Nefrología al día

Sociedad Española de Nefrología

NEFROLOGÍA CLÍNICA · CONGÉNITAS Y HEREDITARIAS

ID NC-062

Nefronoptisis

Pedro Arango Sancho[1], **Álvaro Madrid Aris**[2]

[1] Servicio de Nefrología Pediátrica. Hospital Sant Joan de Déu. Barcelona

[2] Servicio de Nefrología y Trasplante Renal Infantil, Hospital Sant Joan de Déu. Esplugues de Llobregat. Barcelona

Actualizado el **12 de abril de 2023**

Palabras clave: ciliopatías, Enfermedad quistica medular, nefropatía tubulointersticial autosómica dominante

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Pedro Arango Sancho, Álvaro Madrid Aris. Nefronoptisis. En: Lorenzo V, López Gómez JM (Eds). Nefrología al día [Internet]. ISSN: 2659-2606. 2023 Disponible en: https://nefrologiaaldia.org/articulo/nefronoptisis/

CONTENIDO

Generalidades 1
Epidemiología 3
Fisopatogenia de la enfermedad 3
- Aparato ciliar 4
- Polarización celular 4
- Transporte intraflagelar (TIF) 5
- Patogenia de las ciliopatías renales 5

Genética 6
Manifestaciones clínicas 9
- Manifestaciones extrarrenales 10

Nefropatía Tubulo Intersticial Autosómica Dominante (NTIAD) 11
Diagnóstico 11
Diagnóstico diferencial 15
Tratamiento 15
Referencias bibliográficas 16

Generalidades

La primera descripción de la nefronoptisis como enfermedad se atribuye a Smith y Graham en 1945 [1], aunque un año antes ya Thorn publicaba un caso de la enfermedad que describió como una nefritis pierde sal que simulaba una insuficiencia suprarrenal [2]. A pesar de ello no fue hasta 1951 cuando el célebre Guido Fanconi acuñó el término de "nefronoptisis familiar juvenil" para describir los casos encontrados en dos familias que presentaban características clínicas atribuibles a la forma juvenil "clásica", la más frecuente actualmente de la enfermedad, producida por mutaciones en el gen *NPHP1* [3]. El estudio genético posterior de las diferentes familias afectas, desde 1993 (año del descubrimiento del locus responsable en la mayoría de

las familias descritas, situado en la región 2q12-q13 [4] [5]) hasta la actualidad, ha permitido la caracterización de más de 20 genes implicados en entidades con afectación diversa, pero con la alteración renal como nexo común [6].

Bajo el concepto de nefronoptisis (NPHP), conocido también antiguamente como complejo nefronoptisis-enfermedad quística medular (NPHP-MCKD) y actualmente como ciliopatías relacionadas con la nefronoptisis (NPHP-RC), encontramos un grupo de enfermedades que presentan características histológicas, clínicas y fisiopatológicas comunes y que son consecuencia de mutaciones en múltiples genes que codifican proteínas implicadas en la composición y el correcto funcionamiento del aparato ciliar (cuerpos basales, cilios primarios y centrosomas) [7][8].

Estas mutaciones, clásicamente monogénicas y de herencia autosómica recesiva darán lugar al desarrollo de enfermedades quísticas renales asociadas o no a manifestaciones en otros órganos y con una progresión típicamente hacia la enfermedad renal crónica terminal (ERCT) en las primeras dos décadas de la vida [9]. Debido a las diferencias clínicas, genéticas y en las implicaciones pronósticas asociadas a la edad de debut de la enfermedad se ha llevado a cabo una clasificación basada en la edad media en la que se desarrolla la ERCT [10], dividiéndola así en tres tipos **(Figura 1).**

Figura 1. Edad media de aparición de enfermedad renal crónica terminal (ERCT) en los distintos tipos de nefronoptisis y Nefropatía Intersticial Autosómica Dominante (término que sustituye la clásica denominación de enfermedad quística medular (MCKD)



Infantil: al año de vida

Juvenil: a los 13 años

Adolescente: a los 19 años

Cada una de ellas asocia defectos genéticos específicos y tienen como factor común el desarrollo de una nefritis tubulointersticial crónica con alteración en la capacidad de concentración urinaria, junto a déficit de reabsorción de sodio en algunos casos, y manteniendo típicamente en todas ellas al inicio un sedimento urinario sin alteraciones (leve proteinuria de bajo peso molecular inicial en algunos pacientes).

En contraste con la nefronoptisis, la enfermedad quística medular (MCKD) posee como ya hemos nombrado un patrón de herencia autosómico dominante y generalmente presenta un curso más paucisintomático con una progresión lenta hacia la ERCT en la edad adulta [11] [12] [14] [7]. Los característicos quistes renales de la unión corticomedular que dan nombre a la enfermedad, sin embargo, pueden no aparecer.

El término Enfermedad Quística Medular se aplicó a las formas adultas con herencia autosómica dominante. El mayor conocimiento de los genes implicados, y la presencia muy inconstante de quistes, ha determinado la evolución de estos conceptos. El término Nefropatía Tubulointersticial Autosómica Dominante (NTAD) ha sido recientemente establecido por las guías KDIGO utilizando la sigla en inglés ADTKD, sustituyendo al de Enfermedad Quística Medular [13]

(Véase Capítulo Nefropatía Tubulointersticial Autosómica Dominante).

Epidemiología

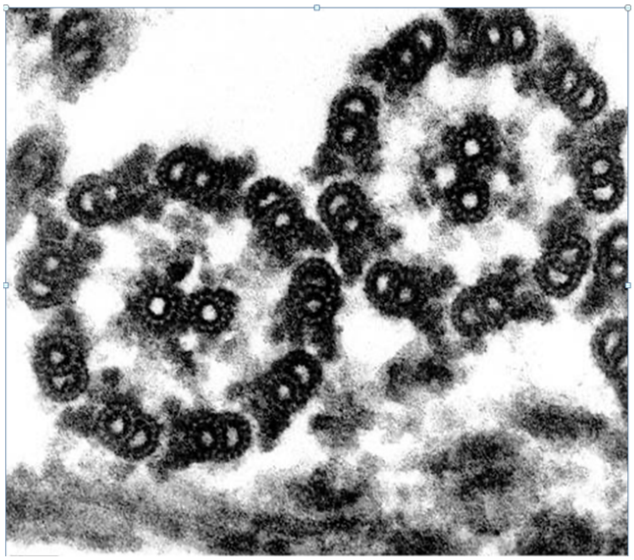
La NPHP es una enfermedad poco común, al igual que los registros epidemiológicos que existen de ella en la actualidad, siendo la mayoría de los estudios realizados en base a la forma más frecuente de la enfermedad, la juvenil (*NPHP 1*).

Estudios epidemiológicos realizados en Finlandia y Canadá estiman una prevalencia para la forma juvenil de entre 0,1-0,2 por cada 10.000 recién nacidos vivos [9] [15]. Igualmente la nefronoptisis es la responsable de entre el 2,4-15% de los casos de ERCT en niños, según estudios epidemiológicos realizados en EEUU [16] y Europa [17] respectivamente, sin diferencias entre sexos y con una prevalencia mucho mayor en la raza blanca. En su gran mayoría son enfermedades autosómicas recesivas y presentan una gran penetrancia, con diferentes series que revelan la presencia de la enfermedad en familiares entre el 35-50% [18]. Sin obviar que se trata de una enfermedad poco común, se sitúa como un de las causas genéticas más frecuentes de ERCT en la infancia.

Fisopatogenia de la enfermedad

Para entender la fisiopatogenia de las NPHP-RC es importante conocer el mecanismo de polarización celular, el funcionamiento del aparato ciliar y el transporte intraflagelar **(Figura 2),** ya que mutaciones que afecten a diferentes proteínas y vías de señalización implicadas en este complejo son las que van a determinar el desarrollo de la enfermedad.

