University–State Technology Transfer for Autosomal STR Forensic Genetics Capacity in Honduras: A Design-Science Use Case and Institutional Roadmap

Karen Oliva[1]; Diana Zelaya[2]; Oneyda Zelaya[3]; Justin Garcia[4]; Angely Suazo[5]; Antonieta Zuniga[6]
[1,,4,5]Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, *karen.oliva@unah.edu.hn, justin.garcia@unah.hn, angely.suazo@unah.edu.hn*
[2,3]Policia Nacional de Honduras, Honduras, *lizethzelaya2010@gmail.com, oneydaespinoza1996@gmail.com*
[6]Ministerio Público de Honduras, Honduras, *antonietazuniga2311@yahoo.com*

Abstract– ***This paper proposes a university and State transfer model to strengthen forensic genetics in Honduras and other countries dependent on external analytical capacities. The work is framed as a design science case use and institutional roadmap, with emphasis on STR typing, allele frequency databases, quality management, bioinformatics, data governance, and applications for public health and population research. The proposed case connects a public university, a state forensic laboratory, health research units, and an ethics and data governance committee. The roadmap is not entirely prospective: the authors have already published autosomal STR frequency datasets for three Honduran ethnic groups, which constitute an implemented component of the allele-frequency domain and set the observed baseline for that indicator. A projected planning scenario, built on provisional equal weights to be calibrated during the pilot, illustrates a 36-month trajectory that would reduce external dependency from 0.82 to 0.28, increase institutional maturity from 0.24 to 0.85, and reduce average turnaround time from 60 to 18 days, provided that training, validation, quality assurance and data stewardship are implemented as coupled capabilities. These values are planning targets, not measurements, and the unit-cost ranges are drawn from international literature on small-jurisdiction forensic workflows and require local validation. The contribution is not a laboratory validation study. It is an operational model, of a public-policy and capacity-building nature, that translates existing forensic genetics standards and Honduran population genetic evidence into a replicable public sector innovation route.***

Keywords-- genetics; university transfer; population genetics; STR; public health genomics; Honduras.

Transferencia de tecnología universidad-estado para la capacidad de genética forense de STR autosómica en Honduras: un caso de uso

Karen Oliva[1]; Diana Zelaya[2]; Oneyda Zelaya[3]; Justin Garcia[4]; Angely Suazo[5]; Antonieta Zuniga[6]
[1,,4,5]Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras, *karen.oliva@unah.edu.hn, justin.garcia@unah.hn, angely.suazo@unah.edu.hn*
[2,3]Policia Nacional de Honduras, Honduras, *lizethzelaya2010@gmail.com, oneydaespinoza1996@gmail.com*
[6]Ministerio Público de Honduras, Honduras, *antonietazuniga2311@yahoo.com*

Resumen– ***Este artículo propone un modelo de transferencia entre universidad y Estado para fortalecer capacidades nacionales de genética forense aplicadas a identificación humana, investigación poblacional y generación de evidencia útil para salud pública. El problema abordado es la dependencia de capacidades externas para análisis especializados, curación de bases de frecuencias alélicas, interpretación estadística, gestión de calidad y formación continua. Se empleó un enfoque de ciencia de diseño, mediante seis etapas documentadas y la construcción de un caso de uso institucional y una ruta de implementación de 36 meses. El modelo articula laboratorio estatal, universidad pública, comité de gobernanza de datos y unidades de investigación en salud. La ruta no es enteramente prospectiva: el equipo ya publicó frecuencias de STR autosómicos para tres grupos étnicos hondureños, componente implementado que fija la línea base observada del dominio de frecuencias alélicas. Como producto científico se presenta una arquitectura operativa mediante DFD, un escenario proyectado de planificación institucional, una matriz de brechas y una ruta de madurez. Bajo los supuestos del escenario, la dependencia externa disminuye de 0.82 a 0.28, la madurez institucional aumenta de 0.24 a 0.85 y el tiempo de respuesta promedio baja de 60 a 18 días. Estos valores son metas de planificación, no mediciones, y los pesos de los índices son provisionales y equiponderados, sujetos a calibración durante el piloto. El artículo no sustituye una validación de laboratorio ni reporta resultados judiciales. Su contribución es una ruta institucional replicable, de naturaleza política y de desarrollo de capacidades, para convertir conocimiento universitario en capacidad pública sostenible.***

Palabras clave-- Genética forense; transferencia universitaria; genética poblacional; STR; gobernanza de datos; Honduras.

I. Introducción

La genética forense es una capacidad científica estratégica porque conecta identificación humana, justicia, investigación de parentesco, búsqueda de personas desaparecidas, control de calidad de bases de datos y análisis de diversidad poblacional. Su valor público aumenta cuando el Estado no solo compra servicios externos, sino que desarrolla capacidades propias para procesar muestras, interpretar perfiles, conservar trazabilidad, estimar frecuencias alélicas y publicar evidencia científica. En sistemas con infraestructura limitada, la dependencia externa puede producir tiempos prolongados de respuesta, costos crecientes, menor aprendizaje institucional y baja soberanía analítica sobre datos genéticos sensibles.

