humano-animal ha causado brotes esporádicos o pequeños conglomerados de enfermedad en personas, pero aún no hay una transmisión persona a persona lo suficientemente sostenida como para causar brotes comunitarios (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fase 4. Se reporta la transmisión de persona a persona de un virus capaz de producir brotes comunitarios sostenidos en dos o más países de la OMS (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fase 5. El mismo virus identificado ha causado brotes comunitarios sostenidos en dos más países de una región de la OMS (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fase 6. Además de los criterios de la fase 5, el mismo virus ha causado brotes comunitarios sostenidos por lo menos en otro país en otra región de la OMS (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Fuente de contagio. Persona, animal o ambiente que transmite la enfermedad mediante un contacto mediato o inmediato.

Fuente de infección. Objeto, animal, persona o lugar desde donde el agente infeccioso pasa a un hospedador (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Indicadores de salud. Herramienta que mide en la población distintos aspectos relacionados con la funcionalidad o discapacidad, ocurrencia de enfermedad o muerte, o bien, aspectos relacionados con los recursos y desempeño de los servicios de salud (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Inmunidad colectiva. También conocida como inmunidad de rebaño, se refiere al efecto indirecto de la inmunización masiva por infección o vacunación (o su combinación). Se evidencia por la disminución de la infección en personas vulnerables debido a la inmunización de la mayor parte de la población (Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud, 2020).

Inmunidad. Resistencia o estado general que posee una persona, asociado con la presencia de anticuerpos o células que poseen acción específica contra el microorganismo causante de una enfermedad infecciosa o contra su toxina. La persona inmune posee anticuerpos protectores específicos o inmunidad celular, como consecuencia de una infección o vacunación anterior (Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud, 2020).

Nexo o vínculo epidemiológico. Antecedente de riesgo de contagio, por ejemplo, contacto con un caso confirmado de infección durante su periodo de transmisibilidad o haber estado en una zona de transmisión comprobada (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Notificación de casos. Es el procedimiento medular de la vigilancia por medio del cual los servicios de salud informan rutinaria y obligatoriamente a la autoridad sanitaria sobre la atención de eventos sujetos a vigilancia (Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud, 2020).

Pandemia. Epidemia que se ha extendido por varios países, continentes o todo el mundo y que, generalmente, afecta a un gran número de personas (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

PCR. Reacción en cadena de la polimerasa. Técnica de laboratorio que permite identificar si la persona tiene infección por Covid-19 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2020b).

Periodo de incubación. Lapso que transcurre desde la exposición inicial a un agente infeccioso y la presentación del primer signo o síntoma de la enfermedad que ese agente produce. Varía según la infección (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Prevalencia. Número total de personas (casos nuevos y existentes) que tienen una enfermedad en una población o en un lugar determinado en un momento dado. Es un indicador de la magnitud de una enfermedad, por ejemplo, el número total de personas con tuberculosis en el país en el 2019 (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Pruebas diagnósticas rápidas. Las pruebas de antígenos detectan si un paciente alberga el virus, mientras que las pruebas de anticuerpos detectan si un paciente está o ha estado infectado. Estas pruebas pueden ser de sangre o de saliva. Funcionan con el mismo principio (Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII, 2020).

Segunda ola. Nuevo brote del mismo agente patógeno que se desarrolla una vez ha disminuido el brote inicial. Dependiendo de la enfermedad, puede dar paso a una tercera o cuarta ola hasta que el agente patógeno es erradicado o se hace endémico (Botero-Rodríguez et al., 2020).



