



DOCENTES DE ADMINISTRACIÓN FINANCIERA

45 Jornadas Nacionales de Administración Financiera
Septiembre 18 y 19, 2025

Opciones reales en proyectos de infraestructura público-privado

Garantías de ingresos mínimos, pasivos contingentes y opción de finalización anticipada

Gastón S. Milanesi

Universidad Nacional del Sur

SUMARIO

1. Introducción
2. La flexibilidad estratégica contenida en los acuerdos público-privados en proyectos de infraestructura
3. Metodología: Valoración contrato de concesión público-privado con garantías mínimas
4. Resultados del modelo
5. Conclusiones

Para comentarios:
milanesi@uns.edu.ar

Resumen

Los acuerdos públicos-privados para el desarrollo de proyectos de infraestructura constituyen una alianza estratégica entre sector público, desarrolladores y privados financieros. Los contratos contienen cláusulas de finalización anticipada, extensión de plazos, garantías de ingresos otorgándole flexibilidad estratégica. Esto hace que los métodos de valoración tradicionales sean ineficaces para estimar los recursos comprometidos por los gobiernos y el valor de la concesión para el privado. Se propone un modelo numérico binomial para cuantificar el valor contingente de garantías de ingreso mínimo, opción de cancelación anticipada, afectación a futuros presupuestos, valor económico de la inversión y tarifas de equilibrio.

Se utiliza el estudio de casos en administración, aplicado a un desarrollo de infraestructura vial y concesión de peaje. La anatomía del riesgo del proyecto se analiza con simulación sobre el proceso estocástico de ingresos y estimación del VAR. Se aplica el modelo binomial para estimar el valor contingente de la garantía mínima de ingresos, el momento de cancelación anticipada, el valor actual de los pasivos contingentes del gobierno y el valor del proyecto con flexibilidad estratégica desde la perspectiva del privado.

1. Introducción

Los proyectos de colaboración público-privado (PPP) constituyen un útil instrumento para la ejecución y financiación de obra de infraestructura a largo plazo. Las restricciones presupuestarias, la necesidad de ampliar la oferta de bienes y servicios públicos como las transferencias de riesgo, transforman este acuerdo en un instrumento de importancia significativa del sector público (Grimsey & Lewis, 2002). Desde el punto de vista financiero oxigena la ejecución presupuestaria pública, al no comprometer recursos en el financiamiento de la obra. Desde el punto de vista operativo, el sujeto público accede al conocimiento y experiencia del privado, bajo la premisa que este posee capacidad, eficiencia y flexibilidad para construir y gestionar proyectos de infraestructura, comparado con el sector público (Yescombe, 2002; Gatti, 2008).

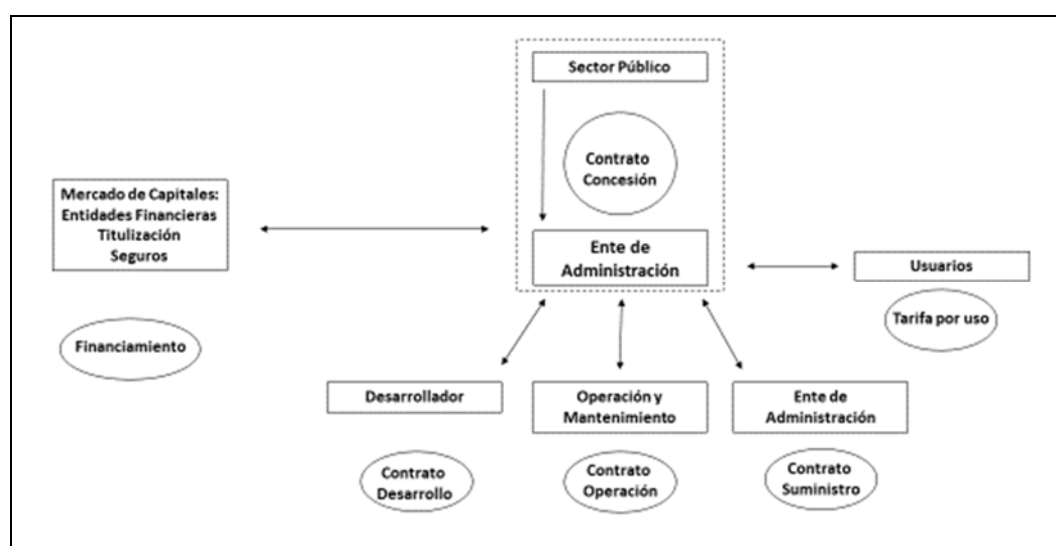
Existe una transferencia de riesgos financieros y operativos al sector privado en dos etapas. En la primera etapa el desarrollador, a través de acceder al mercado de capitales, asume el riesgo de inmovilización de recursos y desarrollo de la obra. En una segunda etapa tiene a su cargo el mantenimiento y operación de la inversión. La contraprestación por la asunción de riesgos se configura por el derecho de concesión a la explotación por un lapso temporal. El derecho permite la percepción de un flujo de ingresos, obtenidos a través del cobro de una tasa por el uso de la obra. Dicha corriente de ingresos es afectada al recupero de la inversión inicial, repago de financiamiento, mantenimiento y operación de la obra.

El acuerdo de concesión se gestiona a mediante la figura de un ente o consorcio de administración, con status jurídico independiente de las partes interviniente, creado a tales efectos. Es común que el ente administrador se encuentre integrado por el mismo desarrollador. Los

PPP se emplean principalmente en el desarrollo de obras de infraestructura vial, donde la estructura del contrato de concesión debe ser por un periodo suficiente para asegurar el recupero de la inversión.

La ingeniería financiera propia de los PPP difiere del financiamiento corporativo clásico (Brandao & Saravia, 2008). En un convenio PPP un grupo de patrocinadores, integrados por las firmas que intervienen en el proyecto como las entidades financieras y aseguradoras, proporcionan los recursos necesarios para el diseño, ejecución y gestión del proyecto de inversión. El desarrollo del proyecto y la gestión de la concesión se ve limitada por un conjunto de cláusulas (*convenants*). Las mismas tienden a encauzar las acciones a la concreción de la obra, la generación de ingresos y la afectación de los mismo al recupero de la inversión, repago de flujos de deuda y retorno de capital a los terceros involucrados. La ilustración 1 muestra la estructura de un PPP.

Ilustración 1: Diagrama acuerdo público privado



La arquitectura jurídica del acuerdo permite implementar un esquema de financiación y ejecución del proyecto gestionando los riesgos económicos y operativos, a diferencia de la modalidad tradicional de obra pública. Los PPP permiten una adecuada administración del riesgo, originando compromisos y responsabilidades mutuas entre las partes intervinientes. Consecuentemente, desde la perspectiva de la valuación y toma de decisiones, las herramientas financieras tradicionales resultan insuficientes para este tipo de acuerdos.

Los criterios clásicos no contemplan los intereses e incentivos de los actores y la flexibilidad estratégica de los convenios y los conflictos que pueden surgir durante su desarrollo y que pueden llevar a una terminación anticipada. En tal sentido, es menester aplicar modelos de valuación a partir de la teoría de opciones reales. En tal sentido, se propone un modelo básico a partir del modelo binomial, para valorar una obra de infraestructura vial bajo la modalidad PPP. El financiamiento de la misma proviene del desarrollador y del uso del mercado de capitales. La operación y mantenimiento, a partir de la concesión del cobro de tarifa por peaje corresponde a un ente administrador. El convenio dispone de la aplicación de garantías por ingresos mínimos a favor del concesionario.

El objetivo consiste en valorar el proyecto desde la perspectiva del privado y del sujeto público. Respecto del primero se pretende estimar el valor actual estratégico y repago de fondos por el financiamiento externo. En relación al gobierno, entender el valor actual de la liberación de fondos, transferencia de riesgos y valor actual de las potenciales garantías mínimas. Las garantías mínimas operan como una opción de venta, cuyo titular es el privado, ejerciéndola anualmente contra el concedente (lanzador). Por lo tanto, la valuación requiere de un modelo que capture el valor expandido, siendo aplicable el modelo binomial de opciones reales. Mediante un análisis de sensibilidad y optimización, son determinados los mínimos valores a definir por tarifas de peajes y mínimos plazos de otorgamiento de concesión.

En la sección 2 se desarrolla formalmente el modelo de valoración de garantías mínimas de ingreso. Después, mediante el análisis de caso, se estudia un contrato de PPP de infraestructura vial hipotético, donde se aplica el modelo y los análisis de sensibilidad y optimización para mínimos tarifas y plazos. Analizados los resultados y comparando los valores obtenidos se exponen las principales conclusiones.

