

MODELACIÓN HÍBRIDA PARA LA ELECCIÓN DE VEHÍCULOS CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS

José J. Soto, Víctor Cantillo y Julián Arellana

RESUMEN

La política de promover los vehículos alimentados con combustibles alternativos para reducir las emisiones es un tema actual no exento de debate. Se requiere evaluar la demanda y preferencias de las personas hacia vehículos con estas nuevas tecnologías para definir estrategias orientadas a promover su utilización. En el contexto de la decisión de compra de vehículo, se usaron modelos híbridos de elección discreta para incorporar explícitamente factores no observables o latentes que pueden influir en la elección del tipo de tecnología. Los datos provienen de encuestas de preferencias declaradas, aplicadas en dos ciudades colombianas. Las variables latentes fueron obtenidas a través de la evaluación de una serie de afirmaciones relacio-

nadas con la percepción del sistema de transporte, las preocupaciones ambientales, y la apreciación de las características de los vehículos por parte de los individuos encuestados. Los resultados sugieren que los modelos híbridos de elección discreta representan mejor el comportamiento de los consumidores al decidir la tecnología de combustible que usará el próximo vehículo que compraría. A partir de la modelación se infiere que la preocupación ambiental y la posición ante políticas de transporte son determinantes en la elección. También son relevantes las diferencias en el costo de adquisición y en el rendimiento de consumo de combustible de los vehículos alimentados con fuentes de energía alternativa respecto de los convencionales.

Introducción

La necesidad de transportarse ha desembocado en la invención, desarrollo y posterior comercialización de distintas tecnologías. Los combustibles fósiles que mayormente usan los vehículos generan externalidades negativas, entre la que se encuentra la contaminación atmosférica. El transporte es responsable del 26% de las emisiones globales de CO₂ (Chapman, 2007) y dado el crecimiento continuo de las tasas de motorización, las emisiones producto del transporte continúan creciendo.

Con el fin de lograr que el sector transporte sea sustentable, es común proponer estrategias para incrementar el uso de los modos de transporte

más eficientes en cuanto al uso de espacio y promover tecnologías basadas en combustibles alternativos como los biocombustibles o la energía eléctrica, que son menos contaminantes (Leo Vargas *et al.*, 2012). A su vez, los vehículos híbridos o los propulsados completamente por fuentes de energía alternativas pueden ofrecer una salida provisional para superar la alta dependencia hacia los combustibles fósiles por parte del sector transporte (Bolívar *et al.*, 2006).

La introducción de los combustibles alternativos para el uso en vehículos particulares y públicos, como forma de reducción de las emisiones, ha sido tema de discusión en diversos países.

Sin embargo, la introducción al mercado de los combustibles alternativos no sólo depende de la concientización y demostración de que este tipo de combustibles son más ‘amigables’ con el ambiente, sino también del interés de las industrias involucradas, en particular la industria vehicular y las compañías de combustible (Janssen, 2006).

Conocer las condiciones del mercado y las preferencias de las personas respecto a la compra de vehículos propulsados por energías alternativas resulta importante para establecer políticas y estrategias orientadas a lograr que estos vehículos tengan una aceptable penetración dentro del mercado (Train, 1980, 1986; Calfee, 1985; Brownstone

et al., 2000; Collantes, 2010). Los modelos de elección discreta que se estiman usando datos de preferencias declaradas, permiten estudiar la demanda de este tipo de vehículos sin importar que su actual cuota de mercado sea baja o inexistente.

Recientemente se ha avanzado en la estimación de la demanda por vehículos alternativos mediante la utilización de modelos híbridos. La ventaja de éstos sobre los modelos de elección discreta tradicionales consiste en la incorporación de variables latentes (percepciones y actitudes no observables directamente) que pueden ser importantes en el proceso de compra y uso de los vehículos propulsados por combustibles alternativos.

PALABRAS CLAVE / Energía Alternativa / Modelos de Elección Discreta / Problemas Ambientales / Variables Latentes /

Recibido: 18/12/2012. Modificado: 05/09/2014. Aceptado: 10/09/2014.

José Soto. Ingeniero Civil y Magíster en Ingeniería Civil, Universidad del Norte (Uninorte), Colombia. Profesor y Miembro del Grupo de Investigación Instituto de Estudios para el Desarrollo de la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB), Colombia. e-mail: jsoto@unitecnologica.edu.co

Víctor Cantillo. Ingeniero Civil, Uninorte, Colombia. Magíster en Tránsito y Transportes, Universidad del Cauca, Colombia. Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Profesor y Director del Grupo de Investigación TRANVÍA,

Uninorte, Colombia. e-mail: vcantill@uninorte.edu.co

Julián Arellana. Ingeniero Civil, Uninorte, Colombia. Magíster y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Profesor y Miembro del Grupo de Investigación TRANVÍA, Uninorte, Colombia. Dirección:

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Uninorte. Km.5 Vía Puerto Colombia. Barranquilla, Colombia. e-mail: jarellana@uninorte.edu.co