La literatura sobre innovación reconoce que la universidad puede tener un papel ampliado en economías basadas en conocimiento, en interacción con gobierno e industria, como plantea el modelo de triple hélice [1]. La transferencia desde organizaciones públicas de investigación incluye investigación colaborativa, consultoría, uso abierto de equipos, formación especializada, licenciamiento y servicios técnicos [2]. En genética, la pertinencia de este enfoque es evidente porque el acceso equitativo a tecnologías genómicas requiere financiamiento, infraestructura, materiales, personal entrenado y marcos éticos adecuados [3].

La experiencia internacional reciente confirma la pertinencia de esta ruta. Países con jurisdicciones pequeñas, como Bután, externalizaban su análisis forense a laboratorios del Reino Unido e India, enfrentando tiempos prolongados y costos elevados, hasta que en 2023 decidieron establecer un laboratorio propio con apoyo de cooperación internacional. Sin embargo, incluso con infraestructura instalada, los retos de formación de personal y aceptación judicial de evidencia de ADN persisten [4]. Este patrón de dependencia seguida de internalización gradual es relevante para Honduras y otros países de la región que enfrentan restricciones similares.

En identificación humana, los perfiles STR se interpretan con base en loci estandarizados y bases de frecuencia poblacional. El FBI indica que los perfiles forenses STR almacenados en CODIS se componen de uno o dos alelos en 20 loci núcleo, y que el sistema no almacena nombres u otros identificadores personales en la base de datos operacional [5]. Paralelamente, la Comisión de ADN de la International Society for Forensic Genetics ha subrayado la necesidad de control de calidad centralizado para bases de frecuencias alélicas, y STRidER fue propuesto como plataforma pública y curada para mejorar la calidad de datos autosómicos STR [6].

Honduras ya cuenta con antecedentes científicos que justifican una ruta de fortalecimiento local. Se han reportado frecuencias de 15 loci STR en una muestra nacional de 198 individuos [7], frecuencias de 13 loci en comunidades garífunas de la costa caribeña hondureña [8], datos de 23 loci

STR en población Lenca [9] y caracterizaciones recientes en Tawahka y Pech [10], [11]. Estos estudios muestran que la genética forense no debe entenderse solamente como una tecnología de laboratorio, sino como un ecosistema de capacidades que articula población, salud, estadística, bioética, informática y gestión pública.

Adicionalmente, el horizonte tecnológico de la genética forense está evolucionando hacia la secuenciación masiva en paralelo (MPS, por sus siglas en inglés), que permite analizar simultáneamente cientos de marcadores genéticos con resolución a nivel de secuencia, superando las limitaciones de la electroforesis capilar convencional en la resolución de mezclas y el análisis de ADN degradado [12]. También han emergido sistemas de ADN rápido (Rapid DNA), capaces de generar perfiles STR completos en menos de dos horas sin intervención técnica especializada, con concordancias superiores al 99.9% respecto a métodos convencionales [13]. Aunque el modelo propuesto en este trabajo se basa en tipificación STR convencional, la ruta institucional debe contemplar la adopción futura de estas tecnologías como parte de su planificación de sostenibilidad a mediano plazo

II. Problema y objetivo

El problema central es la dependencia de capacidades externas para resolver necesidades forenses y poblacionales que podrían desarrollarse gradualmente dentro del sistema nacional de ciencia, justicia y salud. Esta dependencia aparece en cuatro dimensiones. Primero, en la dimensión analítica, cuando el procesamiento de perfiles STR o la interpretación estadística requieren apoyo externo. Segundo, en la dimensión institucional, cuando los procedimientos operativos, la competencia del personal y la gestión de calidad no están suficientemente documentados. Tercero, en la dimensión de datos, cuando las frecuencias alélicas y los metadatos poblacionales permanecen dispersos o sin controles de acceso. Cuarto, en la dimensión de salud e investigación, cuando los datos agregados no se transforman en conocimiento útil para comprender diversidad poblacional, migración, parentesco o necesidades de medicina personalizada futura.

El objetivo de este trabajo es elaborar un caso de uso y una ruta institucional para transferir conocimiento universitario hacia capacidades estatales de genética forense, con aplicaciones en salud e investigación poblacional. El producto esperado es un modelo operativo que pueda ser evaluado por indicadores de madurez, reducción de dependencia, tiempo de respuesta, calidad analítica y gobernanza de datos. Una matriz con los elementos a considerar se muestra en la Tabla I.

III. Materiales y métodos

Se utilizó un enfoque de ciencia de diseño. conforme al ciclo de seis etapas de Peffers et al. [14]: identificación del problema, definición de objetivos de la solución, diseño del artefacto, demostración mediante un escenario proyectado, evaluación por indicadores y comunicación. El artefacto construido es una ruta institucional compuesta por procesos, indicadores, roles, controles y entregables. El punto de partida fue una revisión orientada por estándares y literatura verificable sobre transferencia tecnológica, acceso a genómica, STR forenses, control de calidad de bases alélicas y estudios poblacionales hondureños.

La búsqueda se ejecutó en PubMed, Scopus y Web of Science entre enero y marzo de 2026, con los descriptores "forensic genetics", "STR", "technology transfer", "laboratory capacity building", "ISO/IEC 17025" y "Honduras", restringida a publicaciones en inglés y español de los últimos veinte años, complementada con documentos normativos de organismos internacionales y con búsqueda hacia atrás en las listas de referencias. Los criterios de inclusión fueron la pertinencia para el diseño de capacidades institucionales, la verificabilidad de la fuente y la disponibilidad de datos poblacionales hondureños. Esta revisión no pretende ser sistemática, sino funcional para el diseño de un modelo de implementación.