2. La flexibilidad estratégica contenida en los acuerdos público-privados en proyectos de infraestructura

Valorar la flexibilidad contenida en un contrato público privado permite al sector público, como originador de la iniciativa, conocer el valor estratégico de la inversión en infraestructura, el costo a soportar y la no inmovilización de ingresos público en el presente. La teoría de las opciones reales proporciona un marco adecuado para cumplir este propósito. Los múltiples intereses y relaciones contractuales que son propios de un PPP hacen que el enfoque difiera del estudio de la flexibilidad estratégica tradicional. En este último se pretende maximizar valor; en cambio en un PPP permite valorar garantías contingentes.¹

La valoración de la flexibilidad estratégica reconoce un importante cuerpo de trabajos, que se pueden agrupar en tres (Zapata Quimbayo, 2020):

- a) *Valoración de garantías por ingresos mínimos*: Bowe & Lee, 2004; Garvin & Cheah, 2004; Wibowo, 2004; Cheah & Liu, 2006; Vassallo & Soliño, 2006; Brandao & Saravia, 2008; Blank et al, 2009; Lara-Galera & Soliño, 2010; Shan et al, 2010; Iyer & Sagheer, 2011; Pellegrino et al, 2013; Pantelias, 2015; Liu et al, 2016; Wang et al, 2019; Carbonara & Pellegrino, 2020; Zapata Quimbayo & Mejía Vega, 2022.
- b) *Finalización anticipada y renegociación condiciones concesión*: Iossa et al, 2007; Irwin & Mokdad, 2010; Iossa et al, 2014; (Xiong et al, 2015; Zhang & Xiong, 2015; Attarzadeh et al, 2017; Giraldo, 2019; Zapata Quimbayo & Mejía Vega, 2024.
- c) *Duración óptima y extensión contractual*: Ho & Liu, 2002; Zhang et al, 2018; Zapata Quimbayo & Mejía Vega, 2024.

¹ En este ensayo se hace un análisis endógeno suponiendo interacción pasiva entre las partes. Un análisis integral requiere estudiar la flexibilidad estratégica y posibles comportamientos de las partes, mediante un enfoque de opciones reales y teoría de juegos (Milanesi, 2025).

En los proyectos de infraestructura vial el nivel de tráfico es un importante factor de riesgo, dado el impacto que tiene sobre el nivel de ingresos de la concesión. El gobierno puede incorporar cláusulas de garantía de ingresos cuando los niveles de tráfico no generen recursos financieros para recupero de inversión y repago de deuda. El Estado asume el riesgo y dispone pisos que se activan en escenarios contingentes. Dichas garantías representan compromisos potenciales que deben cuantificarse adecuadamente. Permiten determinar el valor actual de la corriente contingente de recursos comprometidos en sucesivos ejercicios y el impacto fiscal y los pasivos contingentes a largo plazo. Los modelos de opciones reales brindan las herramientas para dicha valoración. En el apartado siguiente se desarrolla la valuación de la garantía de ingresos mínimos como opción de venta (*put*).

2.1 Garantía de ingreso mínimo

La garantía de ingreso mínimo es una alternativa tradicional para transferir riesgos y disponer un piso de ingresos a favor del concesionario. El gobierno asume el compromiso de compensación financiera a favor de la contraparte, cuando el nivel de ingresos por cobro de peaje se encuentra por debajo de un determinado umbral, denominado mínimo garantizado (Brandao y Saravia, 2008). El ingreso por concesión es el producto entre la tarifa y el nivel de tráfico vehicular, según la ecuación 1:

$$R_t = T_t \times f_t \quad \text{Ec 1}$$

En donde T_t representa el nivel de tráfico vehicular y f_t el valor de la tarifa.

La tarifa puede ajustar según nivel de precios, y consecuentemente en el pliego plantear una proyección estimada de inflación y corrección en moneda extranjera. Uno de los principales desafíos constituye proyectar el nivel de tráfico vehicular, asumiendo un comportamiento aleatorio. Para ello se parte de un nivel promedio de tráfico TDP_t y tarifa fDP_t . Se define como variable estocástica a TDP_t y determinística a fDP_t , con correcciones en nominalidad. El proceso estocástico, en este caso, se supone del tipo MGB (*geometric brownian motion*), a partir de la ecuación 2.

$$dT_t/T_t = \mu dt + \sigma dW_t \quad \text{Ec 2}$$

En donde μ y σ representan pendiente y volatilidad de T_t y W_t un proceso de Wiener (Wilmott, 2009).

La garantía de ingreso mínimo se asemeja a una opción de venta para el gobierno. La misma se ejerce periódicamente, por lo general en lapsos anuales, donde el aporte del gobierno es G_t . Este representa la diferencia entre el ingreso mínimo garantizado P_t y el observado R_t , tal que su expresión es la indicada en ecuación 3.

$$G_t = \text{Max} (P_t - R_t; 0) \quad \text{Ec 3}$$

La ecuación representa el desembolso contingente para el Estado, donde la garantía opera a favor del privado quien adopta el rol de tomador de la opción. El resultado esperado para el privado $E(R)_t$, se integra por P_t y R_t . Los ingresos contingentes tienen un piso explicado por P_t en donde la garantía de la siguiente manera,

$$E(R)_t = \begin{cases} R_t & \text{si } R_t > P_t \\ P_t & \text{si } R_t < P_t \end{cases} \quad \text{Ec 4}$$

El ingreso esperado para el concesionario es el máximo valor entre el ingreso garantizado y el obtenido:

$$E(R)_t = \text{Max} (P_t, R_t) \quad \text{Ec 5}$$

El valor actual de las contingentes garantías comprometidas surge de la sumatoria del valor de los *puts* europeos con vencimiento a un año (revisiones del contrato). Se extienden desde el primer año de la fase de operación, h hasta la finalización de la concesión T . Tal que $T \geq h$, por lo que el valor de la garantía para todo el periodo $T - h$, es equivalente al valor presente de G_t . Es de utilidad calcular el valor actual de las garantías por ingreso mínimo, como desembolso contingente del Estado. Asimismo, el put que ejerce el privado, en su diseño tiene en consideración las limitaciones (*constrains*) para asegurar el servicio de la deuda. En tiempo discreto, R_t puede proyectarse con un régimen binomial a partir de suponer dicho comportamiento para la variable aleatoria TDP_t . La ecuación 6 establece el valor actual de las garantías durante el periodo de concesión:

$$V_{\text{GIM}} = \left\{ \sum_{t=h}^{t=T} \left[\frac{t!}{j! (t-j)!} p^j (1-p)^{t-j} (u^j; d^{t-j} G_{t,j}) \right] \times (1+r)^{-t} \right\} \quad \text{Ec 6}$$

Donde p representa las probabilidades neutrales al riesgo, r la tasa libre de riesgo, $G_{t,j}$ las garantías contingentes por ingreso mínimo para cada nodo.

2.2 Cancelación anticipada

Esta condición permite a las partes finalizar, mediante el ejercicio de una opción, la ejecución del contrato. La cláusula puede plantearse desde la perspectiva del concesionario o concedente. En el primer caso, la misma se incorpora en el acuerdo, a los efectos de brindar flexibilidad estratégica y opción de salida al privado. Planteada a favor del concedente se activa frente a situaciones de incumplimiento² de parte de privado. Es común la valoración de las cláusulas de cancelación anticipada a favor del privado. Se asemeja a una opción de abandono (venta). El precio de ejercicio surge de la diferencia entre el valor ajustado de las inversiones realizadas en concepto de infraestructura y costos de operación menos los ingresos percibidos en concepto de peajes cobrados incluidas las garantías mínimas. El ejercicio de la opción se plantea de la siguiente manera:

$$CA_t = \begin{cases} \text{continua si } V_t > X_t \\ \text{no continua si } V_t < X_t \end{cases} \quad \text{Ec 7}$$

La ecuación de valor de la opción para cada periodo es,

$$CA_t = \text{Max}\{X_t - V_t; 0\} \quad \text{Ec 8}$$

Donde para cada periodo el precio de ejercicio (X_t) adopta un comportamiento variable integrado por dos componentes:

² Por lo general no cumplir con las condiciones de ejecución de obra (cronogramas, calidades y demás especificaciones). No es común, pero a veces se fijan multas o indemnizaciones que actúan como incentivos frente al incumplimiento.

a) $(\sum_{t=1}^n \text{Inv}_t + \text{com}_t) \times (1 + r)^t \times \%$ representa el acumulado correspondiente a inversiones en infraestructura y costos de operación capitalizadas hasta cada momento de ejercicio t . Dicho valor puede ser reconocido en su totalidad o una fracción (%).

b) $\sum_{t=1}^n I$ representa los ingresos acumulados percibidos hasta el momento t .

El valor del subyacente para cada periodo donde se realiza el ejercicio, es la suma entre el valor de los flujos de fondos netos obtenidos más el valor actual contingente de flujos de fondos esperados. $V_t = \text{FFL}_t + V_{\text{GIM}(t+1)}$. En el caso de incorporar la previsión de garantías por ingresos mínimos se emplea la ecuación 6, donde la expresión es la siguiente:

$$CA_t = \text{Max} \left\{ \left[\left(\sum_{t=1}^n \text{Inv}_t + \text{com}_t \right) \times (1 + r)^t \times \% - \sum_{t=1}^n I \right]; \text{GIM}_t + V_{\text{GIM}(t+1)} \right\} \quad \text{Ec 9}$$

Consecuentemente, el valor actual del proyecto incorporando el valor actual con garantías mínimas ($G_{t,j}$) ecuación 6 y el máximo valor de ejercicio esperado para la cancelación anticipada $\text{Max}(CA_{t,j})$

$$V_{\text{GIM}+CA} = \left\{ \sum_{t=h}^{t=T} \left[\frac{t!}{j! (t-j)!} p^j (1-p)^{t-j} (u^j; d^{t-j} G_{t,j}) \right] \times (1+r)^{-t} \right\} + \text{Max}(CA_{t,j}) \times (1+r)^{-t} \quad \text{Ec 10}$$

El ejercicio de la opción de cancelación, se supone que se da en el periodo donde alcanzar el máximo valor estimado.