REFERENCIAS

- Acosta-Quiroz, J. e Iglesias-Osores, S. (2020). COVID-19: Desinformación en redes sociales. *Revista del Cuerpo Médico del HNAAA*, 13(2), 218-219. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2020.132.678>
- Adams Villalón, Y., Bencomo Hernández, A., Rodríguez Leyva, R., Aquino Rojas, S. y González Díaz, I. (2014). La biología molecular en el estudio de la inmunopatología. *Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia*, 30(4). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=55258>
- Anagaw, A., y Chang, Y.-L. (2019). A new complement naïve Bayesian approach for biomedical data classification. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(10), 3889-3897. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1160-1>
- Arenas Soto, C. M., Castañeda Morales, A., Cáceres Bonilla, C. R., Espinosa Reyes, J., Díaz Díaz, A. L., Pérez Cely, H. C., Motta Beltrán, A., Amador Patarroyo, J. R., Cuellar Ríos, I. C., Torres Pradilla, M., Castellanos Lorduy, H., Gamboa Suárez, L. A., Díaz Gómez, C. J., Victoria Chaparro, J., Muñoz García, L. E., Londoño García, Á. M., Salazar Soto, M., Velásquez Lopera, M., Mosquera Sánchez, H., ... Jaramillo Ayerbe, F. (2020). Recomendaciones para reducir el riesgo de lesiones cutáneas secundarias al uso de EPP frente a la pandemia por SARS-CoV-2/ COVID-19 para el personal de la salud. *Revista de la Asociación Colombiana de Dermatología y Cirugía Dermatológica*, 28(1), 27-40. <https://doi.org/10.29176/2590843x.1488>
- Becerra Sánchez, L. Y. (2020). Tecnologías de la información y las comunicaciones en la era de la Cuarta Revolución Industrial: Tendencias tecnológicas y desafíos en la educación en ingeniería. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(28), 76-80. <https://doi.org/10.31908/19098367.2057>



- Bedoya Jojoa, C. M. (2020). Covid-19: La pandemia del maltrato contra el personal de la salud en tiempos de pandemia. *Interdisciplinary Journal of Epidemiology and Public Health*, 3(1). <https://doi.org/10.18041/2665-427x/ijeph.1.6276>
- Berlanga, V., Rubio Hurtado, M. J. y Vilà Baños, R. (2013). Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. *REIRE: Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 6(1), 65-79. <https://revistes.ub.edu/index.php/REIRE/article/download/reire2013.6.1615/7229/0>
- Botero-Rodríguez, F., Franco, O. y Gómez Restrepo, C. (2020). Glosario para una pandemia: El ABC de los conceptos sobre el coronavirus. *Biomédica*, 40(Supl. 2), 16-26. <https://doi.org/10.7705/biomedica.5605>
- Capron, A., Stewart, D., Hrywkiw, K., Allen, K., Feau, N., Bilodeau, G., Tanguay, P., Cusson, M. y Hamelin, R. C. (2020). In Situ Processing and Efficient Environmental Detection (iSPEED) of Tree Pests and Pathogens Using Point-of-Use Real-Time PCR. *PLOS ONE*, 15(4), e0226863. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226863>
- Castillo, A. M. y Jurado, J. A. (2014). *Caracterización social y económica del departamento de Nariño. Análisis de información secundaria*. Plan de Energización Rural Sostenible. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.13584.76804>
- Castro, J. M. M., Valencia, R. E. C. y Hilario, V. A. (2011). Desarrollo rápido de aplicaciones y puesta a punto. *Revista Vínculos*, 8(1), 194-199. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/4181>
- Centro de Salud Intercultural. (2020). *Intervenciones de salud con enfoque intercultural en Colombia*. CESI.
- Cusumano, M. (2010). Cloud computing and SaaS as new computing platforms. *Communications of the ACM*, 53(4), 27-29. <https://doi.org/10.1145/1721654.1721667>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021). *Impacto socioeconómico y dinámicas laborales durante la pandemia en Colombia*. Presidencia de la República.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Índices de pobreza multidimensional en Colombia*. Ministerio de Hacienda y Crédito Público.

- Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Impacto socioeconómico del COVID-19 en los departamentos fronterizos de Colombia*. Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- Díaz Pinzón, J. E. (2021). Efecto de la aplicación de vacunas contra COVID-19 sobre la nueva incidencia de los índices de mortalidad por SARS-CoV-2 en Colombia. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 30(Supl. 1), 51-55. <https://doi.org/10.31260/repertmedcir.01217372.1231>
- Escudero Brito, A. E. (2022). *Informe de modalidad de grado de práctica social, empresarial solidaria* [Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7e1fc70a-9d1c-462e-be46-65d1bbdc2133/content>
- Evans, D. (2011). *Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo* [Informe técnico]. Cisco Internet Business Solutions Group. https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf
- Forero-Corba, W. y Negre Bennasar, F. (2023). Técnicas y aplicaciones del *machine learning* e inteligencia artificial en educación: Una revisión sistemática. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 27(1), 209-253. <https://doi.org/10.5944/ried.27.1.37491>
- Friedman, M. (1995). La Segunda Revolución Industrial. *Ciencia Política: Revista Trimestral para América Latina y España*, 38, 49-58. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4415514>
- Gobernación de Nariño. (2020). *Informe sobre la capacidad hospitalaria y respuesta ante la emergencia del COVID-19 en Nariño*. Gobierno de Colombia.
- Gorelik, E. (2013). *Cloud Computing Models* [Tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology]. MIT Open Scholarship. <http://hdl.handle.net/1721.1/79811>
- Grupo ASIS. (2021). *Análisis de la situación de salud del departamento de Nariño con el modelo de los determinantes sociales. Diagnóstico en salud*. Oficina de Epidemiología, Subdirección de Salud Pública, Instituto Departamental de Salud de Nariño. https://web.archive.org/web/20220823124317/https://www.idsn.gov.co/images/documentos/epidemiologia/asis/Departamento_Nari%C3%B1o_ASIS_2021.pdf