HYBRID CHOICE MODEL FOR ALTERNATIVE FUELLED VEHICLES

José J. Soto, Víctor Cantillo and Julián Arellana

SUMMARY

The promotion of alternative fuelled vehicles for the reduction of atmospheric emissions is a highly discussed topic nowadays. It requires evaluating the potential demand and people's preferences for vehicles using these new technologies, in order to define strategies to encourage their use. Hybrid choice models were used to explicitly incorporate non-observed and latent factors that could affect the next vehicle purchase. Models were estimated using stated preference data collected in two Colombian cities. The latent factors were obtained through the rating of several statements from survey respon-

dents regarding the perception of the transportation systems, the environmental concern and the importance of some vehicle features. Results suggest that the use of hybrid choice models helps to obtain an adequate representation of the consumer behavior when facing the next vehicle purchase. Environmental concern and the support for green transport policies are significant factors in the choice of alternative fuelled vehicles. Capital costs and operational costs differences among conventional fuelled vehicles and alternative fuelled vehicles are also relevant factors in the decision making process.

MODELAGEM HÍBRIDA PARA ESCOHA DE VEÍCULOS MOVIDOS A ENERGIAS ALTERNATIVAS

José J. Soto, Víctor Cantillo e Julián Arellana

RESUMO

A promoção de políticas orientadas ao uso de veículos alimentados com combustíveis alternativos para reduzir as emissões é um tema atual, não isento de debate. A definição de estratégias orientadas a promover sua utilização, requer a avaliação da demanda e das preferências dos indivíduos em relação aos veículos que usam essas novas tecnologias. No contexto da decisão de compra do veículo, foram utilizados modelos híbridos de escolha discreta. A modelagem utilizada permite incorporar explicitamente fatores não observáveis ou latentes que podem influenciar a escolha do tipo de tecnologia. Os dados foram obtidos em pesquisas de preferência declarada, aplicadas em duas cidades colombianas. As variáveis latentes foram obtidas através da avaliação de uma

série de afirmações relacionadas com a percepção do sistema de transporte, preocupações ambientais e valorização das características dos veículos pelos indivíduos respondentes. Os resultados indicam que os modelos híbridos de escolha discreta representam adequadamente o comportamento dos consumidores na decisão da tecnologia de combustível que será usada no próximo veículo a comprar. Os resultados da modelagem mostram que a preocupação ambiental e a posição em relação às políticas de transporte são elementos decisivos na escolha. As diferenças no custo de aquisição e no consumo de combustível entre veículos movidos com fontes de energia alternativa e veículos convencionais mostraram ser igualmente relevantes.

Ejemplos de modelación híbrida en el contexto de vehículos con energías alternativas son el modelo de clases latentes propuesto por Hidrue *et al* (2011) y el modelo de variables latentes de Bolduc *et al* (2008).

En esta investigación se propone un modelo híbrido para estudiar la demanda por vehículos propulsados con energías alternativas en el contexto colombiano. Además, el estudio de las preferencias por vehículos con energías alternativas se realiza mediante modelos híbridos de elección, que representan el estado del arte en modelación de elecciones discretas pues permiten incorporar indicadores de percepción frente a políticas de transporte, el medio ambiente y las características de los vehículos, los cuales

pueden ser importantes al momento de comprar un vehículo. La información proveniente de los modelos es útil para valorar políticas orientadas a favorecer e incrementar el uso de vehículos más amigables con el medio ambiente

Modelación de Elecciones

Los modelos de elección discreta tienen como objetivo principal estimar la demanda de los individuos ante diferentes alternativas mutuamente excluyentes. La teoría de la utilidad aleatoria es el soporte teórico utilizado para desarrollar los modelos de elección discreta que se evaluarán en este trabajo, estableciendo que los consumidores son racionales porque buscan maximizar su utilidad personal, dado que conocen ampliamente las

propiedades de las diferentes alternativas de elección (McFadden, 2001).

En los últimos años, los modelos de elección discreta han evolucionado hacia los modelos híbridos de elección, los cuales incorporan explícitamente factores psicológicos en la componente de elección discreta. Las variables latentes son los factores que influyen en el comportamiento y las percepciones de los individuos, pero tienen la característica que no son directamente cuantificables, dada su intangibilidad o su subjetividad. Para identificar las variables latentes es necesario la realización de encuestas que intenten captar las percepciones de los individuos mediante indicadores, los cuales luego van a servir para la estimación de parámetros. Estos indicadores pueden ser continuos, binarios

o variables categóricas expresadas en respuestas de encuestas de actitud y de percepciones (Walker, 2001; Bolduc, *et al.*, 2008).

Datos

Los datos utilizados provienen de una encuesta aplicada a personas poseedoras de vehículo, residentes en Barranquilla y Cartagena (Colombia). Se trató de una encuesta cara a cara realizada por encuestadores debidamente entrenados, que constó de las siguientes partes:

Parte 1: Información socioeconómica del encuestado: sexo, edad, número de personas en el hogar, número de vehículos en el hogar, número de motocicletas, ocupación, nivel de estudios y rama de estudios.