3. Metodología: Valoración contrato de concesión público-privado con garantías mínimas

Metodológicamente, para ilustrar el funcionamiento del modelo propuesto, se aplica el análisis de caso en administración (Castro Monge, 2010). Para ello se toma como unidad de análisis un proyecto de concesión de infraestructura vial. El privado asume compromiso de financiación, diseño, operación y administración. Finalizado el periodo de concesión se transfiere al sector público. La obra implica la construcción de una ruta de doble calzada con dos tramos ruta (TR), cuya extensión total de 66 kilómetros, con tramos de 10,4 y 55,6 kilómetros, con conexión a capital e importantes puntos de acceso turístico.

Las etapas del proyecto son dos: a) Construcción con duración de tres años, al finalizar se entregan los dos trayectos (TR) y b) Operación y mantenimiento (O y M) con duración de 22 años. Se estima que el valor total de la inversión asciende a \$38.075 millones de pesos, u\$ 31.729.166.³ Se establece una tarifa diferencial de peaje inicial durante las fases de construcción y de operación. La tarifa promedio inicial propuesta durante la fase de construcción es \$500 y \$750 en la segunda etapa. Los recursos obtenidos se destinan para inversión de infraestructura.

³ Se supone una conversión al tipo de cambio spot (contado). Para la proyección de inflación, en particular en mercados emergentes se puede aplicar el modelo de valuación en dos monedas aplicando, proyectando la estructura temporal de tipo de interés. (Milanesi, 2017).

En la segunda etapa, luego de entregar la obra, los ingresos se afectan a operaciones, impuestos y el servicio de deuda. El flujo residual restante se destina al repago a concesionario. Los costos de operaciones y mantenimiento (O y M) son de \$560 millones anuales. La tasa de impuesto a la renta, por régimen especial, define una alícuota nominal del 10 %.

La estructura financiera del proyecto es la siguiente: a) privado concesionario 32 % y b) privado financiero préstamo 68 %. El préstamo acordado a una tasa de interés del 5 % con plazo de devolución 12 años. En este caso la entidad financiera exige una relación de cobertura del servicio de deuda de 1,2. La tasa libre de riesgo se supone del 3 % y se asume que los precios relativos se encuentran correlacionados perfectamente, con lo cual no se producen distorsiones a ser corregidas nominalmente, en la proyección de los flujos de fondos.⁴

El convenio incorpora dos cláusulas de flexibilidad: a) garantías de ingreso mínimo (GIM) y b) opción de cancelación anticipada (CA) a favor del concesionario. En lo que respecta a la primera. Conforme fue desarrollado, la primera se activa cuando el nivel de ingresos no supera un mínimo establecido. La segunda opción es ejercida si el valor esperado del proyecto son inferiores al valor ajustado de las inversiones, costos menos ingresos realizados. En este caso se supone que el reconocimiento de costos e inversiones es del 80 % y el ejercicio de la opción puede realizarse al finalizar la primera etapa, es decir en el tercer año. A los efectos de la valoración del contrato para el concesionario y la estimación de pasivos contingentes para el concedente, se requiere de su estimación *ex ante* mediante el modelo numérico propuesto.

En aras de simplificar, de los estudios de tráfico vehicular, se obtiene a partir de las series históricas, una tasa de tráfico promedio (todas las categorías) de 2,75 millones de rodados, anuales, transitando por la carretera. La serie arroja una pendiente (drift) de $\mu = 6\%$, con una volatilidad $\sigma = 14\%$. A los efectos de proyectar la corriente de tráfico vehicular anual, se supone que esta sigue un comportamiento estocástico del tipo geométrico browniano (GBM), mediante la siguiente expresión:

$$d(T_{t+1}/T_t) = \mu dt + \sigma \sqrt{t} dW \quad Ec 11$$

Donde dW es un proceso de Weiner con $Z=N(0,1)$.

En la tabla 1 se presenta las variables del proyecto a ser analizado.

4. Resultados del modelo

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en el proceso de valoración. En la primera parte la valuación tradicional, seguidamente la incorporación de garantías mínimas y determinación de tarifas de equilibrio.

⁴ En el caso de distorsiones en los precios relativos de los bienes, se requiere la corrección por inflación, optando por trabajar en términos reales (moneda de inicio) o nominales (con inflación proyectada). No es el objeto del presente trabajo, asumiendo estructura de precios relativos constante.

Tabla 1: Variables del caso de análisis

TR1 (tramo ruta 1 en km)	10,4	Inversión (millones)	38.075
TR2 (tramo ruta 2 en km)	55,6	Tarifa peaje promedio etapa 1	500
t(1) Duración inversión	2	Tarifa peaje promedio etapa 2	750
t(2) Duración concesión	22	Costos (O & M) (millones)	560
Wp (concesionario)	32,00 %	Cobertura servicio deuda	1,2
Wb (entidad financiera)	68,00 %	Plazo préstamo	12
ke (concesionario)	12,00 %	Tasa media vehiculos (millones)	2,75
ki (financiero)	5,00 %	μ (pendiente)	6 %
Tasa impuesto	10,00 %	σ (volatilidad)	14 %
CCPP (Costo Capital Promedio)	6,90 %	rf (tasa libre de riesgo)	3 %

4.1 Valor esperado del proyecto y anatomía del riesgo sin flexibilidad

El primer paso consiste en la construcción de los flujos de fondos del proyecto. Para ello primero se procede a elaborar el cuadro de marcha correspondiente al préstamo. Se calcula la cuota del sistema de pago del tipo francés. El objetivo es determinar el valor de la cuota tradicional ($\bar{C}_t$) a los efectos de compararla con la razón de cobertura de servicio de deuda (CSD).

$$\bar{C}_t = V \times \left[\frac{(1 + ki)^n \times ki}{(1 + ki)^n - 1} \right] \quad Ec 12$$

En la ecuación 12 V representa el importe del préstamo (\$29.891 millones), n el plazo de tiempo (12) y ki el costo financiero (5 %). El valor de la cuota fija es $\bar{C}_t = \$2.921,16$ millones. En el anexo, tabla A.1, se desarrolla el cuadro de marcha del préstamo.

La proyección de ingresos depende del nivel esperado de tráfico. A los efectos de estimar el valor del proyecto sin opciones, se propone estimar la variable de manera determinística, conforme se expresa en la ecuación 13.

$$T_{t+1} = \mu dt T_t + \sigma \sqrt{t} dT_t \quad Ec 13$$

Donde T_{t+1} representa el nivel esperado para el próximo periodo, T_t el nivel observado, siendo el inicial 2.75 millones de vehículos. La pendiente se encuentra expresada por $\mu = 6 \%$ y volatilidad de $\sigma = 14 \%$.

En el caso de proyectar un comportamiento aleatorio, la ecuación anterior incorpora un proceso de Weiner (W) con variable normal $Z \rightarrow (0,1)$.⁵ La ecuación empleada es:

$$\tilde{T}_{t+1} = \mu dt \tilde{T}_t + \sigma \sqrt{t} dW \rightarrow Z \rightarrow (0,1) \quad Ec 14$$

Las ecuaciones precedentes permiten construir y proyectar el flujo de fondos libres, conforme la ecuación 15.

⁵ Empleando planillas de cálculo se incorpora la variable aleatoria como

$T(t+1) = ((u * t * T(t)) + (INV. NORM(ALEATORIO(); 0; 1) * \sigma * \text{RAIZ}(t) * T(t))) + T(t)$

$$FFL_t = \{(T_{t+1} \times TP_e) - COM - C_t\} - T_e \quad Ec 15$$

En esta ecuación, TP_e representa la tarifa promedio por etapa, COM los costos de operación y mantenimiento, C_t la cuota efectiva pagada y T_e el impuesto pagado. Se supone ausencia de inflación esperada. El valor de la cuota del préstamo es el mayor entre la cuota original y el importe que resulta de dividir el flujo de fondos operativos por el coeficiente de cobertura de servicio de deuda, $[(T_{t+1} \times TP_e) - COM]/CSD$, conforme surge de la siguiente expresión:

$$C_t = Si\{V_t \leq \bar{C}_t; V_t[Si(\bar{C}_t \geq [(T_{t+1} \times TP_e) - COM]/CSD; \bar{C}_t; [(T_{t+1} \times TP_e) - COM]/CSD)\} \quad Ec 16$$

Para determinar el impuesto a las ganancias pagado (T_e) primero se calcula el impuesto a las ganancias del periodo (T_p) donde $(T \times I_t)$ representa el escudo fiscal por intereses, obtenido a partir del cuadro de marcha del préstamo (tabla A.1 del anexo).

$$T_p = -[(T_{t+1} \times TP_e) - COM] \times T + T \times I_t \quad Ec 17$$

El impuesto pagado surge en tanto no existan quebrantos del ejercicio anterior ($T_{p-1} > 0$), caso contrario estos son computados y compensados contra el impuesto del periodo, conforme reza en la siguiente ecuación:

$$T_e = Si[T_{p-1} > 0; T_{p-1} + T_p; T_p] \quad Ec 18$$

En la tabla 2 se presenta la proyección de los flujos de fondos determinísticos.

El valor actual neto para el privado asciende a \$313.809 millones, la diferencia entre valor actual de los flujos de fondos \$ 325.993 millones, menos la inversión privada \$ 12.184 millones, sin financiamiento. El valor actual obtenido de esta manera es determinístico pues el crecimiento proyectado de la demanda se encuentra explicado por la ecuación 13.