Figura 2. Corte a través del axonema aislado de Chlamydomonas sp.(Germino [21])



Aparato ciliar

Las formaciones ciliares en las células de los vertebrados se forman a partir del cuerpo basal, una estructura derivada del centro organizador de microtúbulos (MTOC) o centrosoma. Este es un orgánulo situado en las proximidades del núcleo en el que penetran los extremos negativos de los microtúbulos y encargado de la nucleación de estos, de la formación del huso mitótico durante la división celular y de, como hemos referido, la conformación de los cuerpos basales de cilios y flagelos (extremos positivos).

Cada una de estas formaciones ciliares están constituidas por un tallo cilíndrico cubierto de una membrana plasmática especializada que contiene el axonema: complejo formado por nueve dobletes periféricos de microtúbulos y un par central (9+2) (Figura 2), aunque también puede carecer de la pareja de microtúbulos centrales (9+0) y una zona de transición, que actúa como “filtro” de las moléculas que pueden pasar hacia el cilio o fuera de éste y que une el tallo al cuerpo. Durante la ciliogénesis, el cilio crece mediante la adhesión de nuevas subunidades axonemales desde el cuerpo basal hasta la punta distal.

Los cilios 9+2 poseen habitualmente brazos de dineína que unen los dobletes de microtúbulos y que le dan movilidad, mientras que los cilios 9+0 suelen carecer de ellos y son inmóviles, denominándose éstos últimos cilios primarios [19].

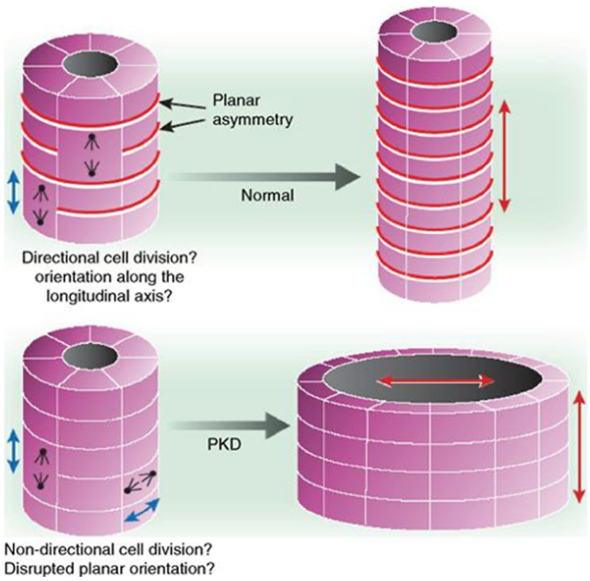
Polarización celular

La polarización celular está controlada por los centrosomas. La correcta orientación de éstos y el huso mitótico durante la división celular con respecto al eje longitudinal del túbulo es un punto crítico para conseguir una adecuada polaridad celular plana (orientación tridimensional de una capa célula epitelial). Esta polaridad se encuentra regulada por las vías de señalización Wnt (canónica y no canónica) y Sonic Hedgehog (Shh) durante la morfogénesis tubular renal.

Se ha demostrado en modelos animales que la sobreexpresión de β-Catenina (activada mediante la vía de señalización Wnt no canónica) puede llevar al desarrollo de quistes renales en modelos de ratones [20].

Por ello, la disrupción de esta orientación longitudinal sería el mecanismo de desarrollo de las dilataciones tubulares o quistes presentes en la enfermedad **(Figura 3)** [21].

Figura 3: Disrupción de la polaridad celular plana. Tomada y editada de: Dartmouth College (dominio público).



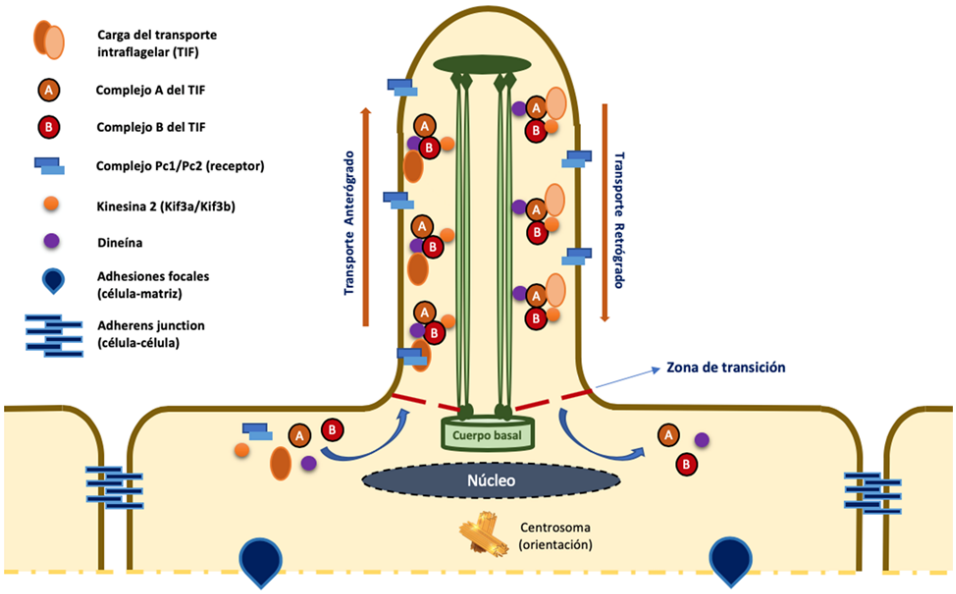
Transporte intraflagelar (TIF)

Los componentes encargados de la formación y reciclado de la membrana ciliar y el axonema son transportados en macromoléculas de "carga" (complejos A y B) por el llamado TIF a través de los dobletes de microtúbulos [22]. El transporte anterógrado (hacia la punta distal) es conducido por la Kinesina heterotrimérica 2 (formada por dos subunidades motoras: Kif3a y Kif3b y una subunidad no motora). El transporte retrógrado (nuevamente hacia la célula), en cambio, se encuentra regulado por la proteína citoplasmática motora Dineína 1B [23].

Patogenia de las ciliopatías renales

"Cistoproteínas" o "Nefrocistinas" es el nombre que se ha dado a las proteínas codificadas por los genes implicados en las enfermedades renales quísticas, tanto en humanos como en modelos animales. Estas se sitúan en los cilios primarios, cuerpos basales, el huso mitótico, centrosomas, adherens junctions, retículo endoplásmico o las adhesiones focales y cambian su localización dependiendo de la fase del ciclo celular en el que se encuentra la célula [24] **(Figura 4).**

Figura 4. Estructura ciliar y transporte intraflagelar (modificado de referencia[19])



Un ejemplo son las DAPs (Distal Appendage Proteins), apéndices distales que se proyectan radialmente desde el extremo distal del centriolo madre que desempeñan un papel crucial en el acoplamiento de la vesícula ciliar primaria y en el inicio de la ciliogénesis. Las mutaciones en los genes que codifican estas proteínas (*CEP83, CEP164* o *SCLT1*) pueden provocar una pérdida completa del cilio primario, una formación ciliar anormal o una señalización ciliar defectuosa, dando lugar (tanto en humanos como en ratones) a fenotipos de nefronoptisis [25].

Las ciliopatías renales son producidas por mutaciones que modificarán tanto la localización subcelular de estas cistoproteínas como su interacción funcional con otras proteínas del complejo. Esto conlleva alteraciones en las vías de señalización intracelular (célula-célula y célula-matriz) con incapacidad por parte de los mecanosensores ciliares para detectar correctamente el flujo de fluido luminal [26] debido a la disfunción ciliar, lo que llevará a una disregulación del crecimiento tisular y a la formación de los quistes renales.

Genética

Como hemos comentado anteriormente, todos los genes implicados en la NPHP codifican componentes del aparato ciliar: cilios primarios, cuerpos basales o centrosomas [7] [8].

De todos ellos el más común con mucha diferencia es el *NPHP1*, responsable de aproximadamente el 20% de los casos de NPHP [6] [27]. El resto de los más de 50 genes que han sido descritos en la base de datos OMIM® (Online Mendelian Inheritance in Man) como implicados, son responsables de menos de un 3% de los casos cada uno [9]. Igualmente, cabe destacar que hasta en un 30% [28] de los pacientes con NPHP aún no se ha identificado ninguna mutación genética responsable.