- Grupo de Análisis Científico de Coronavirus del ISCIII. (2020). *Glosario de términos epidemiológicos*. Instituto de Salud Carlos III, Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España. https://repisalud.isciii.es/bitstream/handle/20.500.12105/9558/GlosarioTerminosEpidemiologicos_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hadad, A., Evin, D. y Drozdowicz, B. (2009). Modelo para el tratamiento de datos desbalanceados basado en redes neuronales autoorganizadas. En *XVII Congreso Argentino de Bioingeniería*. <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/5492593>
- Hernández-Aguado, I. (2012). *Manual de epidemiología y salud pública: Para grados en ciencias* (2.ª ed.). Médica Panamericana.
- Hernández-Rangel, R. I., Navarro, J. C., Arias, Y. E., Ramírez-Iglesias, J. R., Herrera, L. y Fernández-Baca, M. V. (2020). Bioseguridad en laboratorios de diagnóstico molecular de SARS-CoV-2 (COVID-19) mediante RT-qPCR. *CienciaAmérica*, 9(2), 207-226. <https://doi.org/1654623453>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2026). *Dirección de Gestión de Información Geográfica*. <https://www.igac.gov.co/el-igac/areas-estrategicas/direccion-de-gestion-de-informacion-geografica>
- Instituto Nacional de Salud. (2021). *Boletín epidemiológico: Respuesta de las UCI en Nariño durante los picos del COVID-19*. Ministerio de Salud y Protección Social.
- Johnson, G., Zubrzycki, A., Henry, M., Ranadheera, C., Corbett, C., Meyers, A. F. A., Sandstrom, P. A. y Becker, M. G. (2021). Clinical evaluation of the GeneXpert® Xpert® Xpress SARS-CoV-2/Flu/RSV combination test. *Journal of Clinical Virology Plus*, 1(1-2), 100014. <https://doi.org/10.1016/j.jcvp.2021.100014>
- Suárez Alonso, A. G. (2020). La salud mental en tiempos de la COVID-19. *Revista Española de Salud Pública*, 94, e202010126. <https://ojs.sanidad.gob.es/index.php/resp/article/view/672>
- Maldonado, C. P., Zunino, B. R. W. y Rodríguez, F. A. F. (2020). La importancia de las plantas medicinales, su taxonomía y la búsqueda de la cura a la enfermedad que causa el coronavirus (COVID-19). *Ecología*, 55(1).

- Manrique, L. (2021). Impacto del COVID-19 en las festividades y la cultura en Nariño. *Revista de Estudios Culturales*, 12(3), 67-79.
- Mansilla, E. C., Moreno, R. C., Díaz, J. C. R., Serrano, G., Escartín, N. L. y Arriaza, M. M. (2017). *Diagnóstico microbiológico de la bacteriemia y la fungemia: Hemocultivos y métodos moleculares*. Sociedad Española de Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica.
- Mayoral, J. L. R. (2006). *Desarrollo económico y educación: Indicios históricos en las primeras “revoluciones industriales”*. Educación XX1.
- Mazzali de Ilja, R. (2004). Notas sobre bioseguridad. Nivel 3 de bioseguridad. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 24(1-2), 105-107. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562004000100020
- McCarthy, J. (2007, 12 de noviembre). *What is Artificial Intelligence?*, Computer Science Department, Stanford University. <https://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>
- Meites, E., Knuth, M., Hall, K., Dawson, P., Wang, T. W., Wright, M., Yu, W., Senesie, S., Stephenson, E., Imachukwu, C., Sayi, T., Gurbaxani, B., Svendsen, E. R., Khoury, M. J., Ellis, B., y King, B. A. (2023). COVID-19 Scientific Publications From the Centers for Disease Control and Prevention, January 2020–January 2022. *Public Health Reports®*, 138(2), 241-247. <https://doi.org/10.1177/00333549221134130>
- Mileniooscuro. (2015, 6 de julio). *Mapa de Nariño (político)*. Wikimedia Commons. https://w.wiki/_ccpM
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2020, abril 6). *Invitación a presentar proyectos que contribuyan a la solución de problemáticas actuales de salud relacionadas con la pandemia de COVID-19*. Gobierno de Colombia. <https://web.archive.org/web/20260316215542/https://minciencias.gov.co/convocatorias/invitacion-para-presentacion-propuestas/invitacion-presentar-proyectos-que-contribuyan>
- Ministerio de Educación Nacional. (2020). *Acceso a la educación superior en Colombia: Análisis de los grupos étnicos*. Gobierno de Colombia.