Un comportamiento aleatorio de la variable tráfico vehicular implica un análisis del riesgo del proyecto de mayor elaboración. Para ello la demanda de vehículos se proyecta mediante la ecuación 14. Este es el insumo para el sencillo modelo simulación,⁶ con 1.500 iteraciones. La tabla 3 captura una corrida de simulación correspondiente a los flujos del proyecto. La tabla 4 sintetiza los resultados de la simulación.

En este caso, el $E(V)$ asciende -\$ 1.083 millones, la probabilidad de ocurrencia de un valor actual positivo $P(VAN > 0)$ es del 47,59 %. Para un nivel de confianza 95 % el flujo en riesgo, $CaR = E(V) \times |Z^*| \times \sigma = \$29.485,77$, tal que el valor en riesgo $V^* = E(V) - CaR = -\$40.757$, es decir el 5 % de los casos dicho valor extremo puede verificarse. Los resultados del análisis estocástico conducen al rechazo del proyecto de parte del privado.

4.2 Valor del proyecto con garantía de ingresos mínimos y opción de cancelación anticipada

La garantía de ingresos mínimos es un piso en los ingresos contingentes a favor del concesionario, a cargo del concedente. En tal sentido, se propone estimar el valor actual de dicha garantía. Dicho resultado permite anticipar la suma contingente a ser comprometida en futuros

⁶ En este caso la simulación fue desarrollada a partir de la función @inv.aleatorio (0,1) MsExcel® en la ecuación 14 recreando la cantidad de iteraciones indicadas.

Tabla 2: Flujo de fondos proyectados determinístico

t	Tráfico promedio	Ingresos peaje	Costo operación	Préstamo				Impuesto efectivo	Flujo de fondos libre
				Cuota	Amortizac	Intereses	Saldo		
0	2,75						\$ 25.891,00		-\$ 38.075,00
1	3,30	\$ 1.650,00	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.626,61	\$ 1.294,55	\$ 24.264,39	\$ 20,46	-\$ 1.810,71
2	3,96	\$ 1.980,00	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.707,94	\$ 1.213,22	\$ 22.556,44	-\$ 0,22	-\$ 1.501,39
3	4,75	\$ 2.376,00	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.793,34	\$ 1.127,82	\$ 20.763,10	-\$ 68,82	-\$ 1.173,98
4	5,70	\$ 4.276,80	\$ 560,00	\$ 3.097,33	\$ 2.059,18	\$ 1.038,16	\$ 18.703,93	-\$ 267,86	\$ 351,60
5	6,84	\$ 5.132,16	\$ 560,00	\$ 3.810,13	\$ 2.874,94	\$ 935,20	\$ 15.828,99	-\$ 363,70	\$ 398,33
6	8,21	\$ 6.158,59	\$ 560,00	\$ 4.665,49	\$ 3.874,04	\$ 791,45	\$ 11.954,94	-\$ 480,71	\$ 452,38
7	9,85	\$ 7.390,31	\$ 560,00	\$ 5.691,93	\$ 5.094,18	\$ 597,75	\$ 6.860,77	-\$ 623,26	\$ 515,13
8	11,82	\$ 8.868,37	\$ 560,00	\$ 6.923,64	\$ 6.580,61	\$ 343,04	\$ 280,16	-\$ 796,53	\$ 588,20
9	14,19	\$ 10.642,05	\$ 560,00	\$ 294,17	\$ 280,16	\$ 14,01	\$ -	-\$ 1.006,80	\$ 8.781,07
10	17,03	\$ 12.770,46	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 1.221,05	\$ 10.989,41
11	20,43	\$ 15.324,55	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 1.476,45	\$ 13.288,09
12	24,52	\$ 18.389,46	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 1.782,95	\$ 16.046,51
13	29,42	\$ 22.067,35	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 2.150,73	\$ 19.356,61
14	35,31	\$ 26.480,82	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 2.592,08	\$ 23.328,74
15	42,37	\$ 31.776,98	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 3.121,70	\$ 28.095,28
16	50,84	\$ 38.132,38	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 3.757,24	\$ 33.815,14
17	61,01	\$ 45.758,85	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 4.519,89	\$ 40.678,97
18	73,21	\$ 54.910,62	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 5.435,06	\$ 48.915,56
19	87,86	\$ 65.892,75	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 6.533,27	\$ 58.799,47
20	105,43	\$ 79.071,30	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 7.851,13	\$ 70.660,17

Tabla 3: Flujo de fondos proyectado aleatorio

t	Tráfico promedio	Ingresos peaje	Costo operación	Préstamo				Impuesto efectivo	Flujo de fondos libre
				Cuota	Amortizac	Intereses	Saldo		
0	2,75						\$ 25.891,00		-\$ 38.075,00
1	2,44	\$ 1.261,75	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.626,61	\$ 1.294,55	\$ 24.264,39	\$ 299,49	-\$ 1.960,84
2	2,52	\$ 1.284,08	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.707,94	\$ 1.213,22	\$ 22.556,44	\$ 586,75	-\$ 1.632,66
3	2,57	\$ 2.143,89	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.793,34	\$ 1.127,82	\$ 20.763,10	\$ 563,75	-\$ 1.633,33
4	2,86	\$ 2.140,97	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.883,01	\$ 1.038,16	\$ 18.880,10	\$ 475,65	-\$ 861,62
5	2,85	\$ 2.243,21	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 1.977,16	\$ 944,00	\$ 16.902,94	\$ 460,48	-\$ 879,72
6	2,99	\$ 2.311,09	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 2.076,02	\$ 845,15	\$ 14.826,92	\$ 588,06	-\$ 649,89
7	3,08	\$ 2.324,49	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 2.179,82	\$ 741,35	\$ 12.647,11	\$ 738,96	-\$ 431,11
8	3,10	\$ 2.854,95	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 2.288,81	\$ 632,36	\$ 10.358,30	\$ 935,37	-\$ 221,30
9	3,81	\$ 2.847,70	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 2.403,25	\$ 517,91	\$ 7.955,05	\$ 318,86	-\$ 307,35
10	3,80	\$ 3.813,43	\$ 560,00	\$ 2.921,16	\$ 2.523,41	\$ 397,75	\$ 5.431,64	-\$ 244,99	-\$ 878,46
11	5,08	\$ 3.346,98	\$ 560,00	\$ 3.177,86	\$ 2.906,28	\$ 271,58	\$ 2.525,37	-\$ 354,18	-\$ 278,61
12	4,46	\$ 3.367,42	\$ 560,00	\$ 2.908,33	\$ 2.782,06	\$ 126,27	-\$ 256,69	-\$ 322,07	-\$ 443,42
13	4,49	\$ 3.416,31	\$ 560,00	-\$ 269,53	-\$ 256,69	-\$ 12,83	\$ -	-\$ 338,03	\$ 2.738,92
14	4,56	\$ 3.133,07	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 341,63	\$ 2.514,68
15	4,18	\$ 2.842,79	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 313,31	\$ 2.259,76
16	3,79	\$ 3.240,64	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 284,28	\$ 1.998,51
17	4,32	\$ 3.712,59	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 324,06	\$ 2.356,58
18	4,95	\$ 3.603,81	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 371,26	\$ 2.781,33
19	4,81	\$ 4.815,49	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 360,38	\$ 2.683,43
20	6,42	\$ 4.427,11	\$ 560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 481,55	\$ 3.773,94

Tabla 4: Estadísticos del proyecto y flujos en riesgo

Media	-\$ 1.083,42
Desvio	\$ 17.926,08
Max	\$ 157.135,61
Min	-\$ 25.487,48
X=E(VAN)	0
Z	0,06043806
P(VAN >0)	0,47590337
nivel confianza	0,95
Z*(en valores absolutos)	1,64485363
E(V)	-\$ 11.271,87
CaR (sigma)*Dsvt	\$ 29.485,77
V*	-\$ 40.757,64

presupuestos de parte del Estado (ecuación 2). Asimismo, permite cuantificar el valor del proyecto para el privado, incorporando la flexibilidad estratégica que otorga este *put*, que oficia como seguro de ingresos (ecuación 4).

Su estimación requiere de proyectar bajo un régimen binomial la tasa de tráfico. Con un nivel de volatilidad $\sigma = 14\%$, se obtienen los coeficientes $u = e^{0.14}$ y $d = e^{-0.14}$, a los efectos de proyectar el nivel de tráfico, $T_{t+1} = [T_t \times u; T_t \times d]$, conforme surge de las tablas A.2 y A.3 del anexo. Las tablas A.4 y A.5 del anexo exponen el proceso binomial correspondientes a ingresos por peajes, producto entre precio y cantidades $I_{t+1} = [T_{t(u)} \times TP_e; T_{t(d)} \times TP_e]$. Finalmente, las tablas A.6 y A.7 del anexo para cada periodo presentan las probabilidades equivalentes ciertas, para lo cual se emplea la siguiente expresión:

$$p = \frac{(1 + r) - d}{(u - d)} \quad Ec 19$$

Y la respectiva combinatoria

$$p(i, j) = \frac{t!}{j!(t-j)!} p^j (1-p)^{t-j} \quad Ec 20$$

Aplicando la ecuación 6 se obtiene para cada periodo el valor de los ingresos mínimo de garantías. Estos ofician de piso, en términos de opciones de venta, equivalentes al valor de ejercicio cuando lo recaudado se encuentra por debajo de la garantía (ecuación 4). La tabla 5 expone las garantías proyectadas durante todo el periodo de concesión.