Para permitir la réplica del procedimiento, el artefacto se construyó en cuatro pasos documentados. Primero se definieron cinco dominios de capacidad (tipificación STR, frecuencias alélicas, bioestadística, calidad y gobernanza) a partir de los requisitos de ISO/IEC 17025 [15] y de las recomendaciones de la Comisión de ADN de la ISFG [6]. Segundo, cada dominio se desagregó en capacidades observables con un producto verificable y un indicador asociado (Tabla I). Tercero, cada capacidad se puntuó en una escala ordinal de cinco niveles, de 0 (inexistente) a 1 (documentada, auditada y sostenida), mediante consenso del equipo autor, que integra personal universitario, policial y del Ministerio Público. Cuarto, las trayectorias temporales se proyectaron asumiendo avance lineal entre hitos de fase, salvo en calidad, donde se asumió avance retardado por la acumulación de evidencia de auditoría. Cualquier grupo puede replicar este procedimiento sustituyendo los dominios, las capacidades y los pesos por los propios de su contexto.

El caso de uso se estructuró en cinco componentes. El primero es la formación de analistas, docentes y gestores de calidad. El segundo es la validación gradual de métodos STR, con trazabilidad documental y control de calidad. El tercero es la curación de una base de frecuencias alélicas y metadatos anonimizados. El cuarto es la producción de reportes poblacionales reproducibles mediante scripts auditables. El quinto es la creación de un comité de gobernanza que defina acceso, uso secundario, publicación, anonimización y custodia de datos genéticos.

Los valores institucionales reportados en este artículo constituyen un escenario proyectado de planificación y no mediciones empíricas de un laboratorio en operación; por esta razón se presentan como metas verificables y no como resultados de desempeño. Se definieron indicadores

normalizados entre 0 y 1 para madurez institucional y dependencia externa. La madurez por dominio se calculó como promedio ponderado de capacidades documentadas, entrenamiento, validación, calidad y gobernanza. La dependencia externa se modeló como una función decreciente del volumen local procesado y de la existencia de un convenio marco. Esta simulación permite visualizar metas razonables, pero debe sustituirse por datos reales durante la ejecución piloto. La única excepción es el dominio de frecuencias alélicas, cuya línea base es observada y corresponde a los conjuntos de datos STR ya publicados por el equipo para los grupos Lenca, Tawahka y Pech [9]-[11].

TABLA I
MATRIZ COMPACTA DE BRECHAS Y MECANISMOS DE TRANSFERENCIA

Dominio	Brecha inicial	Transferencia	Producto verificable	Indicador
STR	Dependencia externa	Entrenamiento y validación cruzada	SOP y panel local	≥80% perfiles útiles
Frecuencias	Datos dispersos	Repositorio curado	Base STR anonimizada	≥4 grupos priorizados
Bioestadística	Baja capacidad LR y FST	Diplomado y scripts	Reportes reproducibles	≥90% reproducible
Calidad	Trazabilidad parcial	Ruta ISO/IEC 17025	Matriz de competencia	≥75% requisitos críticos
Gobernanza	Acceso no estandarizado	Comité de datos	Política de acceso	100% datasets dictaminados

La expresión general del índice de madurez institucional se definió como:

$$M(t) = \frac{\sum_i w_i C_i(t)}{\sum_i w_i} \quad (1)$$

donde $C_{i(t)}$ representa la capacidad del dominio i en el mes t y w_i su peso institucional. En esta versión del modelo los pesos son provisionales y equiponderados ($w_i = 0.20$ para cada uno de los cinco dominios), decisión que evita atribuir una jerarquía no sustentada por datos. No se trata de pesos estimados empíricamente, sino de valores de partida que deben calibrarse en la fase 1 mediante un panel de expertos con método Delphi, integrado por responsables del laboratorio estatal, del Ministerio Público y de la universidad, y recalibrarse al cierre del piloto con los datos operativos observados. Mientras esa calibración no se realice, las Ecuaciones (1) y (2) deben leerse como una formalización del razonamiento de planificación y no como un instrumento de medición validado. La dependencia externa se definió como:

$$D(t) = 1 - M_a(t) \quad (2)$$

donde $M_a(t)$ es el subconjunto de madurez asociado con autonomía analítica, calidad, bioestadística, datos y formación. La forma funcional decreciente de la Ecuación (2) es una elección de modelado, no un hallazgo empírico; su pendiente deberá ajustarse con los volúmenes reales de procesamiento registrados durante el piloto.

Se estructuró una prueba de rendimiento (benchmark) en cinco cargas de trabajo alineadas con el flujo operativo de tipificación STR. La primera corresponde al control de calidad de la extracción de ADN mediante cuantificación fluorimétrica y verificación de integridad. La segunda evalúa la amplificación multiplex con kits validados para 23 o más loci STR. La tercera corresponde a la separación electroforética y detección de fragmentos en analizador genético. La cuarta carga evalúa la asignación alélica mediante software validado y la generación de perfiles exportables. La quinta evalúa reproducibilidad mediante repetición del flujo completo, comparación de perfiles inter-analista y registro de no conformidades.