Hasta el 25% de las mutaciones en *NPHP1* son delecciones homocigotas [9], aunque han sido descritas también delecciones heterocigotas acompañadas de mutaciones puntuales del segundo alelo. A pesar de ser el gen que con más frecuencia produce la forma juvenil de NPHP existe una importantísima variabilidad genotipo-fenotipo de la enfermedad, habiéndose descrito pacientes con delecciones homocigotas de NPHP1 que desarrollan la ERCT tardíamente en la edad adulta (0,5%) [29].

En la siguiente tablas (Tabla 1) (Tabla 2) (Tabla 3) quedan reflejados los 26 principales fenotipos y los genes implicados identificados hasta el momento actual, así como su localización, las proteínas que codifican y los posibles fenotipos resultantes:

Tablas 1 a 3: Del gen al fenotipo. Principales 25 genes implicados en las NPHP-RC. Se describen en el lado derecho de la tabla las principales manifestaciones fenotípicas en base a las publicaciones de casos en la literatura. En azul oscuro las manifestaciones más contantes y en azul claro las posibles. TTL: Tubulina-tirosina ligasa. CC: Bobina en espiral. TPR: Repetición de péptido tetratrico. RPGRIP1L: proteína de interacción con la GTPasa reguladora de la retinitis pigmentaria). RPGR: Regulador GTPasa de la retinitis pigmentaria. ATF4: factor de transcripción involucrado en el control del ciclo celular. * Algunos casos de mutación en NPHP6 produce fenotipo puramente ocular siendo causante del 20% de las amaurosis congénitas de Leber. NIMA: Nunca en mitosis A. CCCAP: Antígeno del cáncer de cólon serológicamente definido 8 o proteína de autoantígeno del cáncer de cólon centrosomal. RABEP 2: Rabaptina, proteína efectora de unión a GTPasa RAB2. Modificado de Hildebrandt et al [30].

Tablas 1

Gen	Localización	Proteina codificada	Lugar de expresión	Interacciones y función	FENOTIPO RESULTANTE (órganos afectos)						
					Riñón	Retina	Hígado	SNC y/o Cerebelo	Hueso	Inversus y defectos	Situs Cerebrales Malf.
NPHP1	Cr2q12.3	*Nefrocistina-1*	Adherens junctions, adhesiones focales y zona de transición, Golgi y axonema en túbulo colector	**Vías de señalización** intracelular y **función ciliar.** Interacción con otras NPHP	**NPHP Juvenil**						
NPHP2 INVS	Cr9q21-22	*Inversina (nefrocistina-2)*	Núcleo, axonema, cuerpo basal, y centriolo de cilios primarios del túbulo renal	**Polarización celular.** Interactúa con Nefrocistina-1 y B-tubulina	**NPHP Infantil**						
NPHP3	Cr3q22	*Proteína con dominios de TTL, CC y TPR*	Cuerpo basal cilio túbulo renal	Interactúa con Nefrocistina-1	**NPHP del adolescente**						
NPHP4	Cr1p36.31	*Nefrocistina-4 (nefroretinina)*	Centrosoma, cuerpo basal y axonema ciliar en túbulo renal. Cilio de conexión de las células fotorreceptoras	**Interactúa con Nefrocistina-1.** Mismas vías señalización celular. Interacción con **RPGRIP1L** en conos y bastones	**NPHP Juvenil y/o alteración retiniana**						
NPHP5 IQCB1	Cr3q12	*Nefrocistina-5*	Centrosoma, cuerpo basal y axonema ciliar en túbulo renal. Cilio de conexión de las células fotorreceptoras	Vía de señalización común con RPGR y calmodulina	**Síndrome de Senior-Løken**						
NPHP6 CEP290	Cr12q21	*Proteína centrosómica*	Centrosomas y cuerpos basales ciliares	Interactúa con ATF4 regulando el ciclo celular	**Síndromes de Joubert, Meckel-Gruber, Bardet-Bield o Senior-Løken***						
NPHP7 GLIS2	Cr16p	*Glis 2. (Factor de transcripción Gli similar a proteína 2)*	Ampliamente expresado a bajos niveles en el **tubo neural y sistema nervioso periférico.** Ampliamente expresado en el **riñón**	Represor transcripcional sin relación con la función ciliar. Mantenimiento de la arquitectura real, previniendo la **apoptosis en los túbulos distales**	**NPHP juvenil**						
NPHP8 RPGRIP1L	Cr16q	*RPGRIP1L*	Co-localización en cuerpos basales y centrosomas (junto nefro-cistinas 4 y 6)	RPGRIP1L participa en la vía de señalización Shh. Papel crítico en la formación del tubo neural y la extremidad	**Síndromes de Joubert o Meckel-Gruber**						

Tablas 1 a 3: Del gen al fenotipo. Principales 25 genes implicados en las NPHP-RC. Se describen en el lado derecho de la tabla las principales manifestaciones fenotípicas en base a las publicaciones de casos en la literatura. En azul oscuro las manifestaciones más contantes y en azul claro las posibles. TTL: Tubulina-tirosina ligasa. CC: Bobina en espiral. TPR: Repetición de péptido tetratrico. RPGRIP1L: proteína de interacción con la GTPasa reguladora de la retinitis pigmentaria). RPGR: Regulador GTPasa de la retinitis pigmentaria. ATF4: factor de transcripción involucrado en el control del ciclo celular. * Algunos casos de mutación en NPHP6 produce fenotipo puramente ocular siendo causante del 20% de las amaurosis congénitas de Leber. NIMA: Nunca en mitosis A. CCCAP: Antígeno del cáncer de cólon serológicamente definido 8 o proteína de autoantígeno del cáncer de cólon centrosomal. RABEP 2: Rabaptina, proteína efectora de unión a GTPasa RAB2. Modificado de Hildebrandt et al [30].

Tablas 2

Gen	Localización	Proteina codificada	Lugar de expresión	Interacciones y función	FENOTIPO RESULTANTE (órganos afectos)						
					Riñón	Retina	Hígado	SNC y/o Cerebelo	Hueso	Inversus y/o	Situs Cerebrales Malf.
NPHP9 NEK8	Cr17q11.2	*NEK 8 (quinasa relacionada con NIMA)*	Cilios primarios de las células del epitelio renal	Relación con NIMA (nunca en mitosis A). Coordinación de la regulación del cilio y la progresión del ciclo celular	**NPHP, fenotipos multisistémicos o presentaciones neonatales**						
NPHP 10. SDCCAG8CCCAP	Cr1q43-q44	*CCCAP*	Centriolos de las células epiteliales renales y células fotorreceptoras retinianas	Juega un papel en el establecimiento de la polaridad celular. También en la ciliogénesis mediante la vía Shh y su interacción con RABEP2	**NPHP y retinitis pigmentosa**						
NPHP11 TMEM67 MKS3	Cr8q22	Meckelina	Base del cilio primario y membrana plasmática	Migración del centrosoma a la superficie apical celular durante la ciliogénesis. Importante en la estructura y función ciliar	**Síndromes de Joubert, Meckel-Grubel o RHYNS**						
NPHP12 TTC21B IBTS SRTD4 ATD4	Cr2q24.3	*IFT 139 (Subunidad del complejo A de TIF)*	Axonema ciliar	Juega un papel importante en el **transporte retrógrado** intraflagelar en el cilio. Modula negativamente la transducción de la señal Shh	**NPHP o Síndrome de Jeune**						
NPHP13 WRD19 SRDT5 ATD5 CED4	Cr4p14	*IFT 144. (Subunidad del complejo A de TIF)*	Axonema ciliar	Juega un papel importante en el **transporte retrógrado** intraflagelar en el cilio. Modula negativamente la transducción de la señal Shh	**NPHP, NPHP con fibrosis hepática, Síndromes de Sensebrenner, Jeune, Senior-Løken o enf. Caroli**						
NPHP14/ZNF423, NPHP15/CEP164 Y MRE 11	Cr16q12.1 Cr11q23.3 y Cr11q21	Proteína de dedo de Zinc C2H2 tipo Kruppel. CEP164. MRE 11	Núcleo celular y centrosoma (centriolos maduros)	Ruta de **respuesta a daños en el ADN.** Transducción de señales durante el desarrollo. **Organización de los microtúbulos y ensamblaje de los cilios primarios**	**NPHP, síndrome de Joubert**						
NPHP16 ANKS6	Cr9q22.33	*ANKS6 (proteína de unión de NEK8 a Nefrocistina-2)*	Región proximal del cilio primario	Papel en el desarrollo renal y cardiovascular	**NPHP, alteraciones cardiovasculares, fibrosis hepática y situs inversus**						