Parte 2: Características del vehículo actual: tipo de combustible, precio de adquisición, tipo de vehículo, modelo, tamaño del motor.

Parte 3: Encuesta de preferencias declaradas (PD): Nueve situaciones hipotéticas de elección.

Parte 4: Indicadores de percepción: importancia de determinados factores a la hora de la compra de un vehículo y el nivel de aceptación de políticas gubernamentales respecto a problemas de transporte y preocupaciones ambientales.

Parte 5: Información complementaria: ingreso promedio mensual del encuestado y estrato socioeconómico. Sobre el estrato socioeconómico se aclara que en Colombia existe una clasificación de los hogares para fines de tarificación de servicios públicos y pago de impuestos. La escala es de 1 a 6, siendo 1 el nivel más bajo de ingresos y 6 el más alto.

Las encuestas PD de la Parte 3 se aplicaban a la persona en base al tipo de vehículo que poseía la persona (vehículo actual). Se diseñaron tres juegos de encuestas PD diferentes: para compradores de automóvil gama baja, automóvil gama media y camioneta.

Cuatro alternativas tecnológicas fueron presentadas en cada situación de elección: 1) vehículo convencional a gasolina (G); 2) vehículo a gas natural (GNV); 3) vehículo eléctrico (EV), disponible sólo para automóviles; 4) vehículo híbrido-eléctrico (HEV); y 5) vehículo a diesel (D), disponible sólo para camionetas.

Las características o atributos de los vehículos considerados en el experimento fueron: a) Precio: valor de adquisición del vehículo en pesos colombianos (USD\$=1950\$COP). b) Autonomía: kilómetros recorridos por el vehículo con una recarga de combustible. c) Costo recarga: costo total de la recarga de combustible. d) Impuestos: valor en dinero correspondiente a los impuestos anuales del vehículo. e) Costo por km: costo por

cada km recorrido por el vehículo, que corresponde al resultado de la división entre la autonomía y el costo de la recarga.

Se recopilaron un total de 149 encuestas válidas y se excluyeron 29 individuos identificados como lexicográficos o no compensatorios. Dado que cada encuestado respondió una cantidad de nueve situaciones hipotéticas, se cuenta con 1080 observaciones utilizables para la estimación de modelos. El número de observaciones recopiladas resulta ser apropiado para obtener estimaciones confiables de los parámetros asociados a los atributos incluidos en el experimento (evaluadas a un 95% de confianza), dado que el diseño de la encuesta fue eficiente (Sándor y Wedel, 2001; Bliemer y Rose, 2009). Mayores detalles acerca del diseño de la encuesta pueden ser solicitados a los autores.

Para analizar la influencia de factores en el proceso de toma de decisiones, la encuesta incluyó un cuestionario de indicadores de percepción que los encuestados debían evaluar en una escala de 1 a 5. Inicialmente se le presentaron algunas afirmaciones relacionadas con políticas gubernamentales. Las afirmaciones se presentaron en grupos de dos, siendo estas opuestas entre sí. El objetivo era escoger el grado de aceptación de las políticas presentadas, teniendo en cuenta que entre más de acuerdo se estaba con una, más en desacuerdo se estaba con la otra.

Luego se realizaron preguntas acerca de la percepción de la importancia de: a) innovaciones tecnológicas; b) tecnologías verdes; c) uso de transporte público o bicicleta; d) preferencias por vehículos de bajo consumo. Posteriormente se preguntó acerca de la preocupación por problemas ambientales relacionados directa e indirectamente con el transporte (contaminación atmosférica, calentamiento global, contaminación auditiva y congestión). Por último, se realizaron preguntas acerca de la importancia de determinados factores o características de los vehículos a la hora de enfrentarse a la

decisión de comprarlo (precio, nivel de emisiones, tamaño, seguridad, marca, consumo, potencia, diseño y apariencia).

Especificación y Estimación de Modelos

Inicialmente se especificó un modelo de referencia tipo logit multinomial (MNL) estándar, usando como variables los atributos de las alternativas listadas en las encuestas de preferencias declaradas realizadas.

Luego se formuló un modelo híbrido en el cual las variables latentes incluidas se obtuvieron a partir de un análisis factorial de componentes principales considerando las respuestas a los indicadores dentro del cuestionario de percepción. Se definieron tres variables latentes: a) aceptación de políticas gubernamentales (PG), b) preocupación ambiental (PA) y c) importancia de las características del vehículo (CV).

La estructura del modelo de variables latentes está representada en la Figura 1. Las Tablas I, II, y III muestran las variables, coeficientes y atributos utilizados en el proceso de modelación del modelo híbrido.