IV. CASO DE USO PROPUESTO

El caso de uso se concibe para una alianza entre una universidad pública, un laboratorio estatal de ciencias forenses y unidades de investigación en salud. La universidad aporta capital humano, bioestadística, diseño metodológico, análisis poblacional y publicación científica. El laboratorio estatal aporta cadena de custodia, trazabilidad de muestras, experiencia operativa, controles forenses y mandato institucional. Las unidades de salud aportan preguntas de investigación poblacional, criterios éticos y posibilidades de uso de datos agregados. El comité de gobernanza actúa como órgano de protección, acceso y reciprocidad institucional.

La ruta no propone trasladar datos sensibles a repositorios abiertos sin control. La Global Alliance for Genomics and Health establece que el intercambio responsable de datos genómicos debe proteger bienestar, derechos e intereses de las personas, complementar normas de privacidad, fomentar supervisión responsable y servir como marco para comités de ética y acceso a datos [16]. Por ello, el modelo distingue entre perfiles forenses sujetos a restricciones legales, datos poblacionales anonimizados para investigación y salidas agregadas que pueden publicarse sin comprometer identidades individuales.

El flujo operativo inicia con la priorización de una población o caso institucional. Luego se documenta consentimiento o base legal aplicable, se procesan muestras mediante método validado, se realiza tipificación STR, se ejecuta control de calidad, se calculan parámetros forenses y poblacionales, se depositan datos anonimizados en una base curada y se generan reportes para justicia, salud o academia. El DFD de la Fig. 1 sintetiza las relaciones de datos entre actores, procesos y almacenes.

V. Escenario proyectado de planificación

La Tabla II resume el escenario proyectado. La línea base parte de una dependencia externa alta, una madurez institucional baja, un tiempo de respuesta de 60 días y ausencia de analistas internos certificados para el proceso propuesto. Al mes 36, el escenario plantea una dependencia externa de 0.28, madurez de 0.85, tiempo de respuesta de 18 días, 12 analistas certificados, 18 SOP críticos y 6 subpoblaciones con datos STR curados. La interpretación correcta de estos valores es programática, no probatoria: son metas para dirigir una implementación, no resultados de validación analítica ni mediciones de desempeño. Por esa razón esta sección se presenta como escenario de planificación y no como sección de resultados empíricos.

Conviene distinguir el estatus de cada línea base. Cinco de los seis indicadores parten de estimaciones de consenso del equipo y deben verificarse con registros administrativos durante la fase 0. En cambio, la línea base de subpoblaciones con datos STR curados es un valor observado: el equipo autor ha publicado frecuencias de 23 loci STR autosómicos para los grupos Lenca, Tawahka y Pech [9]-[11], a los que se suman los datos nacionales de 15 loci y los datos garífunas disponibles en la literatura [7], [8]. Estos conjuntos existen, han superado revisión por pares y son la base sobre la cual se construiría el repositorio curado, de modo que el dominio de frecuencias alélicas no parte de cero sino de una capacidad instalada y demostrada. Este componente ya implementado constituye la evidencia parcial de factibilidad del modelo; el resto de la ruta permanece prospectivo.

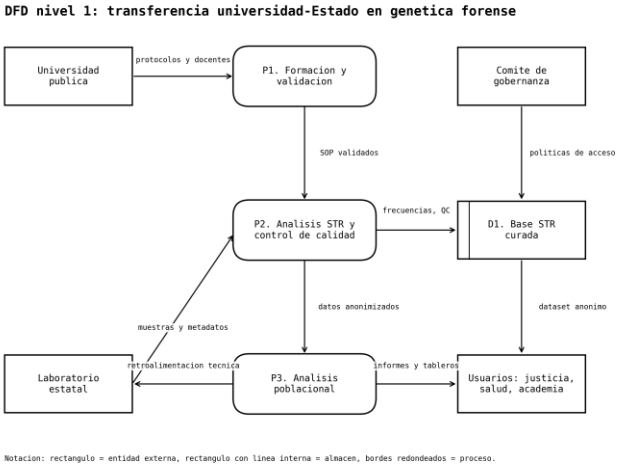


Fig. 1 Diagrama de Flujo de Datos (DFD) de nivel 1 del modelo de transferencia universidad-Estado. Se representan los actores principales (universidad pública, laboratorio estatal de ciencias forenses, unidades de investigación en salud, comité de gobernanza de datos), los procesos centrales (priorización, procesamiento, tipificación, control de calidad, análisis estadístico) y los almacenes de datos (base de frecuencias curada, repositorio de reportes, registro de trazabilidad). Las flechas indican flujos de datos, no flujos de muestras físicas.