Las tablas A.8, A.9 y A.10 del anexo expresan, durante la vigencia del contrato de concesión, los diferentes ejercicios del *put* como consecuencia de activarse la garantía por ingresos (ecuación 2).

Tabla 5: Valor ejercicio garantías mínimas en base al modelo binomial

<i>t</i>	<i>GIM</i>	<i>t</i>	<i>GIM</i>	<i>t</i>	<i>GIM</i>
1	\$ 1.767,48	9	\$ 2.716,21	16	\$ 3.340,60
2	\$ 1.820,50	10	\$ 2.797,70	17	\$ 3.440,82
3	\$ 1.875,12	11	\$ 2.881,63	18	\$ 3.544,04
4	\$ 2.343,03	12	\$ 2.968,08	19	\$ 3.650,36
5	\$ 2.413,32	13	\$ 3.057,12	20	\$ 3.759,87
6	\$ 2.485,72	14	\$ 3.148,83	21	\$ 3.872,67
7	\$ 2.560,29	15	\$ 3.243,30	22	\$ 3.988,85
8	\$ 2.637,10				

El valor actual de las garantías proyectadas (última fila tablas 6, 7 y 8) permite estimar el pago contingente al que se compromete el gobierno:

$$V_{GIM} = \sum_{t=1}^{n=22} E(V_{GIM,t}) \times e^{-rt} = \$7.781,36$$

El resultado obtenido representa el valor de los pasivos contingentes para el gobierno, por un importe de \$ 7.781,36 millones. En términos relativos, la deuda contingente implica una afectación de recursos futuros equivalentes al 20 % de la inversión total relacionada con la obra de infraestructura.

Desde la perspectiva del concesionario, las tablas A.11, A.12 y A.13 del anexo presenta por ejercicio el valor esperado con garantía mínima de ingresos (ecuaciones 4 y 6). El valor actual de los flujos con garantía de ingresos mínimos asciende a \$ 10.756, millones y sin garantía de ingresos \$ 2.975, millones producto de restar el valor de los ingresos con garantía y el valor actual contingente de la garantía por ingresos mínimos, $VA_{s/gim} = VA_{c/gim} - V_{GIM}$.

En tal caso el proyecto no es atractivo. Un ejercicio alternativo consiste en sensibilizar la tarifa en el tramo de operación a los efectos de calcular el precio de equilibrio para que el VAN=0 y la ecuación económica de beneficio remunere los factores productivos del proyecto de infraestructura.⁷ En la tabla 6 se exponen los resultados.

La tarifa de equilibrio para un contrato de concesión con garantías asciende a \$ 624,37 en el primer tramo y \$ 757,30 en el segundo tramo. En el caso plantear una tarifa de equilibrio, el gobierno debe desembolsar contingentemente en futuros ejercicios la suma de \$ 7.993,72 millones, el equivalente el 21 % del presupuesto de inversión de la obra. En este escenario, si bien la tarifa sufre un incremento significativo en la primera etapa, la corrección correspondiente a la segunda etapa es ínfima, igual que el impacto sobre el valor contingente del pasivo.

⁷ La iteración se realiza con Solver MSeExcel® buscando como restricción que el $V(c/gim)=0$, tarifa en el tramo 1 y 2 > 0; cambiando el valor de la tarifa 2.

Tabla 6: Tarifas de equilibrio $VAN = 0$

VA GIM (Estado)	\$ 7.781,36
VA GIM % sobre Inversión	20 %
VA FFL con GIM privado	\$ 10.756,38
VA FFL sin GIM privado	\$ 2.975,02
VAN con GIM	-\$ 1.427,62
VAN sin GIM	-\$ 9.208,98
Tarifa equilibrio $VAN = 0$ con GIM (I)	\$ 624,37
Δ sobre tarifa original	24,9 %
Tarifa equilibrio $VAN = 0$ con GIM (II)	\$ 757,30
Δ sobre tarifa original	1,0 %

En el caso de la opción de cancelación anticipada es necesario calcular el precio de ejercicio. La valoración del contrato se realiza al inicio y, por tanto, el precio de ejercicio se calcula *ex ante*. Para cada periodo se agrega el valor de inversión y los costos de mantenimiento incurridos hasta la fecha, los cuales son actualizados a la tasa libre de riesgo, $(\sum_{t=1}^n \text{Inv}_t + \text{com}_t) \times (1 + r)^t$. La capitalización (columna c de tabla 7) se realiza a la tasa libre de riesgo. La inversión inicial capitalizada surge de la columna e para cada periodo. Los costos de operación y mantenimiento (COM) acumulados y actualizados se detallan en la columna f.

Los ingresos acumulados mínimos por periodo $\sum_{t=1}^n I \times (1 + r)^t$ se exponen en la columna d. Se parte de la premisa que estos están representados por el valor esperado de garantía de ingresos mínimo (GIM), capitalizados a la tasa libre de riesgo. La columna g representa por periodo la diferencia entre ingresos y costos acumulados $\sum_{t=1}^n I \times (1 + r)^t - (\sum_{t=1}^n \text{Inv}_t + \text{com}_t) \times (1 + r)^t$. La columna h, indica el precio de ejercicio, reconociendo un 80 % del valor de la inversión neta.

El ejercicio de la opción se plantea en la tabla 8 de acuerdo con las ecuaciones 7 y 8. En efecto es el máximo valor entre $CA_t = \text{Max}\{X_t - V_t; 0\}$, donde $V_t = FFL_t + V_{(t+1)}$. Los máximos valor de la opción de cancelación se presentan a partir del periodo 13, siendo el ejercicio óptimo en el periodo 21. El valor de la opción es de $13.740_{t=21} = \text{Max}\{21.578_{t=21} - 7.837_{t=21}\}$, como consecuencia de encontrarse próximo a su finalización.

El valor total del proyecto (ecuación 10) surge de la suma del valor con garantías mínimas $V_{\text{GIM}} = -1427,42$ y el máximo valor de la opción de cancelación actualizado $13.740_{t=21} \times (1 + 0.03)^{-19} = 7.836,06$ tal que el valor con opciones es de 6.408,43 millones desde la perspectiva del concesionario. Con tarifas de equilibrio para $VAN=0$ el ejercicio de opción de cancelación acontece recién a partir de $t=14$, con ejercicio en $t=21$. El pasivo contingente para el gobierno asciende a \$ 7.781 millones y la eventual inversión por cancelación anticipada es de \$ 7.506 millones. Esta se calcula suponiendo un ejercicio en $t=21$, neto del valor actual de la diferencia entre ingresos potenciales y mínimos garantizados para el próximo periodo. Los valores se exponen en la tabla 9.

Tabla 7: Determinación del precio de ejercicio opción de cancelación anticipada

P	Inversión y COM (a)	GIM Proyectada (b)	Factor Capitaliz (c)	Ingresos Acumulados (d)	Inversión Ajustada (e)	COM Ajustados (f)	V (g)	X=V*% (h)
0	\$ 12.184,00							
1	-\$ 3.481,16	\$ 1.767,48	1,00	\$ 1.767,48	-\$ 12.549,52	-\$ 3.481,16	\$ 14.263,20	\$ 11.410,56
2	-\$ 3.481,16	\$ 1.820,50	1,03	\$ 3.641,01	-\$ 12.926,01	-\$ 7.066,76	\$ 16.351,76	\$ 13.081,41
3	-\$ 3.481,16	\$ 1.875,12	1,06	\$ 5.625,36	-\$ 13.313,79	-\$ 10.759,93	\$ 18.448,35	\$ 14.758,68
4	-\$ 3.690,60	\$ 2.343,03	1,09	\$ 8.137,15	-\$ 13.713,20	-\$ 14.773,32	\$ 20.349,37	\$ 16.279,50
5	-\$ 4.410,05	\$ 2.413,32	1,13	\$ 10.794,58	-\$ 14.124,60	-\$ 19.626,57	\$ 22.956,59	\$ 18.365,27
6	-\$ 5.273,39	\$ 2.485,72	1,16	\$ 13.604,14	-\$ 14.548,33	-\$ 25.488,76	\$ 26.432,96	\$ 21.146,37
7	-\$ 6.309,41	\$ 2.560,29	1,19	\$ 16.572,55	-\$ 14.984,78	-\$ 32.562,83	\$ 30.975,06	\$ 24.780,05
8	-\$ 7.552,62	\$ 2.637,10	1,23	\$ 19.706,83	-\$ 15.434,33	-\$ 41.092,33	\$ 36.819,84	\$ 29.455,87
9	-\$ 571,95	\$ 2.716,21	1,27	\$ 23.014,24	-\$ 15.897,36	-\$ 42.897,05	\$ 35.780,17	\$ 28.624,13
10	-\$ 560,00	\$ 2.797,70	1,30	\$ 26.502,37	-\$ 16.374,28	-\$ 44.743,96	\$ 34.615,87	\$ 27.692,70
11	-\$ 560,00	\$ 2.881,63	1,34	\$ 30.179,07	-\$ 16.865,51	-\$ 46.646,28	\$ 33.332,72	\$ 26.666,18
12	-\$ 560,00	\$ 2.968,08	1,38	\$ 34.052,52	-\$ 17.371,47	-\$ 48.605,67	\$ 31.924,63	\$ 25.539,70
13	-\$ 560,00	\$ 3.057,12	1,43	\$ 38.131,21	-\$ 17.892,61	-\$ 50.623,84	\$ 30.385,24	\$ 24.308,20
14	-\$ 560,00	\$ 3.148,83	1,47	\$ 42.423,98	-\$ 18.429,39	-\$ 52.702,56	\$ 28.707,97	\$ 22.966,37
15	-\$ 560,00	\$ 3.243,30	1,51	\$ 46.940,00	-\$ 18.982,28	-\$ 54.843,63	\$ 26.885,91	\$ 21.508,73
16	-\$ 560,00	\$ 3.340,60	1,56	\$ 51.688,80	-\$ 19.551,74	-\$ 57.048,94	\$ 24.911,89	\$ 19.929,51
17	-\$ 560,00	\$ 3.440,82	1,60	\$ 56.680,28	-\$ 20.138,30	-\$ 59.320,41	\$ 22.778,43	\$ 18.222,74
18	-\$ 560,00	\$ 3.544,04	1,65	\$ 61.924,73	-\$ 20.742,44	-\$ 61.660,02	\$ 20.477,74	\$ 16.382,19
19	-\$ 560,00	\$ 3.650,36	1,70	\$ 67.432,83	-\$ 21.364,72	-\$ 64.069,82	\$ 18.001,71	\$ 14.401,37
20	-\$ 560,00	\$ 3.759,87	1,75	\$ 73.215,69	-\$ 22.005,66	-\$ 66.551,92	\$ 15.341,89	\$ 12.273,51
21	-\$ 560,00	\$ 3.872,67	1,81	\$ 79.284,82	-\$ 22.665,83	-\$ 69.108,48	\$ 12.489,48	\$ 9.991,58
22	-\$ 560,00	\$ 3.988,85	1,86	\$ 85.652,22	-\$ 23.345,80	-\$ 71.741,73	\$ 9.435,32	\$ 7.548,25