Las ecuaciones estructurales relacionan los atributos socioeconómicos que explican las variables latentes. Las variables latentes, fueron especificadas como sigue:

$$PA = \gamma_{\text{sexo-PA}} \times \text{sexo} + \gamma_{\text{edad-PA}} \times \text{edad} + \gamma_{\text{vehipers-PA}} \times \text{vehipers} + \gamma_{D_3-PA} \times D_3 + \delta_{PA} \quad (1)$$

$$PG = \gamma_{\text{sexo-PG}} \times \text{sexo} + \gamma_{\text{edad-PG}} \times \text{edad} + \gamma_{\text{vehipers-PG}} \times \text{vehipers} + \gamma_{D_3-PG} \times D_3 + \delta_{PG} \quad (2)$$

$$CV = \gamma_{\text{sexo-CV}} \times \text{sexo} + \gamma_{\text{edad-CV}} \times \text{edad} + \gamma_{\text{vehipers-CV}} \times \text{vehipers} + \gamma_{D_3-CV} \times D_3 + \delta_{CV} \quad (3)$$

donde δ_i : términos de error asociados a la variable latente i

que se asume distribuyen normal con media cero y varianza uno para fines de normalización (Bolduc *et al.* 2008), $\gamma_{k,j}$: coeficientes a estimar asociados al atributo k (sexo, edad, vehipers, D_3) y la variable latente l (PA, PG, y CV). La descripción de las variables socioeconómicas utilizadas en las relaciones estructurales se describen en la Tabla I. Sexo es una variable muda o binaria que toma el valor de 1 si el encuestado es hombre, 0 en otro caso. Edad es una variable continua que indica la edad en años del encuestado. Vehipers es una variable continua que se obtiene al dividir el número de vehículos en una vivienda, entre el número de personas que allí habitan. D_3 es una variable muda que toma el valor de 1 si el encuestado tiene estudios universitarios, 0 en otro caso. Los coeficientes utilizados para definir las ecuaciones estructurales se presentan en la Tabla II.

La especificación de las ecuaciones de medición en el estudio está dada por las relaciones representadas en la Tabla III, donde se observa que los indicadores se dividen en cuatro grandes grupos: i) Políticas gubernamentales, ii) Preferencias tecnológicas y de movilidad, iii) Preocupación ambiental, y iv) Importancia de las características del vehículo. Cada '1' en la Tabla II, o flecha en la Figura 1 indica la relación entre la variable latente y el indicador.

Las ecuaciones de medición del modelo se definieron usando una estructura de logit ordinal (Daly *et al.*, 2012), que estima la probabilidad de que la variable latente l , continua por definición, se encuentre dentro de unos umbrales arbitrarios $\tau_{l,ij}$ y $\tau_{l,i(j-1)}$, a estimar, que representen la respuesta j observada para el indicador i . Lo anterior puede expresarse como la Ec. 4, teniendo en cuenta que y_{iq} se refiere a la respuesta j observada para el indicador i vinculado al individuo q .

$$\Pr \{y_{iq} = j | I_q^*\} = \frac{1}{1 + e^{\tau_{l,ij} - I_q^*}} - \frac{1}{1 + e^{\tau_{l,i(j-1)} - I_q^*}} \quad (4)$$