TABLA II
Escenario proyectado de planificación institucional (valores modelados, no mediciones)

Indicador	Base	Mes 12	Mes 24	Mes 36
Dependencia externa	0.82	0.62	0.43	0.28
Madurez institucional	0.24	0.48	0.70	0.85
Tiempo de respuesta	60	42	27	18
Analistas internos	0	4	8	12
SOP críticos	1	6	12	18
Subpoblaciones curadas	1	2	4	6

Como referencia de planificación, y no como dato local, la literatura internacional sobre flujos de trabajo forenses en jurisdicciones pequeñas sitúa el costo promedio por perfil STR procesado externamente entre USD 150 y USD 300 por muestra [4], sin incluir tiempos de transporte ni costos de cadena de custodia internacional. En el escenario del mes 36, con un volumen proyectado de procesamiento local, el costo unitario interno podría reducirse a un rango estimado de USD 40–80 por muestra, considerando reactivos, mantenimiento, personal y amortización de equipos. Debe subrayarse que ninguna de estas cifras procede de datos de costo hondureños. Son una analogía con contextos de jurisdicción pequeña cuyos precios de reactivos, salarios, aranceles de importación y costos de mantenimiento difieren de los nacionales, por lo que constituyen un supuesto explícito que requiere validación local mediante un estudio de costeo durante la fase 0, y no una estimación derivada del contexto hondureño. Por la misma razón, este párrafo no debe leerse como parte del escenario cuantitativo de la Tabla II.

La Fig. 2 sugiere que el volumen local de procesamiento reduce la dependencia externa, pero la pendiente mejora cuando existe un convenio marco que permite capacitación continua, acceso compartido a infraestructura, evaluación externa y resolución conjunta de no conformidades. Esta diferencia es importante porque la transferencia no debe reducirse a compra de equipos. La capacidad sostenible exige conocimiento tácito, supervisión, comunidad técnica y financiamiento recurrente.

VI. Ruta institucional

La ruta institucional se organiza en cinco fases, como se muestra n la Tabla III. La fase 0 establece el convenio, el comité interinstitucional y la matriz de brechas. La fase 1 instala la transferencia técnica inicial y los SOP piloto. La fase 2 ejecuta el piloto operativo, con controles positivos y negativos, repetibilidad, reproducibilidad y revisión por pares. La fase 3 escala la base STR curada, los reportes poblacionales y el tablero de indicadores. La fase 4 consolida sostenibilidad, presupuesto plurianual y preparación para preacreditación. Esta secuencia busca equilibrar velocidad, rigor, legitimidad y continuidad institucional.

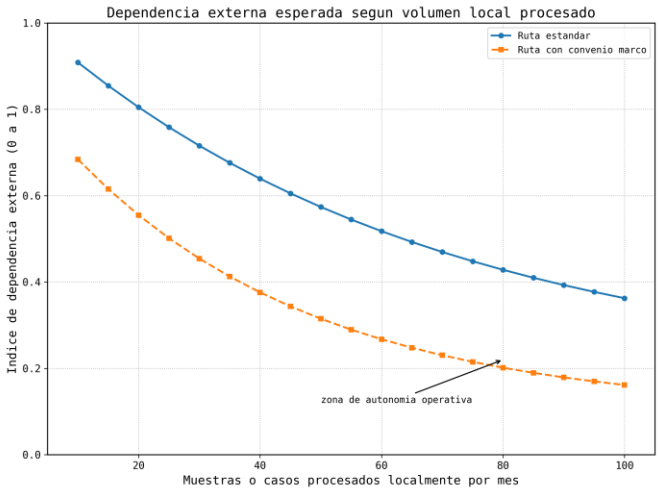


Fig. 2 Escenario proyectado. Dependencia externa estimada en función del volumen local de perfiles STR procesados mensualmente. Se comparan dos escenarios: sin convenio marco (línea discontinua) y con convenio marco de colaboración universidad-Estado (línea continua). La dependencia se calcula según la ecuación (2). El convenio marco acelera la reducción de dependencia al facilitar capacitación continua, acceso compartido a infraestructura y resolución conjunta de no conformidades. Las curvas se derivan de los supuestos de modelado descritos en la Sección III y no de volúmenes observados.

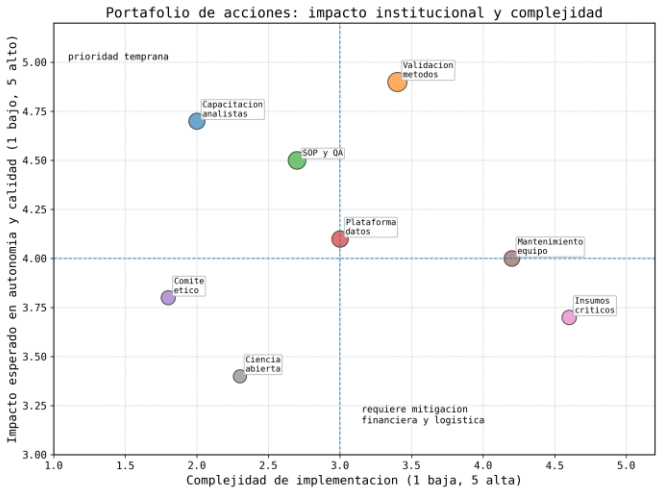


Fig. 3 Escenario proyectado. Portafolio de acciones estratégicas clasificadas por impacto institucional (eje vertical) y complejidad de implementación (eje horizontal). Las acciones de alto impacto y complejidad moderada (capacitación de analistas, documentación de SOP) se ubican como prioridades tempranas. La validación de métodos ocupa la posición de máximo impacto. La plataforma de datos y el comité ético se identifican como habilitadores transversales indispensables para la gobernanza y la confianza social. La posición de cada acción refleja el juicio del equipo autor y debe revisarse con los actores institucionales en la fase 0.