Tabla 8: Ejercicio por periodo opción de cancelación anticipada

t	$V=FFL(t)+V$	X	$dec.$	t	$V=FFL(t)+V$	X	$dec.$	t	$V=FFL(t)+V$	X	$dec.$
3	\$ 15.893,54	\$ 15.652,97	c	10	\$ 34.661,27	\$ 28.949,27	c	17	\$ 20.472,36	\$ 26.916,71	nc
4	\$ 18.241,37	\$ 17.191,34	c	11	\$ 33.169,22	\$ 22.079,30	c	18	\$ 17.658,15	\$ 25.749,13	nc
5	\$ 19.962,68	\$ 19.290,38	c	12	\$ 31.499,59	\$ 25.713,93	c	19	\$ 14.629,85	\$ 24.473,83	nc
6	\$ 22.404,94	\$ 22.079,30	c	13	\$ 29.663,65	\$ 30.382,09	nc	20	\$ 11.350,58	\$ 23.085,40	nc
7	\$ 25.687,43	\$ 25.713,93	nc	14	\$ 27.658,85	\$ 29.824,01	nc	21	\$ 7.837,63	\$ 21.578,20	nc
8	\$ 30.045,30	\$ 30.382,09	nc	15	\$ 25.455,00	\$ 28.949,27	nc	22	\$ 7.993,22	\$ 19.946,34	nc
9	\$ 35.726,71	\$ 22.079,30	c	16	\$ 23.072,28	\$ 27.981,76	nc				

Tabla 9: Descripción resultados proyecto perspectiva publico-privado

	Privado	Público
Valor proyecto sin opciones	-\$ 9.208,98	
Pasivo contingente GIM		\$ 7.781,36
Valor proyecto con opción GIM	-\$ 1.427,62	
Valor proyecto con opción cancelación anticipada	\$ 7.836,06	
Inversion contingente rescate en periodo óptimo		\$ 7.565,53
Ejercicio > t	t > 13	
Ejercicio óptimo t	t = 21	
Tarifas equilibrio I VAN=0	\$ 624,37	
Tarifas equilibrio II VAN=0	\$ 757,30	

5. Conclusiones

Los acuerdos para obra de infraestructura público-privado involucran un conjunto de sujetos y relaciones contractuales cuya complejidad, hace que herramientas tradicionales como el valor actual del proyecto (descuento de flujos de fondos), brinde información insuficiente relativa al valor intrínseco del proyecto. Las tres partes intervinientes, gobierno, privado desarrollador y entidades financieras, presentan diferentes objetivos. El primero, mediante la obra de infraestructura, busca mejorar el bienestar de la población, mediante la provisión de un bien o servicio público o cuasi público. Los privados pretenden obtener beneficios marginales que potencien su modelo de negocio. El convenio debe contemplar los reaseguros para cumplir con los objetivos de las partes. En tal sentido, la incorporación de opciones, brinda flexibilidad estratégica al proyecto y mayor atractivo a la contraparte privada. Un tipo de opcionalidad se encuentra dada por la garantía de ingreso mínimo, como reaseguro del nivel de ingresos a favor del concesionario. El presente trabajo desarrolla un modelo de valoración aplicando la teoría de opciones reales. El modelo se estructura en las siguientes etapas:

- Se proyectan los flujos de fondos de manera determinística y estocástica, suponiendo un proceso geométrico browniano. Asimismo, se estima contingentemente el repago del financiamiento, aplicando ratios de cobertura de servicio de deuda sobre cuotas fijas del préstamo. Se calcula el valor actual determinístico y aleatorio sin opciones reales.
- Se analiza la anatomía del riesgo con los estadísticos descriptivos. Adicionalmente se incorpora en el análisis la probabilidad de valor actual positivo, el valor en riesgo (VAR) del proyecto.
- Se estiman, suponiendo un proceso estocástico binomial, las garantías de ingresos mínimos a ser definidas como ejercicios de opciones (*put*) que se incorporan en el convenio, donde el gobierno es el lanzador y el privado el tomador.

- d) Se estima el momento óptimo de ejercicio de la opción de finalización anticipada contenida en el convenio, anticipando el valor del reembolso contingente y momento a cargo de concedente.
- e) El valor actual estratégico del proyecto para el privado con opcionalidad y la posibilidad de establecer tarifas de equilibrio donde el valor actual sea cero para las partes intervinientes.

El análisis de caso, sobre un proyecto de infraestructura vial, permite brindar información acerca de los alcances y resultados del modelo propuesto, a saber:

- a) Desde la perspectiva del gobierno, estima el valor actual contingente de los pagos futuros en concepto de garantía por ingreso mínimo y reembolsos contingentes por cancelación. El valor definido debe ser incorporado en el acuerdo, ya que oficia de ejercicio a favor de concesionario. Asimismo, permite determinar la cuantía de pasivos contingentes o recursos a ser afectados en futuros presupuestos, vinculado al ejercicio de la garantía y finalización anticipada.
- b) Para el privado, calcula el valor actual estratégico. Este se integra por el valor actual del proyecto sin flexibilidad más el valor de las opciones de garantía y cancelación. Actúan como una combinación de *puts* estableciendo pisos al riesgo de tráfico. Además de proyectar el repago del servicio de la deuda y plazo a favor del privado financiero.
- c) Para las partes, conforme se expone en el caso, permite renegociar tarifas a los efectos de lograr un valor actual cero, donde los factores de la producción sean remunerados. En tal sentido, el modelo es planteado con un conjunto de restricciones para establecer la tarifa de equilibrio.

Una futura línea de investigación implica incorporar la cuantificación de penalidades por incumplimiento. Estas, calculadas a partir de pagos contingentes mediante teoría de opciones y teoría de juegos.

REFERENCIAS

- Attarzadeh, M., Chua, D., Beer, M. & Abbott, E. (2017). *Options-based negotiation management of PPP-BOT infrastructure projects*. Construction Management and Economics, 35 (11-12): 676-692.
- Blank, F., Baida, T. & Dias, M. (2009). *Real options in public private partnership-case of a toll road concession*. 13th Annual International Conference on Real Options. Portugal: Real Options Group.
- Bowe, M. & Lee, D. (2004). *Project evaluation in the presence of multiple embedded real options: evidence from the Taiwan High-Speed Rail Project*. Journal of Asian Economics, 15 (1): 71-98.
- Brandao, L. & Saravia, E. (2008). *The option value of government guarantees in infrastructure projects*. Construction Management and Economics, (11): 1171-1180.
- Carbonara, N. & Pellegrino R. (2020). *The role of public private partnerships in fostering innovation*. Construction Management and Economics, 38 (2): 140-156.
- Castro Monge, E. (2010). *El estudio de casos como metodología de investigación y su importancia en la dirección y administración de empresas*. Revista Nacional de Administración, 1 (2): 31-54.