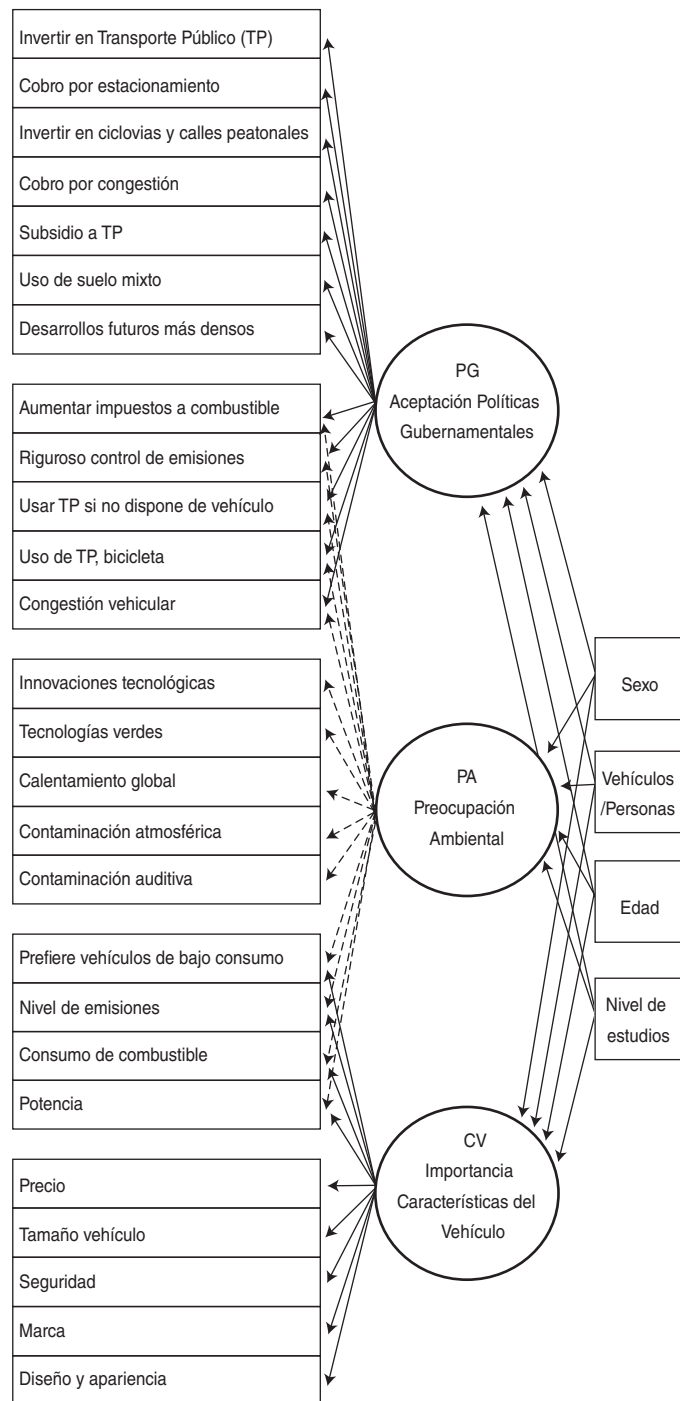


Figura 1. Representación del modelo variables latentes.

TABLA I
VARIABLES SOCIOECONÓMICAS DENTRO DEL MODELO

Variable		Descripción
Nombre	Tipo	
Sexo	Binaria	Género del encuestado. (1 = Hombre, 0 = Mujer)
Edad	Continua	Edad del encuestado
Vehipers	Binaria	Número de vehículos por persona en la vivienda
D3	Binaria	Nivel de estudios (1 = Universitario, 0 = No Universitario)

TABLA II
COEFICIENTES USADOS EN ECUACIONES ESTRUCTURALES

Coefficiente	Descripción
$\gamma_{\text{sexo-PG}}$	Coefficiente variable socioeconómica sexo en variable latente PG
$\gamma_{\text{sexo-PA}}$	Coefficiente variable socioeconómica sexo en variable latente PA
$\gamma_{\text{sexo-CV}}$	Coefficiente variable socioeconómica sexo en variable latente CV
$\gamma_{\text{edad-PG}}$	Coefficiente variable socioeconómica edad en variable latente PG
$\gamma_{\text{edad-PA}}$	Coefficiente variable socioeconómica edad en variable latente PA
$\gamma_{\text{edad-CV}}$	Coefficiente variable socioeconómica edad en variable latente CV
$\gamma_{\text{vehipers-PG}}$	Coefficiente variable socioeconómica vehipers en variable latente PG
$\gamma_{\text{vehipers-PA}}$	Coefficiente variable socioeconómica vehipers en variable latente PA
$\gamma_{\text{vehipers-CV}}$	Coefficiente variable socioeconómica vehipers en variable latente CV
γ_{D3-PG}	Coefficiente variable socioeconómica D3 en variable latente PG
γ_{D3-PA}	Coefficiente variable socioeconómica D3 en variable latente PA
γ_{D3-CV}	Coefficiente variable socioeconómica D3 en variable latente CV

TABLA III
RELACIONES ENTRE INDICADORES Y VARIABLES LATENTES

Indicadores	Variable latente		
	PG	PA	CV
Políticas gubernamentales			
1. Invertir en TP	1	-	-
2. Cobro por estacionamiento	1	-	-
3. Invertir en ciclovías y calles peatonales	1	-	-
4. Aumentar impuestos a combustible	1	1	-
5. Cobro por congestión	1	-	-
6. Subsidio a TP	1	-	-
7. Riguroso control de emisiones	1	1	-
8. Políticas uso de suelo mixto	1	-	-
9. Desarrollo futuro denso	1	-	-
10. Uso de TP en caso de no disponer de vehículo	1	1	-
Preferencias tecnológicas y de movilidad			
11. Innovaciones tecnológicas	-	1	-
12. Tecnologías verdes	-	1	-
13. Uso transporte público, bicicleta	1	1	-
14. Preferencia por vehículos de bajo consumo	-	1	1
Preocupación ambiental			
15. Calentamiento global	-	1	-
16. Contaminación atmosférica	-	1	-
17. Contaminación auditiva	-	1	-
18. Congestión vehicular	1	1	-
Importancia características vehículo			
19. Precio	-	-	1
20. Nivel de emisiones	-	1	1
21. Tamaño vehículo	-	-	1
22. Seguridad	-	-	1
23. Marca	-	-	1
24. Consumo combustible	-	1	1
25. Potencia	-	1	1
26. Diseño y apariencia	-	-	1

donde l^*_q : vector de los valores de las variables latentes l , $\tau_{1,ij}$ y $\tau_{1,i(j-1)}$: umbrales de valores entre los que la variable latente l entrega una respuesta j asociada al indicador i dentro de la encuesta de actitudes y percepciones presentada al encuestado q . Como resultado de un análisis de datos realizado y considerando la cantidad de respuestas en cada categoría de

respuesta, finalmente se decidió mantener sólo tres categorías de respuestas, así: nivel bajo (calificación 1 y 2), nivel medio (calificación 3) y nivel alto (calificación 4 y 5).