Como mecanismo de validación externa de calidad, la ruta debe incorporar la remisión de datasets de frecuencias alélicas a la plataforma STRidER, que aplica control de calidad previo a la publicación. La inclusión de datos hondureños en STRidER constituiría un indicador verificable de calidad internacional y facilitaría la comparación de frecuencias con poblaciones de referencia [17].

TABLA III
RUTA INSTITUCIONAL DE IMPLEMENTACIÓN

Fase	Periodo	Objetivo	Entregable	Criterio
0	0 a 3 meses	Gobernanza	Plan maestro	Convenio aprobado
1	4 a 9 meses	Transferencia inicial	SOP piloto	Analistas autorizados
2	10 a 18 meses	Piloto	Benchmark técnico	≥80% perfiles útiles
3	19 a 30 meses	Escala	Repositorio	Datos aprobados
4	31 a 36 meses	Sostenibilidad	Preacreditación	≥75% requisitos

La Fig. 3 prioriza acciones por impacto y complejidad. La capacitación de analistas y la documentación de SOP tienen alto impacto con complejidad moderada, por lo que deben iniciar temprano. La validación de métodos tiene impacto máximo, aunque exige coordinación técnica y evidencia. El mantenimiento de equipos y los insumos críticos presentan complejidad alta y deben atenderse con mitigaciones financieras. La plataforma de datos y el comité ético se ubican como habilitadores transversales, porque sin ellos la transferencia produciría resultados técnicos, pero no necesariamente gobernanza o confianza social.

VII. GOBERNANZA, ÉTICA Y SEGURIDAD

La genética forense aplicada a salud e investigación poblacional exige una separación estricta entre fines. Los datos de identificación humana deben tratarse bajo reglas forenses, cadena de custodia y restricciones legales. Los datos poblacionales anonimizados pueden utilizarse para investigación, siempre que cuenten con aprobación ética, minimización de variables, control de acceso, acuerdos de uso y registro de trazas. Los resultados agregados pueden tener valor para salud pública, docencia, antropología genética y planificación científica, pero no deben habilitar vigilancia genética indiscriminada ni inferencias estigmatizantes sobre grupos. Existen múltiples riesgos a considerar como los que se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV
RIESGOS PRINCIPALES Y CONTROLES PROPUESTOS

Riesgo	Control	Responsable	Indicador
Privacidad genética	Anonimización y comité de acceso	Gobernanza	100% dictamen
Reactivos	Stock crítico y proveedores alternos	Laboratorio	≥3 meses
Calidad	Controles y revisión por pares	Unidad QA	Repetición ≤5%
Uso secundario	Acuerdos de uso y auditoría	Universidad y Estado	0 accesos no autorizados

La gobernanza propuesta incluye un comité de acceso a datos, una política de anonimización, revisión de protocolos, acuerdos de uso, auditoría de accesos, reglas de publicación y mecanismos de retorno de beneficios. Esta estructura es

especialmente importante en poblaciones indígenas y afrodescendientes, donde la investigación genética debe considerar autonomía, participación, reciprocidad y riesgo de uso secundario no autorizado.

La construcción de bases de frecuencias genéticas forenses plantea consideraciones éticas específicas que trascienden el marco del consentimiento informado clásico. D'Amato et al. han propuesto un marco para la concepción y desarrollo ético de bases de frecuencias genéticas forenses, enfatizando la necesidad de protocolos de acceso diferenciados según el nivel de sensibilidad del dato, la participación comunitaria en la gobernanza y la transparencia en los criterios de inclusión poblacional [18].

La Fig. 4 muestra que los dominios con avance más rápido son gobernanza y bioestadística, debido a que dependen principalmente de acuerdos, formación y organización documental. La calidad ISO/IEC 17025 avanza de forma más lenta porque requiere evidencia acumulada, competencia documentada, auditoría interna, acciones correctivas y control robusto de registros. ISO/IEC 17025 es pertinente porque define requisitos de competencia, imparcialidad y operación consistente para laboratorios de ensayo y calibración [15].

El uso de sistemas de ADN rápido en contextos de control fronterizo y migración plantea preocupaciones éticas adicionales que deben considerarse en la planificación nacional. Programas piloto en la frontera sur de Estados Unidos han utilizado Rapid DNA para verificar vínculos biológicos familiares en solicitantes de asilo, pero han sido cuestionados por la literatura bioética y jurídica respecto a la voluntariedad del consentimiento, la definición restringida de familia y las implicaciones de la negativa a someterse a la prueba [19]. Cualquier ruta nacional de fortalecimiento forense debe anticipar estos escenarios y establecer protocolos específicos que protejan a poblaciones vulnerables.

VIII. Discusión

El modelo propuesto convierte la transferencia en una ruta de capacidades, no en un evento aislado. Su premisa es que un laboratorio estatal puede sostener genética forense de calidad si recibe transferencia universitaria continua en cinco planos: conocimiento técnico, cultura de calidad, estadística reproducible, gobernanza de datos y producción científica. Esta integración disminuye dependencia externa porque el conocimiento queda incorporado en personas, procedimientos, repositorios y redes institucionales.

La evidencia hondureña reciente fortalece la plausibilidad del modelo. La existencia de estudios STR en muestras nacionales, Garífuna, Lenca, Tawahka y Pech muestra que hay base científica para construir frecuencias locales y análisis poblacionales [7]-[11]. La contribución de estas publicaciones no se limita a la identificación forense. También aporta evidencia sobre diversidad, estructura poblacional y pertinencia de parámetros estadísticos, aspectos relevantes para salud pública, medicina genómica futura y docencia universitaria.