Tablas 1 a 3: Del gen al fenotipo. Principales 25 genes implicados en las NPHP-RC. Se describen en el lado derecho de la tabla las principales manifestaciones fenotípicas en base a las publicaciones de casos en la literatura. En azul oscuro las manifestaciones más contantes y en azul claro las posibles. TTL: Tubulina-tirosina ligasa. CC: Bobina en espiral. TPR: Repetición de péptido tetratrico. RPGRIP1L: proteína de interacción con la GTPasa reguladora de la retinitis pigmentaria). RPGR: Regulador GTPasa de la retinitis pigmentaria. ATF4: factor de transcripción involucrado en el control del ciclo celular. * Algunos casos de mutación en NPHP6 produce fenotipo puramente ocular siendo causante del 20% de las amaurosis congénitas de Leber. NIMA: Nunca en mitosis A. CCCAP: Antígeno del cáncer de cólon serológicamente definido 8 o proteína de autoantígeno del cáncer de cólon centrosomal. RABEP 2: Rabaptina, proteína efectora de unión a GTPasa RAB2. Modificado de Hildebrandt et al [30].

Tablas 3 Gen	Localización	Proteína codificada	Lugar de expresión	Interacciones y función	FENOTIPO RESULTANTE (órganos afectos)							
					Riñón	Retina	Hígado	SNC y/o Cerebelo	Hueso	Inversus y/o defectos Situs	Malf. Cerebrales	
NPHP17 IFT172 IFT127 IFT80	Cr2p23.3	*IFT 172, IFT127 e IFT80 (Subunidad del complejo B de TIF)*	Axonema ciliar	Juega un papel importante en el **transporte anterógrado** intraflagelar en el cilio primario.	**Síndromes de Mainzer-Saldino, Jeune o Bardet-Bield**							
NPHP18 CEP83	Cr12q22	*CEP83 (apéndices distales de los centriolos)*	Centriolo	Encargado de anclar el cilio a la membrana plasmática	**NPHP y alteraciones en el SNC (50%)**							
NPHP19 DCDC2	Cr6p22.3	DCDC2 (dominio de doblecortina)	Centriolo	Se une a tubulina mejorando la polimerización de los microtúbulos. Migración neuronal	**NPHP, fibrosis hepática y dislexia**							
NPHP20	Cr15q15.1	*MAPKBP1*	Polo del **huso mitótico**	Proteína de andamiaje para la vía de señalización JNK	**NPHP tardía**							
IFT140 SRDT9	Cr16p13.3	*IFT140 (Subunidad del complejo A de TIF)*	Axonema ciliar	Juega un papel importante en el transporte retrógrado intraflagelar en el cilio	**Síndrome de Mainzer-Saldino o Bardet-Bield**							
IFT54 TRAF3IP1	Cr2q37.3	*IFT154 (Subunidad del complejo B de TIF)*	Axonema ciliar	Juega un papel importante en el transporte anterógrado intraflagelar en el cilio	**NPHP juveniles ± anomalías esqueléticas o defectos hepáticos y Síndrome de Senior-Løken**							
IFT81	Cr12q24.11	*Proteína del core del complejo B del TIF*	Axonema ciliar	Forma un módulo de unión a tubulina del complejo B de TIF necesario para la ciliogénesis	**NPHP ± polidactilia**							
ADAMTS9	Cr3p14.3-p14.2	*Metaloproteinasa extracelular secretada*	Cuerpos basales de los cilios primarios	Control de la polarización y forma celular durante la organogénesis	**NPHP**							
AHI1 CC2D2A	Cr4p15.32	*Bobina en espiral y dominio C2 que contiene 2A*	Zona de transición (complejo de tipo tectónico)	Parece desempeñar papel crítico en la ciliogénesis	**NPHP, fibrosis hepática y síndromes de Joubert y Meckel-Gruber**							
XPNPEP3 SLC41A1	Cr22q13.2 Cr1q32.1	*APP3 Familia 41 de transporta-dores de soluto (Mg)*	Desconocidas	Función mitocondrial en el túbulo renal Proteínas transportadoras de magnesio	**NPHP like 1 y 2**							
INPP5E	Cr9q34.3	*InsP3 (Inositol 1,4,5-trifosfato 5-fosfatasa*	Membrana ciliar	Las **fosfoinocitidinas** son componentes críticos de la membrana celualr	**NPHP + Síndrome de Senior-Løken, Sd. Joubert**							

Como podemos ver en las tablas, las diferentes nefrocistinas pueden interaccionar entre si participando en múltiples vías de señalización intracelular que incluyen la función ciliar, pudiendo presentar fenotipos similares.

De hecho la NPHP juvenil está asociada con mutaciones en prácticamente todos los genes NPHP salvo con *NPHP2*, que produce la forma infantil de NPHP (distinta en prácticamente todo al resto de nefronoptisis como luego veremos) y *NPHP 3*, que produce la forma del adolescente, con evolución más lenta a la ERCT [31].

Los productos génicos de algunos NPHP se encuentran en los cilios de otros órganos. Por ello, cuando estos sufren una mutación, dan lugar a NPHP que asocian manifestaciones extrarrenales o en el contexto de síndromes, como es el caso de *NPHP5* (asociado con retinitis pigmentosa y el síndrome de Senior-Løken), *NPHP6* o *NPHP8* (asociados ambos a degeneración retiniana y aplasia del vermis cerebeloso en el síndrome de Joubert o el síndrome de Meckel-Gruber) entre otros. Muchos de los genes actualmente relacionados con la NPHP solo han podido ser estudiados en unas pocas familias afectas (como *NPHP10*, 16 ó 18), por lo que las manifestaciones descritas en ellos hasta el momento, debido a la amplia variabilidad fenotípica presente en la enfermedad, están por confirmar.

NPHP 7 es causado por mutaciones en genes que codifican el factor de transcripción Glis2. Estudios en ratones con pérdida de función de Glis2 muestran senescencia de las células tubulares renales que en este estado secretan moléculas proinflamatorias e inducen daño progresivo orgánico a través de varias vías de señalización (como NF-κB). Mutaciones en este gen han sido implicadas en desarrollo de nefronoptisis de inicio precoz [32]. La importancia del conocimiento de este mecanismo patogénico reside en que se ha demostrado como la activación genética del receptor toll-like (TLR)/IL-1 o la eliminación farmacológica de las células

senescentes (terapia senolítica) reduce el daño tubular, la fibrosis y la apoptosis en modelos de ratón Glis2 de NPHP, pudiendo esto retrasar la progresión de la enfermedad renal en la NPHP tipo 7 [33].

Existen entidades con fenotipos puramente renales y de desarrollo más tardío denominadas NPHPL (nefropatías NPHP like) de la que se han caracterizado dos tipos: el 1, producido por variantes en el gen *XPNPEP3* y el tipo 2, producido por mutaciones en el gen *SLC41A1* [34]. A pesar de ello, se han descrito mutaciones recientes en homocigosis con afectación del marco de lectura (c.719_790insA; p.Q241Tfs*31) causando formas de nefronoptisis de desarrollo precoz en la infancia [35]. Pacientes con mutaciones en MAPKBP1 pueden presentar también fenotipos leves renales y por lo tanto deben ser consideradas en adultos con enfermedad renal crónica de causa desconocida [36].