- Cheah, C. y Liu, J. (2006). *Valuing governmental support in infrastructure projects as real options using Monte Carlo simulation*. Construction Management and Economics, 24 (5): 545-554.
- Garvin, M. & Cheah, C. (2004). *Valuation techniques for infrastructure investment decisions*. Construction Management and Economics, 22 (4): 373-383.
- Gatti, S. (2008). *Project finance in theory and practice: Designing, structuring, and financing private and public projects*. Academic Press
- Giraldo, A. (2019). *Valoración del mecanismo de terminación anticipada en los contratos de concesión 4G en Colombia*. ODEON, 16: 67-95.
- Grimsey, D. & Lewis, M. (2002). *Evaluating the risks of public private partnerships for infrastructure projects*. International Journal of Project Management, 20: 107-118.
- Ho, S. & Liu, L. (2002). *An option pricing-based model for evaluating the financial viability of privatized infrastructure projects*. Construction Management and Economics, 20 (2): 143-156.
- Iossa, E., Spagnolo, G. & Vellez, M. (2007). *Best practices on contract design in public-private partnerships*. World Bank.
- Iossa, E., Spagnolo, G. & Vellez, M. (2014). *The risks and tricks in public-private partnerships*. IEFCE The Center for Research on Energy and Environmental Economics and Policy at Bocconi University, Working Paper Series 64.
- Irwin, T. & Mokdad, T. (2010). *Managing contingent liabilities in public-private partnerships*. World Bank.
- Iyer, C. & Sagheer, M. (2011). *A real options based traffic risk mitigation model for build-operate-transfer highway projects in India*. Construction Management and Economics, 29 (8): 771-779.
- Lara-Galera, A. & Soliño, A. (2010). *A real options approach for the valuation of highway concessions*. Transportation Science, 44 (3): 416-427.
- Liu, J., Gao, R., Cheah, C. & Luo, J. (2016). *Incentive mechanism for inhibiting investors' opportunistic behavior in PPP projects*. International Journal of Project Management, 34 (7): 1102-1111.
- Milanesi, G. (2017). *Valuación de empresas: Enfoque integral para mercados emergentes e inflacionarios*. Estudios Gerenciales, 33 (145): 377-390.
- Milanesi, G. (2025). *Un modelo de opciones reales y teoría de juegos para valorar acuerdos estratégicos y penalidades*. Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, 39: 1-26.
- Pantelias, A. (2015). *A conceptual framework for transport infrastructure PPP project credit assessments*. Journal of Finance and Economics, 3 (6): 105-111.
- Pellegrino, R. Vajdic, N. & Carbonara, N. (2013). *Real option theory for risk mitigation in transport PPPs*. Built Environment Project and Asset Management, 3 (2): 199-213.
- Shan, L., Garvin, M. & Kumar, R. (2010). *Collar options to manage revenue risks in real toll public-private partnership transportation projects*. Construction Management and Economics, 28 (10): 1057-1069.
- Vassallo, J. & Soliño, A. (2006). *Minimum income guarantee in transportation infrastructure concessions in Chile*. Journal of the Transportation Research Board, 1960 (1): 15-22.
- Wang, Y., Gao, H. & Liu, J. (2019). *Incentive game of investor speculation in PPP highway projects based on the government minimum revenue guarantee*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 125: 20-34.
- Wibowo, A. (2004). *Valuing guarantees in a BOT infrastructure project*. Engineering Construction & Architectural Management, 11 (6): 395-403.
- Wilmott, P. (2009). *Frequently asked questions in quantitative finance*. Wiley.
- Xiong, W., Zhang, X. & Chen, H. (2015). *Early-termination compensation in public-private partnership projects*. Journal of Construction Engineering and Management, 142 (4): 04015098.

- Yescombe, E. (2002). *Principles of project finance*. Academic Press.
- Zapata Quimbayo, Q. (2020). *Opciones reales: Una guía teórico práctica para la valoración de inversiones bajo incertidumbre mediante modelos de tiempo discreto y simulación Monte Carlo*. Universidad Externado de Colombia.
- Zapata Quimbayo, C. & Mejía Vega, C. (2022). *Credit risk in infrastructure PPP projects under the real options approach*. Construction Management and Economics, 41 (4): 293-306.
- Zapata Quimbayo, C. & Mejía Veja, C. (2024). *Optimal early termination in PPP projects based on real options theory*. ODEON, 25: 117-141.
- Zhang, X. & Xiong, W. (2015). *Renegotiation and early-termination in public private partnerships*. International Journal of Architecture, Engineering and Construction, 4 (4): 204-213.
- Zhang, Y., Feng, Z. & Zhang, S. (2018). *The effects of concession period structures on BOT road contracts*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 107: 106-125.

Anexo

Tabla A.1: Cuadro de marcha sistema préstamo

Periodo	Cuota	Amortización	Interes	Saldo
0				\$ 25.891,00
1	\$ 2.921,16	\$ 1.626,61	\$ 1.294,55	\$ 24.264,39
2	\$ 2.921,16	\$ 1.707,94	\$ 1.213,22	\$ 22.556,44
3	\$ 2.921,16	\$ 1.793,34	\$ 1.127,82	\$ 20.763,10
4	\$ 2.921,16	\$ 1.883,01	\$ 1.038,16	\$ 18.880,10
5	\$ 2.921,16	\$ 1.977,16	\$ 944,00	\$ 16.902,94
6	\$ 2.921,16	\$ 2.076,02	\$ 845,15	\$ 14.826,92
7	\$ 2.921,16	\$ 2.179,82	\$ 741,35	\$ 12.647,11
8	\$ 2.921,16	\$ 2.288,81	\$ 632,36	\$ 10.358,30
9	\$ 2.921,16	\$ 2.403,25	\$ 517,91	\$ 7.955,05
10	\$ 2.921,16	\$ 2.523,41	\$ 397,75	\$ 5.431,64
11	\$ 2.921,16	\$ 2.649,58	\$ 271,58	\$ 2.782,06
12	\$ 2.921,16	\$ 2.782,06	\$ 139,10	\$ -

Tabla A.2: Proceso binomial tráfico (t=11 hasta 22)

[illegible]

Tabla A.3: Proceso binomial tráfico ($t=1$ hasta 10)

[illegible]

Tabla A.4: Proceso binomial ingresos (t=12 hasta 22)

[illegible]

Tabla A.5: Proceso binomial ingresos (t=1 hasta 11)

[illegible]

Tabla A.6: Combinatoria coeficientes equivalentes ciertos (t=12 hasta 22)

[illegible]

Tabla A.7: Combinatoria coeficientes equivalentes ciertos (t=1 hasta 11)

[illegible]

Tabla A.8: Valor contingente garantías periodos 22 a 16

16	17	18	19	20	21	22
\$ 586,40	\$ 272,58	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 1.259,34	\$ 1.046,64	\$ 789,92	\$ 482,21	\$ 115,45	\$ -	\$ -
\$ 1.767,93	\$ 1.631,67	\$ 1.462,86	\$ 1.256,27	\$ 1.005,84	\$ 704,60	\$ 344,52
\$ 2.152,32	\$ 2.073,82	\$ 1.971,46	\$ 1.841,29	\$ 1.678,78	\$ 1.478,66	\$ 1.234,90
\$ 2.442,84	\$ 2.407,99	\$ 2.355,84	\$ 2.283,44	\$ 2.187,37	\$ 2.063,69	\$ 1.907,84
\$ 2.662,40	\$ 2.660,55	\$ 2.646,36	\$ 2.617,62	\$ 2.571,76	\$ 2.505,84	\$ 2.416,44
\$ 2.828,35	\$ 2.851,43	\$ 2.865,93	\$ 2.870,18	\$ 2.862,28	\$ 2.840,01	\$ 2.800,83
\$ 2.953,77	\$ 2.995,70	\$ 3.031,87	\$ 3.061,06	\$ 3.081,84	\$ 3.092,57	\$ 3.091,34
\$ 3.048,55	\$ 3.104,73	\$ 3.157,29	\$ 3.205,32	\$ 3.247,79	\$ 3.283,45	\$ 3.310,91
\$ 3.120,19	\$ 3.187,14	\$ 3.252,08	\$ 3.314,36	\$ 3.373,20	\$ 3.427,72	\$ 3.476,85
	\$ 3.249,42	\$ 3.323,72	\$ 3.396,76	\$ 3.467,99	\$ 3.536,75	\$ 3.602,27
		\$ 3.377,86	\$ 3.459,04	\$ 3.539,63	\$ 3.619,16	\$ 3.697,06
			\$ 3.506,11	\$ 3.593,78	\$ 3.681,44	\$ 3.768,70
				\$ 3.634,70	\$ 3.728,51	\$ 3.822,84
					\$ 3.764,08	\$ 3.863,76
						\$ 3.894,69
\$ 450,77	\$ 463,50	\$ 469,72	\$ 490,47	\$ 494,66	\$ 511,37	\$ 523,40

Tabla A.9: Valor contingente garantías periodos 9 a 15

9	10	11	12	13	14	15
\$ 321,75	\$ 43,29	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 906,78	\$ 716,23	\$ 487,24	\$ 213,74	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 1.348,93	\$ 1.224,82	\$ 1.072,26	\$ 886,67	\$ 662,80	\$ 394,56	\$ 74,98
\$ 1.683,10	\$ 1.609,21	\$ 1.514,41	\$ 1.395,27	\$ 1.247,82	\$ 1.067,50	\$ 849,05
\$ 1.935,66	\$ 1.899,73	\$ 1.848,58	\$ 1.779,66	\$ 1.689,97	\$ 1.576,10	\$ 1.434,07
\$ 2.126,54	\$ 2.119,29	\$ 2.101,14	\$ 2.070,17	\$ 2.024,14	\$ 1.960,48	\$ 1.876,22
	\$ 2.285,24	\$ 2.292,03	\$ 2.289,74	\$ 2.276,70	\$ 2.251,00	\$ 2.210,39
		\$ 2.436,29	\$ 2.455,68	\$ 2.467,59	\$ 2.470,56	\$ 2.462,96
			\$ 2.581,10	\$ 2.611,85	\$ 2.636,51	\$ 2.653,84
				\$ 2.720,88	\$ 2.761,93	\$ 2.798,10
					\$ 2.856,72	\$ 2.907,14
						\$ 2.989,54
\$ 346,69	\$ 349,70	\$ 378,65	\$ 392,64	\$ 402,28	\$ 425,61	\$ 429,27