Por lo tanto, basta con estimar sólo dos umbrales para definir las condiciones de truncamiento de todos los posibles valores que puede tomar la variable latente continua:

$$y_{liq} = \begin{cases} 1,2 & \text{si } -\infty < I_q^* \leq \tau_{l,i1} \\ 3 & \text{si } \tau_{l,i1} < I_q^* \leq \tau_{l,i2} \\ 4,5 & \text{si } \tau_{l,i2} < I_q^* \leq \infty \end{cases}$$

La función de verosimilitud de observar la respuesta j al indicador i asociado a la variable latente l para todos los individuos q en este modelo puede expresarse como

$$L_{VL} = \prod_q \prod_l \prod_i \left(\sum_j \left(\frac{1}{1 + e^{\tau_{l,i,j} - I_q^*}} - \frac{1}{1 + e^{\tau_{l,i,j+1} - I_q^*}} \right) x_{D_{ij}} x_{S_{li}} \right) \quad (5)$$

donde por construcción, $\tau_{l,i,j} > \tau_{l,i,(j-1)}$; D_{ij} : variable muda que toma el valor de 1 si $y_{liq} = j$, 0 en otro caso; S_{li} : variable muda que toma el valor de 1 si la variable latente l explica el indicador i , 0 en otro caso. La Tabla IV presenta la descripción de los coeficientes utilizados en el modelo

de medición de la componente de variables latentes.

El modelo de elección discreta sigue la regla de la maximización de la utilidad aleatoria bajo la estructura de un logit multinomial (MNL). Dado que en la encuesta se tenían tres juegos de PD, cada uno con cuatro alternativas tecnológicas de vehículos, se consideraron 12 funciones de utilidad. Cabe destacar que cada encuestado enfrentaba un único juego PD, es decir, sólo tenía disponible cuatro alternativas en cada situación de elección. Genéricamente, las funciones de utilidad se definieron como:

$$U_{art} = ASC_{ar} + \beta X_{art} + \alpha_a I_a^* + \epsilon_{art} \quad (6)$$

donde a : alternativa tecnológica (1: G, 2: GNV, 3: EV, 4: HEV, 5: D); r : tipo de juego PD realizado (1: auto gama baja, 2:

auto gama media y 3: camioneta); t : situación de elección presentada. Por su parte, X_{art} es el vector de los atributos observados para la alternativa tecnológica a , en el juego PD tipo r , para la situación de elección t , mientras que I_a^* se define como el vector de variables latentes (1: PA, 2: PG, 3: CV) asociado a cada alternativa a . ASC_{ar} se define como la constante específica de la alternativa tecnológica a en el juego de PD tipo r y α_a es el vector de coeficientes asociados a las variables latentes I para la alternativa tecnológica a .

El término de error ϵ_{art} del modelo de elección discreta sigue la distribución Gumbel independiente e idéntica entre alternativas a , tipo de juego r , y situación de elección t . Por su parte, β representa un vector de parámetros genéricos para todas las alternativas a . Para que el modelo sea identificable, fue

necesario fijar en 0 la constante específica de la alternativa gasolina para todos los tipos de juego r , así como los coeficientes de las variables latentes I para la alternativa gasolina. La Tabla V presenta la descripción de los coeficientes usados dentro del modelo de elección discreta.

La verosimilitud total del modelo híbrido fue calculada como el producto de las verosimilitudes del modelo de elección discreta y del modelo de variables latentes:

$$L = \left[\prod_q \prod_{l'} \prod_t \prod_a \frac{e^{U_{art}}}{\sum_{a|A} e^{U_{art}}} dF(\delta_l) \right] x L_{VL} \quad (7)$$

La función de verosimilitud planteada en la Ec. 7 contempla la integración sobre todo el rango de variación de la variable latente considerada (I^*). Si se contemplan l variables latentes, esta integral además tiene l dimensiones. Resolver numéricamente la integral planteada en Ec. 7 puede resultar complejo y requerir altos tiempos de solución, por lo que es común realizar la maximización de la función de verosimilitud usando simulación, mediante la técnica conocida como máxima verosimilitud simulada (Train, 2009), que calcula la probabilidad de elección de la función como un promedio ponderado de las probabilidades de elección evaluadas a determinados valores de la variable latente extraídos aleatoriamente dentro de su rango de variación. La generación de números aleatorios para extraer los valores de las variables latentes se realizó según la metodología MLHS (Hess *et al.*, 2006). Train (2009) establece que a medida que aumenten los valores extraídos aleatoriamente, las estimaciones obtenidas por la técnica de máxima verosimilitud simulada convergen a los estimadores máximo-verosímiles.