En el caso del NPHP 12 (*TTC21B*), curiosamente, ha sido descrita una rara mutación de pérdida de sentido en homocigosis (p.P209L) en 14 familias del norte de África y Portugal, y en heterocigosis en otras 5 familias, que dan lugar a proteinuria y glomeruloesclerosis focal y segmentaria (GSFS) junto a estrechamiento de la membrana basal tubular. Estos pacientes desarrollaron HTA junto a proteinuria tubular tardía y progresión a ERCT entre los 15-32 años, aunque se han descrito fenotipos precoces [37]. También se han descrito como causantes de este fenotipo mutaciones en heterocigosis compuestas (c.450G>A y c.626C>T) en los exones 5 y 6 [38]. Este curioso caso demuestra como genes ciliares pueden estar implicados también en la patogenia de enfermedades glomerulares [39] (*TTC21B, NPHP4 y CRB2*) ha sido también descrita recientemente en una paciente de 6 años con una mutación en heterocigosis compuesta del gen CC2D2A (que codifica una proteína esencial del centrosoma ciliar de distribución ubicua pero sin expresión en podocitos), dando lugar a un cuadro de GSFS, polidactilia axial, nefronoptisis, respiración atáxica y retraso mental con desarrollo rápido de ERCT y necesidad de diálisis a los 8 meses del diagnóstico [40].

Cabe destacar el hallazgo en diferentes familias de herencia oligogénica, con pacientes afectos de NPHP que presentaron mutaciones en diferentes genes NPHP simultáneamente (1, 3 y 4) [41] o pacientes con síndrome de Joubert con mutaciones en los genes NPHP 1 y 6 [42]. El número de pacientes con herencia oligénica es demasiado pequeño para sacar conclusiones de la correlación genotipo/fenotipo como que la presencia de múltiples mutaciones o el tipo de mutación aumente la severidad de los hallazgos clínicos.

Manifestaciones clínicas

Los pacientes con nefronoptisis uniformemente progresan a la ERCT antes de los 20 años de vida, con diferencias como ya hemos referido según la forma clínica presente.

Los síntomas iniciales son relativamente leves (salvo en el caso de pacientes con formas de NPHP infantil) e insidiosos, derivados de la afectación tubulointersticial.

Éstos consisten en un déficit de concentración urinaria que se expresa en forma de poliuria, polidipsia, ingesta regular de líquidos en la noche, nicturia y, en ocasiones, enuresis nocturna. También la anemia puede estar presente dentro de los signos iniciales de la enfermedad debido a una deficiencia en la síntesis de eritropoyetina [43].

Posteriormente los síntomas irán asociados a la uremia y la progresión de la enfermedad renal crónica. A diferencia de otras enfermedades que progresan a ERCT, la mayoría de los pacientes con NPHP permanecen normotensos (salvo aquellos con formas infantiles NPHP2), seguramente debido a la hipovolemia causada por la pérdida de concentración urinaria y a la pérdida salina [44]. Las principales diferencias entre las 3 formas de presentación más frecuentes de NPHP se exponen en la siguiente tabla (Tabla 4):

Tabla 4. Diferencias entre las principales formas de NPHP (infantil, juvenil y del adolescente)

	NPHP INFANTIL (forma más severa)	NPHP JUVENIL (forma más común)	NPHP ADOLESCENTE
Gen principal	NPHP 2	NPHP 1	NPHP 3
Edad de desarrollo de	1-3 años (media de 1 año)	13 años de media	4-37 años (media de 19 años)
Presentación	Incluso prenatal (Oligoamnios y anomalías renales ecográficas -22 SG-)	4-6 años (Poliuria, polidipsia, retraso crecimiento y a veces enuresis primaria)	Poliuria y polidipsia más tardía
Hipertensión	Severa	No	No
Manifestaciones extrarrenales	80% (Situs inversus, retinitis pigmentaria, 50% hepáticas, 20% defectos septales o valvulares cardiacos y 18% infecciones bronquiales recurrentes)	10-20%	10-20%
Tamaño renal	Variable (de aumentado a pequeño)	Normal o levemente disminuido	Normal o levemente disminuido
Aspecto renal (ecografía)	Hiperecogenicidad cortical ± quistes	Hiperecogenicidad y pérdida de diferenciación corticomedular ± quistes	Hiperecogenicidad y pérdida de diferenciación corticomedular ± quistes

Igualmente el sedimento urinario suele ser inactivo sin proteinuria o con una proteinuria de origen tubular que aparece en algunas ocasiones. En etapas avanzadas de la enfermedad y coincidiendo con el desarrollo de la glomerulosclerosis secundaria, aparecerá la proteinuria glomerular [45]. Se observa retraso del crecimiento relacionado con la hipovolemia crónica inicialmente y posteriormente en el contexto de la ERCT.

Rararmente, debido a mutaciones en los genes *ARHGDIA, FATI* o *NUP93*, puede observarse un fenotipo clínico de "overlapping" que se presenta como una combinación de NPHP-RC y síndrome nefrótico [9].

Manifestaciones extrarrenales

Una característica destacada de la NPHP es la afectación de múltiples órganos (pleiotropía) aparte del riñón, debido a la expresión en los mismos de la disfunción ciliar, ocurriendo aproximadamente entre el 10-20% de los casos (hasta 80% de los casos en el NPHP2). Estas manifestaciones pueden presentarse asociadas a la forma renal por separado o formando parte de distintas asociaciones que dan lugar a síndromes característicos (Figura 5). Los órganos principalmente afectados serán: hígado, ojo, cerebro, hueso y corazón, con la posible asociación de situs inversus. Los defectos posibles asociados a los diferentes órganos serán los siguientes:

Figura 5. Principales síndromes asociados a Nefronoptisis



– Defectos esqueléticos: Acortamiento de costillas y extremidades, escoliosis, polidactilia, braquidactilia, craniosinostosis o epífisis "en cono" (síndrome de Mainzer-Saldino)

– Ojo: Retinitis pigmentaria o degeneración tapetoretinal con disminución de la capacidad visual progresiva, coloboma, microftalmia o apraxia oculomotora congénita (ausencia o defecto en el control voluntario del ojo, con incapacidad para los movimientos oculares horizontales que mejora en los primeros años de vida)

– Cerebro: Malformaciones cerebrales (encefalocele o hipoplasia del vermis cerebeloso). Pueden presentar clínica de ataxia, hipotonía o retraso del desarrollo en grado variable.

– Hígado: Hepatoesplenomegalia y fibrosis portal sin o con mínima proliferación de los ductos biliares (esto lo diferencia de la afectación hepática en la poliquistosis renal y de la fibrosis hepática congénita)

– Corazón: Defectos valvulares o septales ventriculares cardiacos congénitos

Nefropatía Tubulo Intersticial Autosómica Dominante (NTIAD)

(Vease NTIAD)

Diagnóstico

A pesar de la posibilidad de aparición de múltiples signos y síntomas de la enfermedad en pacientes con NPHP-RC, la mayoría de las veces la detección de la patología (debido a su inicio paucisintomático) se lleva a cabo por el hallazgo accidental de un aumento de la creatinina sérica.

En estos pacientes, una vez ahondamos en la historia clínica, encontramos antecedentes de nicturia, enuresis nocturna, poliuria, polidipsia e hipostenuria de manera habitual. Los exámenes de laboratorio nos mostrarán un aumento de los parámetros relacionados con la insuficiencia renal según el grado: anemia, hiperfosforemia, aumento de creatinina y urea, acidosis metabólica, etc. También se recomienda una evaluación funcional hepática mediante análisis sérico al diagnóstico en todos los pacientes.

En la actualidad, el diagnóstico precoz de la enfermedad es limitado debido a la ausencia de marcadores de laboratorio específicos para la patología. En este aspecto, un interesante trabajo de Stokman y colaboradores [46] en el que mediante análisis proteómico de vesículas extracelulares urinarias de pacientes con nefronoptisis se identificaron 156 proteínas con una expresión alterada respecto a controles sanos, abre una prometedora vía en la determinación de marcadores no invasivos pronósticos y de diagnóstico precoz en la enfermedad.