Tabla A.10: Valor contingente garantías periodos 1 a 8

1	2	3	4	5	6	7	8
\$ 275,83	\$ 104,57	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	\$ 523,89	\$ 383,53	\$ 261,38	\$ 18,74	\$ -	\$ -	\$ -
		\$ 748,08	\$ 769,98	\$ 603,77	\$ 404,13	\$ 165,77	\$ -
			\$ 1.154,36	\$ 1.045,92	\$ 912,72	\$ 750,80	\$ 555,57
				\$ 1.380,09	\$ 1.297,11	\$ 1.192,95	\$ 1.064,16
					\$ 1.587,62	\$ 1.527,12	\$ 1.448,55
						\$ 1.779,68	\$ 1.739,06
							\$ 1.958,63
\$ 114,60	\$ 138,67	\$ 163,89	\$ 240,38	\$ 242,49	\$ 286,40	\$ 303,19	\$ 318,56

Tabla A.11: Valor proyecto concesionario con opción de garantías periodos 16 a 22

16	17	18	19	20	21	22
\$ 17.101,98	\$ 19.747,70	\$ 22.791,00	\$ 26.291,62	\$ 30.318,30	\$ 34.950,09	\$ 40.277,91
\$ 12.802,31	\$ 14.801,90	\$ 17.101,98	\$ 19.747,70	\$ 22.791,00	\$ 26.291,62	\$ 30.318,30
\$ 9.552,69	\$ 11.063,95	\$ 12.802,31	\$ 14.801,90	\$ 17.101,98	\$ 19.747,70	\$ 22.791,00
\$ 7.096,69	\$ 8.238,87	\$ 9.552,69	\$ 11.063,95	\$ 12.802,31	\$ 14.801,90	\$ 17.101,98
\$ 5.240,48	\$ 6.103,72	\$ 7.096,69	\$ 8.238,87	\$ 9.552,69	\$ 11.063,95	\$ 12.802,31
\$ 3.837,58	\$ 4.490,01	\$ 5.240,48	\$ 6.103,72	\$ 7.096,69	\$ 8.238,87	\$ 9.552,69
\$ 2.777,30	\$ 3.270,39	\$ 3.837,58	\$ 4.490,01	\$ 5.240,48	\$ 6.103,72	\$ 7.096,69
\$ 2.562,35	\$ 2.621,20	\$ 2.777,30	\$ 3.270,39	\$ 3.837,58	\$ 4.490,01	\$ 5.240,48
\$ 2.629,65	\$ 2.698,61	\$ 2.765,87	\$ 2.830,83	\$ 2.892,75	\$ 3.270,39	\$ 3.837,58
\$ 2.680,50	\$ 2.757,11	\$ 2.833,17	\$ 2.908,23	\$ 2.981,79	\$ 3.053,22	\$ 3.121,82
\$ 2.718,94	\$ 2.801,32	\$ 2.884,03	\$ 2.966,74	\$ 3.049,08	\$ 3.130,63	\$ 3.210,85
\$ 2.747,99	\$ 2.834,74	\$ 2.922,47	\$ 3.010,95	\$ 3.099,94	\$ 3.189,13	\$ 3.278,15
\$ 2.769,95	\$ 2.860,00	\$ 2.951,52	\$ 3.044,37	\$ 3.138,38	\$ 3.233,35	\$ 3.329,01
\$ 2.786,55	\$ 2.879,09	\$ 2.973,47	\$ 3.069,62	\$ 3.167,43	\$ 3.266,76	\$ 3.367,45
\$ 2.799,09	\$ 2.893,51	\$ 2.990,07	\$ 3.088,71	\$ 3.189,39	\$ 3.292,02	\$ 3.396,50
\$ 2.808,57	\$ 2.904,42	\$ 3.002,61	\$ 3.103,14	\$ 3.205,98	\$ 3.311,11	\$ 3.418,46
\$ 2.815,73	\$ 2.912,66	\$ 3.012,09	\$ 3.114,04	\$ 3.218,53	\$ 3.325,53	\$ 3.435,05
	\$ 2.918,88	\$ 3.019,25	\$ 3.122,28	\$ 3.228,00	\$ 3.336,44	\$ 3.447,59
		\$ 3.024,67	\$ 3.128,51	\$ 3.235,17	\$ 3.344,68	\$ 3.457,07
			\$ 3.133,22	\$ 3.240,58	\$ 3.350,91	\$ 3.464,23
				\$ 3.244,68	\$ 3.355,61	\$ 3.469,65
					\$ 3.359,17	\$ 3.473,74
						\$ 3.476,83
\$ 2.000,03	\$ 2.021,15	\$ 2.035,49	\$ 2.064,10	\$ 2.075,90	\$ 2.099,97	\$ 2.119,10

Tabla A.12: Valor proyecto concesionario con opción de garantías periodos 9 a 15

9	10	11	12	13	14	15
\$ 6.103,68	\$ 7.096,69	\$ 8.238,87	\$ 9.552,69	\$ 11.063,95	\$ 12.802,31	\$ 14.801,90
\$ 4.489,97	\$ 5.240,48	\$ 6.103,72	\$ 7.096,69	\$ 8.238,87	\$ 9.552,69	\$ 11.063,95
\$ 3.270,35	\$ 3.837,58	\$ 4.490,01	\$ 5.240,48	\$ 6.103,72	\$ 7.096,69	\$ 8.238,87
\$ 2.348,58	\$ 2.777,30	\$ 3.270,39	\$ 3.837,58	\$ 4.490,01	\$ 5.240,48	\$ 6.103,72
\$ 1.973,68	\$ 2.019,24	\$ 2.348,62	\$ 2.777,30	\$ 3.270,39	\$ 3.837,58	\$ 4.490,01
\$ 2.032,18	\$ 2.086,53	\$ 2.139,20	\$ 2.189,69	\$ 2.348,62	\$ 2.777,30	\$ 3.270,39
\$ 2.076,40	\$ 2.137,39	\$ 2.197,70	\$ 2.256,98	\$ 2.314,76	\$ 2.370,51	\$ 2.423,61
\$ 2.109,82	\$ 2.175,83	\$ 2.241,92	\$ 2.307,84	\$ 2.373,26	\$ 2.437,81	\$ 2.501,01
\$ 2.135,07	\$ 2.204,88	\$ 2.275,34	\$ 2.346,28	\$ 2.417,48	\$ 2.488,67	\$ 2.559,52
\$ 2.154,16	\$ 2.226,84	\$ 2.300,59	\$ 2.375,33	\$ 2.450,90	\$ 2.527,10	\$ 2.603,73
	\$ 2.243,43	\$ 2.319,68	\$ 2.397,29	\$ 2.476,15	\$ 2.556,16	\$ 2.637,15
		\$ 2.334,11	\$ 2.413,88	\$ 2.495,24	\$ 2.578,11	\$ 2.662,40
			\$ 2.426,42	\$ 2.509,67	\$ 2.594,71	\$ 2.681,49
				\$ 2.520,57	\$ 2.607,25	\$ 2.695,92
					\$ 2.616,73	\$ 2.706,82
						\$ 2.715,06
\$ 1.828,79	\$ 1.842,38	\$ 1.881,54	\$ 1.905,42	\$ 1.924,63	\$ 1.957,22	\$ 1.969,85

Tabla A.13: Valor proyecto concesionario con opción de garantías periodos 1 a 8

1	2	3	4	5	6	7	8
-\$ 1.518,16	-\$ 1.259,17	-\$ 960,45	-\$ 250,89	-\$ 488,00	-\$ 799,08	-\$ 1.202,71	-\$ 1.721,74
-\$ 1.676,44	-\$ 1.653,95	-\$ 1.534,83	-\$ 1.052,24	-\$ 1.409,77	-\$ 1.859,36	-\$ 2.422,33	-\$ 3.124,64
	-\$ 1.612,01	-\$ 1.585,41	-\$ 1.396,50	-\$ 2.087,68	-\$ 2.660,71	-\$ 3.344,09	-\$ 4.184,92
		-\$ 1.548,95	-\$ 1.345,64	-\$ 2.029,18	-\$ 2.862,23	-\$ 3.874,98	-\$ 4.986,27
			-\$ 1.307,20	-\$ 1.984,96	-\$ 2.811,37	-\$ 3.816,48	-\$ 5.036,35
				-\$ 1.951,54	-\$ 2.772,93	-\$ 3.772,26	-\$ 4.985,49
					-\$ 2.743,88	-\$ 3.738,84	-\$ 4.947,05
						-\$ 3.713,59	-\$ 4.918,00
							-\$ 4.896,04
-\$ 1.539,06	-\$ 1.428,81	-\$ 1.320,11	-\$ 1.021,38	-\$ 1.556,01	-\$ 2.138,09	-\$ 2.851,25	-\$ 3.686,87