En este trabajo, la función de verosimilitud planteada en la Ec. 7 se maximizó de forma simultánea usando la técnica de máxima verosimilitud simulada codificada especialmente en Ox (Doornik, 2007). Se decidió maximizar la función

TABLA IV
COEFICIENTES ECUACIONES DE MEDICIÓN

Coeficiente	Descripción
Ecuaciones de medición logit ordinal	
$\tau_{PG,i1}$	Umbral estimado para la variable PG, que estima el nivel bajo (1) del indicador i
$\tau_{PG,i2}$	Umbral estimado para la variable PG, que estima el nivel medio (2) del indicador i
$\tau_{PA,i1}$	Umbral estimado para la variable PA, que estima el nivel bajo (1) del indicador i
$\tau_{PA,i2}$	Umbral estimado para la variable PA, que estima el nivel medio (2) del indicador i
$\tau_{CV,i1}$	Umbral estimado para la variable CV, que estima el nivel bajo (1) del indicador i
$\tau_{CV,i2}$	Umbral estimado para la variable CV, que estima el nivel medio (2) del indicador i

TABLA V
COEFICIENTES DENTRO DEL MODELO DE ELECCIÓN

Coeficiente	Descripción
ASC_{GNV1}	Constante específica para automóvil Gama Baja a Gas Natural
ASC_{EV1}	Constante específica para automóvil eléctrico Gama Baja
ASC_{HEV1}	Constante específica para automóvil Híbrido-eléctrico Gama Baja
ASC_{GNV2}	Constante específica para automóvil Gama Media a Gas Natural
ASC_{EV2}	Constante específica para automóvil eléctrico Gama Media
ASC_{HEV2}	Constante específica para automóvil Híbrido-eléctrico Gama Media
ASC_{GNV3}	Constante específica para Camioneta a Gas Natural
ASC_D	Constante específica para Camioneta Diesel
ASC_{HEV3}	Constante específica para camioneta Híbrido-eléctrica
β_{PRECIO}	Coefficiente asociado al atributo precio de adquisición del vehículo
$\beta_{AUTONOMIA}$	Coefficiente asociado al atributo autonomía del vehículo
$\beta_{IMPUESTOS}$	Coefficiente asociado al atributo impuestos anuales del vehículo
$\beta_{COSTOKM}$	Coefficiente asociado al atributo Costo por km del vehículo
$\alpha_{PA,GNV}$	Coefficiente de la variable latente Preocupación Ambiental en vehículos a gas natural
$\alpha_{PG,GNV}$	Coefficiente de la VL Aceptación políticas gubernamentales Ambientales en vehículos a gas natural
$\alpha_{PV,GNV}$	Coefficiente de la VL importancia de las características del vehículo en vehículos a gas natural
$\alpha_{PA,FV}$	Coefficiente de la variable latente Preocupación Ambiental en vehículos eléctricos
$\alpha_{PG,FV}$	Coefficiente de la VL Aceptación políticas gubernamentales Ambientales en vehículos eléctricos
$\alpha_{CV,FV}$	Coefficiente de la VL importancia de las características del vehículo en vehículos eléctricos
$\alpha_{PA,HEV}$	Coefficiente de la variable latente Preocupación Ambiental en vehículos híbridos
$\alpha_{PG,HEV}$	Coefficiente de la VL Aceptación políticas gubernamentales Ambientales en vehículos híbridos
$\alpha_{CV,HEV}$	Coefficiente de la VL importancia de las características del vehículo en vehículos híbridos
$\alpha_{PA,D}$	Coefficiente de la variable latente Preocupación Ambiental en camionetas diesel
$\alpha_{PG,D}$	Coefficiente de la VL Aceptación políticas gubernamentales Ambientales en camionetas diesel
$\alpha_{CV,D}$	Coefficiente de la VL importancia de las características del vehículo en camionetas diesel

de máxima verosimilitud del modelo híbrido de forma simultánea dado que los resultados de estimación al usar esta técnica resultan ser más eficientes e insesgados en comparación a los obtenidos mediante estimación secuencial (Raveau *et al.*, 2010).

Resultados

En la Tabla VI se presentan los parámetros estimados de los modelos MNL e híbrido. Analizando los resultados de la componente de elección discreta de los modelos se pueden obtener varias conclusiones interesantes. La inclusión de variables latentes en el modelo de elección discreta es muy positiva en cuanto al ajuste del modelo, lo cual se puede ver en el gran incremento de la función de log-verosimilitud del modelo híbrido, junto con la alta significancia de las variables latentes en las ecuaciones de utilidad.