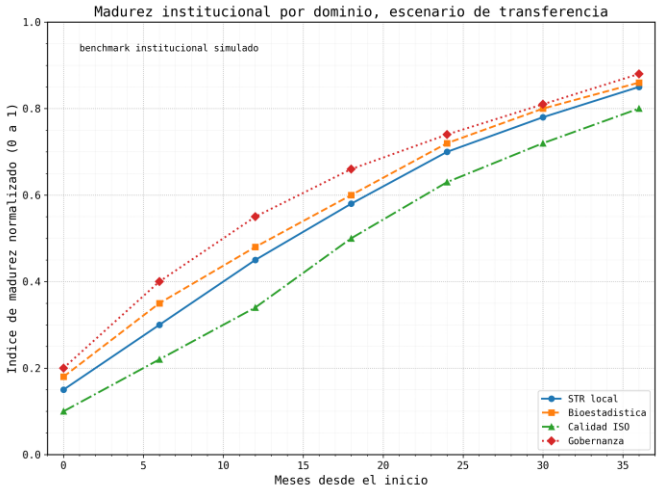


Fig. 4 Escenario proyectado. Evolución de la madurez institucional por dominio durante el escenario de transferencia de 36 meses. Se representan cinco dominios: tipificación STR, frecuencias alélicas, bioestadística, calidad ISO/IEC 17025 y gobernanza de datos. Los valores se expresan como índices normalizados entre 0 y 1, calculados según la ecuación (1). La gobernanza y la bioestadística presentan las trayectorias de avance más rápidas por depender principalmente de acuerdos institucionales y formación, mientras que la calidad ISO/IEC 17025 requiere evidencia acumulada y auditoría. Las trayectorias corresponden a proyecciones con pesos provisionales equiponderados, no a mediciones de madurez observada.

Una ventaja del modelo es que puede implementarse de forma incremental. No exige crear desde el primer año un laboratorio plenamente acreditado ni una infraestructura genómica compleja. La ruta prioriza pilotos controlados, SOP, entrenamiento, QC, scripts reproducibles y gobernanza. Sin embargo, el modelo tiene limitaciones. El escenario cuantitativo es proyectado y debe ser reemplazado por mediciones de desempeño real. La disponibilidad de reactivos, mantenimiento de equipos, estabilidad presupuestaria y rotación de personal pueden afectar el avance. Además, toda ampliación hacia salud pública debe pasar por evaluación ética específica y no puede extrapolar directamente reglas forenses a investigación biomédica.

Debe precisarse además la naturaleza de la contribución: este trabajo no presenta una innovación algorítmica ni una validación analítica de laboratorio, sino un diseño institucional orientado a política pública y desarrollo de capacidades, por lo que su evaluación corresponde a los criterios propios de ese tipo de contribución. Por último, la evidencia de implementación disponible se limita al dominio de frecuencias alélicas; los dominios de calidad, bioestadística y gobernanza no cuentan todavía con componentes operando, y su factibilidad permanece como hipótesis de trabajo.

El contexto latinoamericano presenta particularidades que refuerzan la necesidad de modelos como el propuesto. La

adopción de tecnologías forenses avanzadas en la región enfrenta barreras de infraestructura, formación, financiamiento y marcos regulatorios que no se resuelven únicamente con adquisición de equipos. Revisiones recientes sobre las perspectivas de la genética forense confirman que la brecha entre laboratorios de países desarrollados y en desarrollo persiste, especialmente en la adopción de MPS y en la integración de datos con bases internacionales, y que la cooperación académica constituye un mecanismo clave para reducir estas asimetrías [20].

Desde una perspectiva tecnológica y de negocios públicos, la propuesta genera valor por sustitución gradual de servicios externos, reducción de tiempos de respuesta, aumento de publicaciones, formación de talento especializado y creación de una cartera de servicios estatales. El retorno no debe medirse solo en ingresos, sino en autonomía científica, resiliencia institucional, calidad judicial, capacidad de respuesta ante crisis y producción de bienes públicos de conocimiento.

IX. Conclusiones

La transferencia entre universidad y Estado puede ser una estrategia viable para fortalecer genética forense en contextos con dependencia de capacidades externas. El caso de uso propuesto integra análisis STR, control de calidad, bioestadística poblacional, gobernanza de datos y ruta de preacreditación. El escenario proyectado describe una trayectoria institucional plausible, con reducción de dependencia, aumento de madurez y mejora de tiempos de respuesta en 36 meses. Estas cifras son metas de planificación construidas con pesos provisionales, no mediciones; la única línea base observada corresponde a las frecuencias STR ya publicadas para tres grupos étnicos hondureños. La principal contribución del artículo es una ruta replicable que traduce conocimiento académico en capacidad pública, con aplicaciones para justicia, salud e investigación poblacional. La siguiente etapa debe consistir en ejecutar un piloto real, medir indicadores operativos, documentar no conformidades, ajustar el modelo y publicar resultados empíricos auditables.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido del Instituto de Investigación en Ciencias Médicas y Derecho a la Salud (ICIMEDES) de la Facultad de Ciencias Médicas (FCM) y la Dirección de Investigaciones Científicas, Humanísticas y Tecnológicas (DICIHT) todas ellas de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH).