Ministerio de Salud. (1993). *Resolución 8430. Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud*. Gobierno de Colombia. <https://minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2019). *Políticas de salud pública con enfoque diferencial en comunidades étnicas*. Gobierno de Colombia.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2020a). *Impacto del COVID-19 en las regiones fronterizas de Colombia y la respuesta del sistema de salud*. Gobierno de Colombia.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2020b). *Lineamientos, orientaciones y protocolos para enfrentar la COVID-19 en Colombia*. Gobierno de Colombia. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/lineamientos-orientaciones-protocolos-covid19-compressed.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2020c). *Resolución 385. Por la cual se declara la emergencia sanitaria por causa del coronavirus COVID-19 y se adoptan medidas para hacer frente al virus*. Gobierno de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=119957>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). *Lineamientos para la gestión de muestras durante la pandemia del SARS-CoV-2 (COVID-19) en Colombia* (N.º PSPS02-V2). <https://www2.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/VSP/psps02-lineamientos-gmuestras-pandemia-sars-cov-2-col.pdf>

Moreno Zapata, J. S. (2021). *GRILLA: Grouping Recall Least Lazy Algorithm. Modelo matemático para cobranza selectiva usando técnicas de aprendizaje automático* [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Ligeia. <http://hdl.handle.net/10784/29867>

Norvig, P. y Russell, S. (2013). *Inteligencia artificial* (R. C. Simille, Trad.). Campus. [https://www.kufunda.net/publicdocs/Intelig%C3%Aancia%20Artificial%20\(Peter%20Norvig,%20Stuart%20Russell\).pdf](https://www.kufunda.net/publicdocs/Intelig%C3%Aancia%20Artificial%20(Peter%20Norvig,%20Stuart%20Russell).pdf)

Organización de las Naciones Unidas. (2020). *Informe sobre el impacto de la pandemia en la salud mental y el estigma social*. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/un_policy_brief-covid_and_mental_health_final.pdf

- Organización Mundial de la Salud. (2020a). *A guide to WHO's guidance on COVID-19*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/a-guide-to-who-s-guidance>
- Organización Mundial de la Salud. (2020b). *COVID-19: Impacto y respuesta global en sistemas de salud y economía*. Organización de las Naciones Unidas.
- Organización Mundial de la Salud. (2020c). *Impact of COVID-19 on people's livelihoods, their health and our food systems. Joint statement by ILO, FAO, IFAD and WHO*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.who.int/news/item/13-10-2020-impact-of-covid-19-on-people's-livelihoods-their-health-and-our-food-systems>
- Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. (2020). *COVID-19: Glosario sobre brotes y epidemias. Un recurso para periodistas y comunicadores*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.paho.org/es/documentos/covid-19-glosario-sobre-brotes-epidemias-recurso-para-periodistas-comunicadores>
- Organización Panamericana de la Salud. (2019). *Salud para todos: Desafíos y estrategias en la región andina*. Organización de las Naciones Unidas.
- Organización Panamericana de la Salud. (2020a). *Health of Migrants and Risk of Infectious Diseases in Latin America*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.paho.org/en/migration-and-health-americas>
- Organización Panamericana de la Salud. (2020b). *La vacuna contra el COVID-19 y los desafíos de los movimientos antivacunas*. Organización de las Naciones Unidas.
- Pacheco Leal, S. D., Díaz Ortíz, L. G. y García Flores, R. (2005). El clasificador Naïve Bayes en la extracción de conocimiento de bases de datos. *Ingenierías*, 8(27), 24-33. https://ingenierias.uanl.mx/anteriores/27/27_clasificador.pdf
- Hospital Universitario Departamental de Nariño renovó acreditación ICONTEC. (2021, agosto 18). *Página10*. <https://web.archive.org/web/20210820033052/https://pagina10.com/web/hospital-universitario-departamental-de-nariño-renovo-acreditacion-icontec/>