Además de una exploración clínica cuidadosa en busca de signos de displasias esqueléticas o malformaciones del sistema nervioso central (ataxia, nistagmo, apraxia oculomotora, hipotonía...). El examen ocular mediante oftalmoscopia se recomienda realizarlo a todos los pacientes al diagnóstico debido a la frecuente asociación de la enfermedad renal en las NPHP-RC con problemas oculares como la retinitis pigmentosa (si se detectan, la ectrorretinografía y la electrooculografía, permiten valorar la severidad ocular).

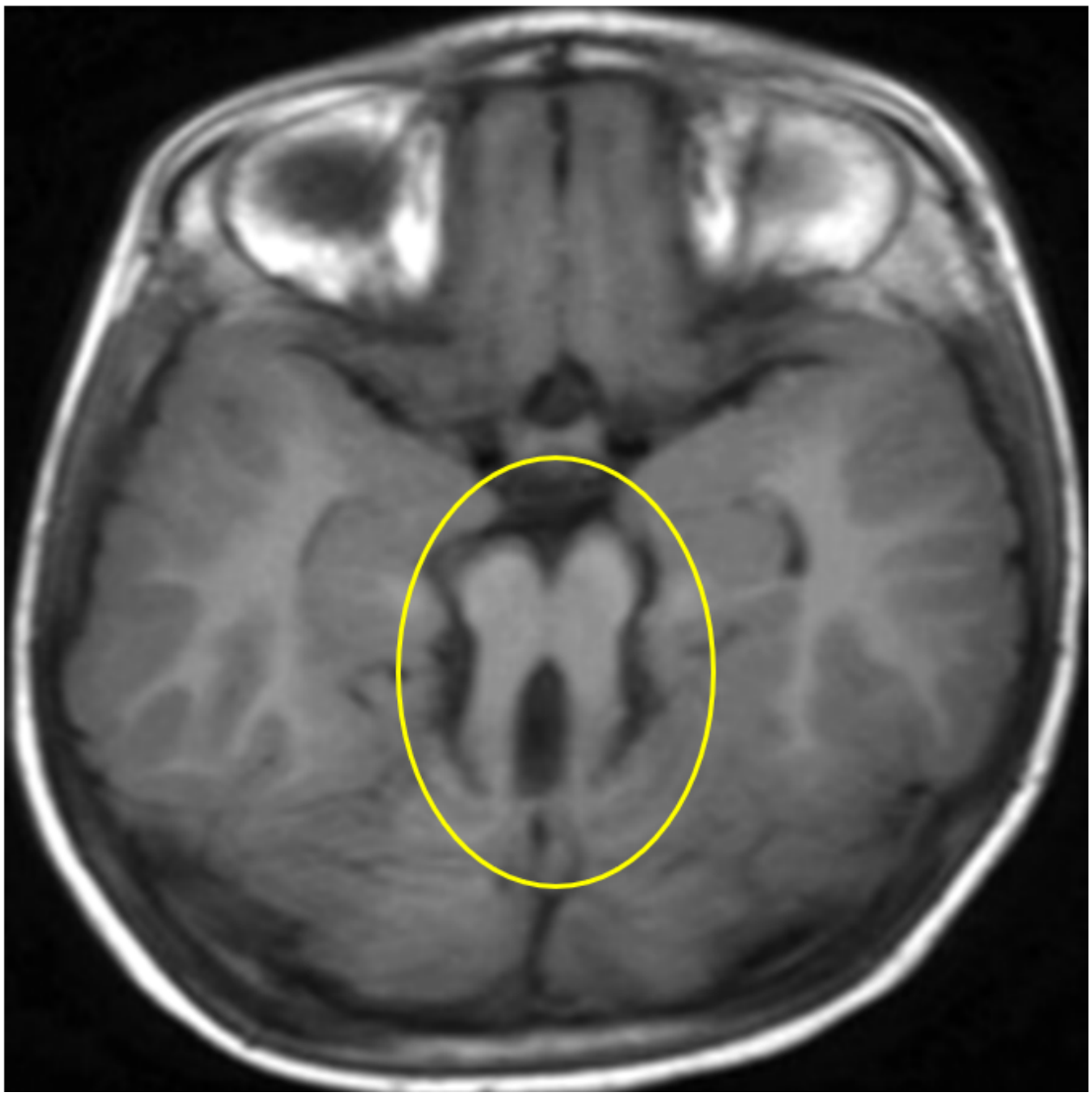
Igualmente, una ecografía renal y hepática nos ayudará a facilitar la detección de pacientes con fibrosis hepática y a nivel renal nos mostrará las características ecográficas de la enfermedad: tamaño renal normal o reducido, hiperecogenicidad cortical, pérdida de la diferenciación corticomedular y, finalmente, la formación de quistes en el borde cortico-medular del riñón [47] (este hallazgo inconstante, que a veces debe ser demostrado mediante resonancia magnética nuclear o tomografía axial computerizada) [48].

Una valoración radiográfica ósea completa (serie ósea) nos permitirá detectar signos característicos de enfermedades del complejo NPHP-RC, como las epífisis en “cono” (Sd. Mainzer-Saldino) (Figura 6) o el acetábulo “en tridente” (Sd. Jeune). La realización de una resonancia magnética cerebral en aquellos pacientes que presenten sintomatología del SNC puede ayudarnos a detectar igualmente la hipoplasia del vermis cerebeloso y su característico “signo del diente molar” (Sd. Joubert) (Figura 7).

Figura 6. Epífisis "en cono". Síndrome de Mainzer-Saldino



Figura 7. *"Signo del diente molar" (hipoplasia del vermis cerebelosos). Síndrome de Joubert. Resonancia Magnética Nuclear*



A pesar de que el diagnóstico de las NPHP-RC se sugiere por los hallazgos clínicos, ecográficos y las típicas manifestaciones extrarrenales, deben ser confirmados por técnicas de genética molecular en todos los casos mediante el examen de los posibles genes responsables.

En caso de no poder realizar el examen molecular o que con este no hayamos detectado la mutación responsable de la enfermedad (la detectamos hasta en el 60-70% de los casos mediante el uso de paneles genéticos de secuenciación masiva), la biopsia renal puede ayudarnos a sugerir el diagnóstico a través de característicos cambios histológicos comunes en las NPHP-RC (no patognomónicos).

El aspecto macroscópico de los riñones será el de una superficie con apariencia finamente granular, debido a la protrusión de los túbulos colectores corticales dilatados (5-50 quistes de 1-15 mm de diámetro en el borde cortico-medular). Éstos proceden de los túbulos contorneados distales y colectores medulares [49]. A diferencia de otras patologías quísticas renales, estos parecen producirse ex vacuo, por la pérdida del tejido renal circundante.

Del mismo modo, los quistes solo están presentes en el 70% de las autopsias [50] en la enfermedad y su aparición en muchos casos es tardía, no siendo necesarios por tanto para el diagnóstico de la misma. No se han descrito la aparición de quistes en localizaciones extrarrenales.

En el aspecto microscópico destaca característicamente el engrosamiento y desflecamiento de la membrana basal tubular (más prominente en túbulos distales), seguido de infiltración peritubular por histiocitos y linfocitos, atrofia y dilatación tortuosa de los túbulos y finalmente nefropatía tubulointersticial esclerosante. A nivel glomerular puede aparecer fibrosis periglomerular y en pacientes con nefronas destruidas secundariamente a las alteraciones tubulares, incluso glomeruloesclerosis.

Diagnóstico diferencial

Para llevar a cabo el diagnóstico diferencial de las NPHP-RC con otras patologías se tendrán en cuenta parámetros histológicos, la presencia o no de manifestaciones extrarrenales, la actividad del sedimento urinario, una historia familiar positiva y el resultado de pruebas como la ecografía y por supuesto, test genéticos.