Referencias

[1] H. Etzkowitz and L. Leydesdorff, “The dynamics of innovation: From National Systems and ‘Mode 2’ to a Triple Helix of university–industry–government relations,” *Res. Policy*, vol. 29, no. 2, pp. 109–123, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0048-7333(99)00055-4.

[2] A. Aridi and A. Kapil, *Technology Transfer from Public Research Organizations: A Framework for Analysis*. Washington, DC, USA: World Bank, 2018.

[3] World Health Organization, *Accelerating Access to Genomics for Global Health: Promotion, Implementation, Collaboration, and Ethical, Legal, and Social Issues*. Geneva, Switzerland: WHO, 2022.

[4] C. M. Mayson, A. Sherrin, C. Phillips, and D. Taylor, "Improving the forensic genetic workflow for countries with small geographical areas: What are the options and how cost effective are they?," *Forensic Sci. Int. Genet.*, vol. 74, Art. no. 103171, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.fsigen.2024.103171.

[5] Federal Bureau of Investigation, “CODIS and NDIS fact sheet,” 2017. [Online]. Available: https://www.fbi.gov/how-we-can-help-you/dna-fingerprint-act-of-2005-expungement-policy/codis-and-ndis-fact-sheet. Accessed: May 19, 2026.

[6] M. Bodner *et al*., “Recommendations of the DNA Commission of the International Society for Forensic Genetics (ISFG) on quality control of autosomal short tandem repeat allele frequency databasing (STRidER),” *Forensic Sci. Int. Genet.*, vol. 24, pp. 97–102, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.fsigen.2016.06.008.

[7] M. Matamoros, Y. Pinto, F. J. Inda, and O. García, “Population genetic data for 15 STR loci (Identifiler kit) in Honduras,” *Leg. Med. (Tokyo)*, vol. 10, no. 5, pp. 281–283, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.legalmed.2008.01.004.

[8] E. F. Herrera-Paz, L. F. García, I. Aragon-Nieto, and M. Paredes, “Allele frequencies distributions for 13 autosomal STR loci in 3 Black Carib (Garifuna) populations of the Honduran Caribbean coasts,” *Forensic Sci. Int. Genet.*, vol. 3, no. 1, pp. e5–e10, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.fsigen.2008.02.004.

[9] A. Zuniga *et al*., “Population genetic data for 23 STR loci (PowerPlex Fusion 6C™ kit) genetic markers in the Lenca ethnic group in Honduras,” *Leg. Med. (Tokyo)*, vol. 71, Art. no. 102504, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.legalmed.2024.102504.

[10] A. Zuniga *et al*., “Population genetic data for 23 STR loci of Tawahka ethnic group in Honduras,” *Forensic Sci.*, vol. 5, no. 4, Art. no. 72, Dec. 2025, doi: 10.3390/forensicsci5040072.

[11] A. Zuniga *et al*., “Population genetic data for 23 STR loci of the Pech ethnic group in Honduras,” *Genes*, vol. 17, no. 4, Art. no. 422, Apr. 2026, doi: 10.3390/genes17040422.

[12] T. M. T. Carratto, V. M. S. Moraes, T. S. F. Recalde, M. L. G. de Oliveira, and C. Teixeira, "Applications of massively parallel sequencing in forensic genetics," *Genet. Mol. Biol.*, vol. 45, no. 3, Art. no. e20220077, Sep. 2022, doi: 10.1590/1678-4685-GMB-2022-0077

[13] R. S. Turingan *et al.*, "Developmental validation of the ANDE 6C system for rapid DNA analysis of forensic casework and DVI samples," *J. Forensic Sci.*, vol. 65, no. 4, pp. 1056–1071, Jul. 2020, doi: 10.1111/1556-4029.14286.

[14] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, “A design science research methodology for information systems research,” J. Manage. Inf. Syst., vol. 24, no. 3, pp. 45–77, 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.

[15] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,” ISO, Geneva, Switzerland, 2017. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/66912.html. Accessed: May 19, 2026.

[16] B. M. Knoppers, “Framework for responsible sharing of genomic and health-related data,” *Hugo J.*, vol. 8, no. 1, Art. no. 3, Dec. 2014, doi: 10.1186/s11568-014-0003-1.

[17] M. Bodner et al., "The STRidER report on two years of quality control of autosomal STR population datasets," Genes, vol. 11, no. 8, Art. no. 901, Aug. 2020, doi: 10.3390/genes11080901

[18] M. E. D'Amato, Y. Joly, V. Lynch, H. Machado, N. Scudder, and M. Zieger, "Ethical considerations for forensic genetic frequency databases: First report conception and development," *Forensic Sci. Int. Genet.*, vol. 71, Art. no. 103053, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.fsigen.2024.103053.

[19] M. D. Makhlouf, “The ethics of DNA testing at the border,” Am. J. Law Med., vol. 46, no. 2–3, pp. 253–273, 2020, doi: 10.1177/0098858820933500.

[20]I. A. Gutiérrez-Hurtado *et al*., "Past, present and future perspectives of forensic genetics," *Biomolecules*, vol. 15, no. 5, Art. no. 713, May 2025, doi: 10.3390/biom15050713