- Pahl, C. (2015). Containerization and the PaaS Cloud. *IEEE Cloud Computing*, 2(3), 24-31. <https://doi.org/10.1109/mcc.2015.51>
- Planeación HUDN. (2020). *Informe de acreditación*. Hospital Universitario Departamental de Nariño.
- Presidencia de la República de Colombia. (2020, marzo 17). *Decreto 417. Por el cual se declara un estado de emergencia económica, social y ecológica en todo el territorio nacional*. Gobierno de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=110334>
- Qian, L., Luo, Z., Du, Y. y Guo, L. (2009). *Cloud Computing: An Overview*. En M. G. Jaatun, G. Zhao y C. Rong (Eds.), *Cloud Computing* (Vol. 5931, pp. 626-631). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10665-1_63
- Quiroga Caicedo, M. (2019). *Diagnóstico laboratorios de salud pública. Vigencia de 2018*. Dirección de Epidemiología y Demografía, Ministerio de Salud; Organización Mundial de la Salud. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/VSP/diagnostico-laboratorios-salud-publica-2018.pdf>
- Rengifo López, J. D. (2020). La comunidad y el miedo: Comportamiento de la sociedad colombiana durante los meses de cuarentena obligatoria por la crisis del COVID-19. *Miradas*, 15(1), 143-165. <https://doi.org/10.22517/25393812.24474>
- Rodríguez Hernández, L. C. y Rosselli Cock, D. A. (2021). *Impacto de la pandemia por covid-19 en los trabajadores de la salud en Colombia* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Javeriana. <https://doi.org/10.11144/javeriana.10554.57859>
- Rodríguez-Toro, V. A., Garzon, J. E. y López, J. A. (2011). *Control neuronal por modelo inverso de un servosistema usando algoritmos de aprendizaje Levenberg-Marquardt y bayesiano (versión 1)*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1111.4267>
- Roel, V. (1998). *La Tercera Revolución Industrial y la era del conocimiento*. Editorial Universidad Mayor de San Marcos.

- Rubio Martín, S. y Rubio Martín, S. (2021). eHealth y el impacto de la Cuarta Revolución Industrial en salud, el valor del cuidado. *Enfermería en Cardiología*, 28(82), 5-9. <https://revista.enfermeriaencardiologia.com/index.php/aeec/article/view/65>
- Ruiz, A. (2021). *Cumplimiento de normas sanitarias durante el COVID-19 en Colombia*. Universidad Nacional.
- Ruiz-Pérez, J. I. y Aparicio Barrera, J. (2020). Análisis espacio-temporal del incumplimiento de normas legales sobre el confinamiento en Colombia por COVID-19. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 12(3). <https://doi.org/10.22335/rclct.v12i3.1251>
- Salvador Maceira, M. (2019). *Machine learning aplicado al trading* [Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Comillas]. Repositorio Universidad Pontificia Comillas. <http://hdl.handle.net/11531/27863>
- Santos, O. C., Aranda, A. C., Vázquez, A. W., Navarro, P. S. y Montero, R. L. (2002). Utilización de un índice de calidad del aire (ICA) en asentamientos humanos: Resultados preliminares. *Revista Cubana de Meteorología*, 9(2).
- Schwab, K. (2016). *La Cuarta Revolución Industrial*. Debate.
- Secretaría de Educación de Nariño. (2020). *Informe sobre el acceso a la educación en zonas rurales durante la pandemia*. Gobernación de Nariño.
- Souto, M. C. P., Lorena, A. C., Delbem, A. C. B. y Carvalho, A. C. P. de L. F. de. (2003). Técnicas de aprendizaje de máquina para problemas de biología molecular. *Anais. Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*. <https://repositorio.usp.br/item/001329474>
- Tenorio-Abreu, A., Ruiz-Castillo, A., Guzmán-González, A. F., Peña-Monje, A., Saavedra-Martín, J. M. y Franco-Álvarez De Luna, F. (2022). Comparison Between Five PCR Techniques for the Diagnosis of SARS-CoV-2. *Revista Española de Quimioterapia*, 35(4), 401-405. <https://doi.org/10.37201/req/076.2020>



Sello Editorial

Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA
Y A DISTANCIA (UNAD)**

Sede Nacional José Celestino Mutis
Calle 14 Sur 14-23
PBX: 344 37 00 - 344 41 20
Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co