La histología nos ayudará a diferenciar las NPHP-RC de otras nefropatías túbulo-intersticiales como la pielonefritis crónica o la nefrotoxicidad farmacológica.

Mediante la medición del tamaño y volumen renal las diferenciaremos de patología como la displasia oligomeganefrónica o hipodisplasia renal, presentando estas últimas unos riñones de un tamaño muy pequeño (< de -2DS) en comparación con los riñones normales o levemente disminuidos de tamaño que vemos en las NPHP-RC. En el caso de las poliquistosis (AD y AR) el tamaño puede llevarnos a equívoco (aunque en estas habitualmente los riñones estarán llamativamente aumentados de tamaño), por lo que la presencia de una historia familiar positiva desequilibrará la balanza hacia la poliquistosis o la NTIAD enfermedad quística medular en estos casos sobre las NPHP-RC.

A pesar de que en la NPHP podemos observar un aumento del tamaño vesical y leves dilataciones pielocaliciales debido a la poliuria crónica, la presencia de hidronefrosis nos puede hacer pensar más claramente en cuadros de uropatía obstructiva.

Por otra parte, aunque la clínica y la presencia de manifestaciones extrarrenales características de los síndromes asociados a NPHP pueden ayudarnos, no hay que olvidar que la hipodisplasia renal se observa en más de 200 enfermedades sindrómicas con afectación multisistémica, por lo que afectación extrarrenal no asociada habitualmente con la NPHP podría ayudarnos a diferenciar entre estas dos enfermedades.

Tratamiento

No existe actualmente tratamiento etiológico para la enfermedad. El tratamiento es sintomático y de soporte de las complicaciones asociadas a la ERC o al tipo de NPHP (HTA, hiperparatiroidismo, desequilibrios metabólicos, corrección del equilibrio ácido-base y diselectrolitemias...), tratando de mantener un buen balance de fluidos para prevenir episodios de hipovolemia (ase-

gurar adecuada ingesta de sal), tratar la anemia cuando esta aparezca (suplementos de hierro y eritropoyetina) y promoviendo un crecimiento adecuado, a veces mediante la administración de hormona de crecimiento.

Cuando los pacientes desarrollan la ERCT esperable de la enfermedad, la terapia renal sustitutiva preferida es el trasplante renal, ya que los resultados documentados son excelentes en estos pacientes, sin haberse reportado ningún caso de recurrencia de la enfermedad en el riñón trasplantado. Se observan unos resultados mejores en el trasplante que en la población pediátrica general trasplantada, sobre todo, en pacientes que reciben riñones de donante vivo [51]. Cobra especial importancia un manejo multidisciplinar de la patología mediante la colaboración de nutricionistas, psicólogos y otros especialistas a las diferentes manifestaciones extrarrenales que presente el paciente.

Tanto en ratones pcy como pkd2 con fenotipo de riñón quístico (equivalente en humanos a la NPHP3) se ha visto como este puede ser fuertemente mitigado o incluso revertido mediante el tratamiento con el antagonista del receptor de vasopresina V2 OPC31260 [52]. El tratamiento con roscovitina [53] ha sido otra interesante aproximación terapéutica realizada en modelos de ratones afectos de NPHP-RC.

Un reciente trabajo ha demostrado la implicación de la vía de las prostaglandinas en el desarrollo de la enfermedad en modelos in vitro e in vivo: se analizó la capacidad de la prostaglandina E1 (PGE1) para rescatar los defectos de ciliogénesis en células tubulares renales inmortalizadas derivadas de la orina de pacientes con NPHP1, consiguiendo mejorar los fenotipos ciliar y renal en modelos de pez cebra y ratones *Nphp1-/-*. Además, en este mismo trabajo, se demostró como taprenepag, un agonista no prostanoide de la prostaglandina E2, consiguió mejorar la retinopatía grave observada en estos ratones abriendo una potencial vía de desarrollo terapéutico [54].

Como ocurre en otras patologías renales, el aumento progresivo de la comprensión de la fisiopatología de la enfermedad probablemente nos guíe hacia el desarrollo de terapias guiadas a la misma con la que consigamos un mejor manejo de los pacientes con NPHP-RC.

Referencias bibliográficas

1. Smith CA, Graham JB. Congenital medullary cysts of the kidneys with severe refractory anemia. Am J Dis Child 1945;69:369-377

2. Thorn GW, Koepf GF, Clinton M. Renal failure simulating adrenocortical insufficiency. N Engl J Med. 1944;231:76-85

3. Fanconi G, Hanhart E, Albertini A, Euhlinger R, Dolivo G, Prader A. Die familiare juvenile nephronophthise. Helv Pediatr Acta. 1951; 6:1-9

4. Antignac C, Arduy C, Beckmann JS, Benessy F, Gros F, Medhioub M, Hildebrandt F, Dufier JL, Kleinknecht C, Broyer M, Weissenbach J, Habib R, Cohen D. A gene for familiar juvenile nephronophthisis (recessive medullary cystic disease) maps to chromosome 2. Nat Genet 1993;3:342-345

5. Hildebrandt F, Singh-Sawhney I, Schnieders B, Centofante L, Omran H, Pohlmann A, Schamltz C, Wedekind H, Schubotz C, Antignac C, Brandis M. Mapping of a gene for familiar juvenile nephronophthisis: refining the map and definition of flanking markers on chromosome 2. Am J Hum Genet 1993;53:1256-1261

6. Srivastava S, Molinari E, Raman S, Sayer JA. Many Genes-One Disease? Genetics of Nephronophthisis (NPHP) and NPHP-Associated Disorders. Front Pediatr 2017;5:287

7. Srivastava S, Sayer JA. Nephronophthisis. J Pediatr Genet 2014;3:103

8. Johnson CA, Gissen P, Sergi C. Molecular pathology and genetics of congenital hepatorenal fibrocystic syndromes. J Med Genet 2003;40:311

9. Hildebrandt F, Attanasio M, Otto E. Nephronophthisis: disease mechanisms of a ciliopathy. J Am Soc Nephrol 2009;20:23

10. Burke JR, Inglis JA, Craswell PW, et al. Juvenile nephronophthisis and medullary cystic disease—the same disease (report of a large family with medullary cystic disease associated with gout and epilepsy). Clin Nephrol 1982;18:1

11. Cristodoulou K, Tsingis M, Stavrou C, et al. Chromosome 1 localization of a gene for autosomal dominant medullary cystic kidney disease. Hum Mol Genet. 1998;7(5):905-12

12. Scolari F, Ghiggeri GM, Amoroso A, et al. Genetic heterogeneity for autosomal dominant medullary cystic kidney disease (ADMCKD). J Am Soc Nephrol. 1998;9:393A

13. Eckardt K-U, Alper SL, Antignac C, Bleyer AJ, Chauveau D, et al. Autosomal dominant tubulointerstitial kidney disease: Diagnosis, classification, and management – A KDIGO consensus report. Kidney Int 2015;88(4):676-83.

14. Tory K, Rousset-Rouvière C, Gubler MC, et al. Mutations of NPHP2 and NPHP3 in infantile nephronophthisis. Kidney Int 2009;75:839

15. Levy M, Feingold J. Estimating prevalence in single-gene kidney diseases progressing to renal failure. Kidney Int 2000;58:925

16. Alexander SR, Sullivan EK, Harmon WE, et al. Maintenance dialysis in North American children and adolescents a preliminary report. North American Pediatric Renal Transplant Cooperative Study (NAPRTCS). Kidney Int Suppl 1993;43:S104

17. Konrad M, Saunier S, Heidet L, et al. Large homozygous deletions of the 2q13 region are a major cause of juvenile nephronophthisis. Hum Mol Genet 1996;5:367

18. Kleinknecht C, Habib R. Nephronophthisis. En Cameron S, Davidson AM, Grünfeld JP, Kerr D, Ritz E, eds. Oxford Textbook of Clinical Nephrology. Oxford: Oxford University Press, 1992:2188-2197

19. Bisgrove BW, Yost HJ. The roles of cilia in developmental disorders and disease. Development. 2006;133(21):4131-43

20. Saadi-Kheddouci S, Berrebi D, Romagnolo B, et al. Early development of polycystic kidney disease in transgenic mice expressing an activated mutant of the beta-catenin gene. Oncogene. 2001;20(42):5972-81

21. Germino GG. Linking cilia to Wnts. Nat Genet. 2005;37(5):455-7

22. Kozminski KG, Johnson KA, Forscher P, Rosenbaum JL. A motility in the eukaryotic flagellum unrelated to flagellar beating. Proc Natl Acad Sci U S A. 1993;90(12)5519-23

23. Pazour GJ, Dickert BL, Witman GB. The DHC1b (DHC2) isoform of cytoplasmic dynein is required for flagellar assembly. J Cell Biol. 1999;144(3):473-81

24. Nurnberger J, Bacallao RL, Phillips CL. Inversin forms a complex with catenins and N-Cadherin in polarized epithelial cells. Mol Biol Cell. 2002;13(9):3096-106

25. Mansour F, Bolvin FJ, Shaheed IN, et al. The Role of Centrosome Distal Appendage Proteins (DAPs) in Nephronophthisis and Ciliogenesis. Int J Mol Sci 2021;22(22):12253.

26. Fliegauf M, Benzing T, Omran H. When cilia go bad: cilia defects and ciliopathies. Nat Rev Mol Cel Biol 2005;14:645

27. Caridi G, Dagnino M, Gusmano R, et al. Clinical and molecular heterogeneity of juvenile nephronophthisis in Italy: insights from molecular screening. Am J Kidney Dis 2000; 35:44

28. Halbritter J, Bizet AA, Schmidts M, et al. Defects in the IFT-B component IFT172 cause Jeune and Mainzer-Saldino syndromes in humans. Am J Hum Genet 2013;93:915

29. Snoek R, van Setten J, Keating BJ, et al. NPHP1 (Nephrocystin-1) Gene Deletions Cause Adult-Onset ESRD. J Am Soc Nephrol 2018;29:1772

30. Hildebrandt F. Nephronophthisis and Medullary Cystic Kidney Disease in Children. En: Avner E, Harmon W, Niaudet P, Yoshikawa N, Emma F, Goldstein S. Pediatric Nephrology. 7th ed. Berlín: Springer; 2016. 1079-1101

31. Simons M, Gloy J, Ganner A et al. Inversin, the gene product mutated in nephronophthisis type II, functions as a molecular switch between Wnt signaling pathways. Nat Genet 2005;37:537

32. Al Alawi I, Powell L, Rice SJ, et al. Case Report: A Novel In-Frame Deletion of GLIS2 Leading to Nephronophthisis and Early Onset Kidney Failure. Front Genet 2021; 12:791495.

33. Jin H, Zhang Y, Liu D, et al. Innate Immune Signaling Contributes to Tubular Cell Senescence in the Glis2 Knockout Mouse Model of Nephronophthisis. Am J Pathol 2020;190(1):176-189.

34. Hurd, TW, Otto EA, Mishima E, et al. Mutation of the Mg (2+) transporter SLC41A1 results in a nephronophthisis-like phenotype. J Am Soc Nephrol 2013. 24: 967-977.

35. Alizadeh R, Jamshid S, Keramatipour M, et al. Whole exome Sequencing Reveals a XPNPEP3 Novel Mutation causing Nephronophthisis in a Pediatric Patient. Iranian Biomed J 2020;24(6):405-408.

36. Schönauer R, Jin W, Ertel A, et al. Novel nephronophthisis-associated variants reveal functional importance of MAPKBP1 dimerization for centriolar recruitment. Kidney Int 2020;98(4):958-969.

37. Zhang H, Su B, Liu X, et al. Mutations in TTC21B cause different phenotypes in two childhood cases in China. Nephrology (Carlton) 2018;23(4):371-376.

38. Abo El Fotoh WMM, Al-Fiky AF. A Compound Heterozygous Mutation in the Ciliary Gene TTC21B Causes Nephronophthisis Type 12. J Pediatr Genet 2020;9(3):198-202.

39. Huynh Cong E, Bizet AA, Boyer O et al. A homozygous missense mutation in the ciliary gene TTC21B causes familiar FSGS. J Am Soc Nephrol 2014;25:2435

40. Awazu M, Yamada M, Asada N, et al. A girl with a mutation of the ciliary gene CC2D2A presenting with FSGS and nephronophthisis. CEN Case Rep 2022;11(1):116-119.

41. Hoefele J, Wolf MT, O´Toole JF et al. Evidence of oligogenic inheritance in nephronophthisis-Related Ciliopathy. Am J Hum Genet 2019;104:45

42. Tory K, Lacoste T, Burglen L et al. High NPHP1 and NPHP6 mutation rate in patients with Joubert Syndrome and nephronophthisis potential epistatic effect of NPHP6 and AHI1 mutations in patients with NPHP1 mutations. J Am Soc Nephrol 2007;18:1566

43. Omran H, Fernández C, Jung M et al. Identification of a new gene locus for adolescent nephronophthisis, on chromosome 3q22 in a large Venezuelan pedigree. Am J Hum Genet. 2000;66(1):118-27

44. Hildebrandt F, Waldherr R, Kutt R, Brandis M. The nephronophthisis complex; clinical genetic aspects. Clin Investing 1992;70:802

45. Gee HY, Saisawat P, Ashraf S, Hurd TW, Vega-Warner V, Fang H, Beck BB, Gribouval O, Zhou W, Diaz KA, Natarajan S, Wiggins RC, Lovric S, Chernin G, Schhoeb DS, Ovunc B, Frishberg Y, Soliman NA, Fathy HM, Goebel H, Hoefele J, Weber LT, Innis JW, Faul C, Han Z, Washburn J, Antignac C, Levy S, Otto EA, Hidebrandt F. ARHGDIA mutations cause nephrotic syndrome via defective RHO GTPase signaling. J Clin Invest. 2013;123(8): 3243-53

46. Stokman MF, Bijnsdorp IV, Scheldhorst T, et al. Changes in the urinary extracelular vesicle proteome are associated with nephronophthisis-related cilipoathies. J Proteomics 2019; 192: 27-36.

47. Blowey DL, Querfeld U, Geary D et al. Ultrasound findings in juvenile nephronophthisis. Pediatr Nephrol. 1996;10(1):22-4

48. Fyhrquist FY, Klockars M, Gordin A, et al. Hyperreninemia, lysozimuria, and erytrocytosis in Fanconi Syndrome with medullary cystic kidney. Acta Med Scand. 1980;207(5):359-65

49. Simons M, Gloy J, Ganner A, et al. Inversin, the gene product mutated in nephronophthisis type II, functions as a molecular switch between Wnt signaling pathways. Nat Genet 2005;37(5):537-43

50. Sworn MJ, Eisinger AJ. Medullary cystic disease and juvenile nephronophthisis in separate members of the same family. Arch Dis Child 1972;47:278

51. Stavrou C, Deltas CC, Christophides TC, Pierides A. Outcome of kidney transplantation in autosomal dominant medullary cystic kidney disease type 1. Nephrol Dial Transplant 2003;18:2165

52. Gattone 2nd VH, Wang X, Harris PC, Torres VE. Inhibition of renal cystic disease development and progression by a vasopressin V2 receptor antagonist. Nat Med. 2003;9(10):1323-6

53. Chaki M, Airik R, Gosh AK et al. Exome capture reveals ZNF423 and CEP164 mutations, linking renal ciliopathies to DNA damage response signaling. Cell. 2012; 150 (3): 533-48

54. García H, Serafín AS, Silbermann F, et al. Agonists of prostaglandin E2 receptors as potential first in class treatment for nephronophthisis and related ciliopathies. Proc Natl Acad Sci USA 2022;119(18): e2115960119.

Nefrología al día · Sociedad Española de Nefrología · ISSN 2659-2606
https://nefrologiaaldia.org/articulo/nefronoptisis/