Al aplicar el test de razonabilidad (congruencia de signos) es posible ver que los signos tanto del modelo híbrido como del MNL se mantienen iguales y son correctos, dado que las variables que expresan costos para el usuario, como el precio del vehículo, los impuestos anuales y el costo por km tienen signo negativo como era de esperarse. El coeficiente asociado a la variable autonomía del vehículo tiene signo positivo, dado que una mayor autonomía del vehículo es deseable; sin embargo, esta fue la única variable que no resultó estadísticamente diferente de cero, lo cual se puede atribuir al poco conocimiento de su significado real por parte de los usuarios, además de la posibilidad de que esté relacionada con el costo por km y exista una confusión de efectos.

En el modelo híbrido los signos de los coeficientes en la componente de elección discreta también son razonables. Como era de esperarse, el signo del coeficiente de 'preocupación ambiental' es positivo, dado que los usuarios que se decantan por las energías alternativas tienen una mayor conciencia ambiental. El signo de la variable 'aceptación de políticas gubernamentales' también es positivo, la cual

TABLA VI
RESULTADOS MODELO DE ELECCIÓN DISCRETA

	Coeficiente	MNL		Modelo Híbrido	
		Coeficiente	Test t robusto	Coeficiente	Test t robusto
Constante Específica (ASC)	GNV1	0,1880	0,488	0,0898	0,113
	EV1	-0,6163	-1,033	-0,7222	-0,601
	HEV1	-0,7624	-1,537	-1,5869	-1,411
	GNV2	-0,2999	-0,657	-0,4692	-0,538
	EV2	-0,8943	-1,257	-1,1039	-0,790
	HEV2	-0,3641	-0,778	-0,4465	-0,376
	GNV3	-0,1212	-0,221	-0,0834	-0,088
	D	0,0564	0,145	1,6153	1,704
	HEV3	-0,4230	-0,837	0,6747	0,547
Atributos (β)	Precio	-0,0661	-3,061	-0,0931	-3,004
	Autonomía	0,0002	0,168	0,0004	0,229
	Impuestos	-0,0008	-4,064	-0,0011	-4,008
	Costo km	-0,0072	-2,896	-0,0096	-2,816
Variables Latentes (α)	PA,GNV	-	-	1,5965	6,989
	PG,GNV	-	-	0,8928	3,672
	CV,GNV	-	-	-0,1634	-0,665
	PA,EV	-	-	1,6452	3,353
	PG,EV	-	-	2,0002	3,941
	CV,EV	-	-	-1,0661	-1,813
	PA,HEV	-	-	-0,1509	-0,541
	PG,HEV	-	-	2,8073	8,178
	CV,HEV	-	-	-0,3481	-0,920
	PA,D	-	-	0,2510	0,761
PG,D	-	-	1,7146	3,346	
CV,D	-	-	-1,0993	-2,945	
Parámetros elección discreta		13		25	
Observaciones		1080		1080	
Individuos		124		124	
LL Elección discreta:		-1455,320		-1214,790	
LL Modelo conjunto		-		-4595,63	

TABLA VII
RESULTADOS ECUACIONES DE MEDICIÓN

Coeficiente (Variable latente_indicador)	τ_1		τ_2	
	Coeficiente	Test t robusto	Coeficiente	Test t robusto
PG_11	0,1175	0,34174	0,42439	1,1417
PG_12	0,51332	1,3363	0,95979	2,4023
PG_13	-0,1723	-0,47047	0,5076	1,3171
PG_14	0,30376	0,80621	1,0667	2,6681
PG_15	-0,40526	-1,0983	-0,035878	-0,093121
PG_16	-0,60426	-1,6431	-0,0045801	-0,011916
PG_17	-1,922	-4,7555	-1,464	-3,6841
PG_18	0,53909	1,4004	1,2177	3,0571
PG_19	-1,0924	-2,9801	-0,096818	-0,25162
PG_110	-0,30902	-0,82512	0,41668	1,0743
PG_113	-2,2282	-4,5906	-0,74973	-1,7975
PG_118	-2,7438	-5,4205	-1,4838	-3,6778
PA_14	0,75376	2,2075	1,5145	4,4929
PA_17	-1,5023	-4,1185	-1,0572	-3,1627
PA_110	0,12737	0,39753	0,85471	2,6536
PA_111	-1,8711	-4,5377	-0,93644	-2,704
PA_112	-2,2683	-5,0112	-0,76126	-2,0518
PA_113	-1,8336	-4,4243	-0,2803	-0,84327
PA_114	-1,8162	-4,7457	-0,61593	-1,733
PA_115	-2,6324	-5,0789	-1,9591	-4,5173
PA_116	-3,7267	-5,9693	-2,0607	-4,8371
PA_117	-2,0184	-4,7619	-0,29571	-0,8558
PA_118	-2,3554	-5,2932	-1,0272	-2,9067
PA_120	-0,53413	-1,5991	0,28836	0,86382
PA_124	-3,3982	-5,9403	-1,8049	-4,7856
PA_125	-1,5986	-4,3945	0,12424	0,34792
CV_114	-1,6776	-3,1341	-0,49257	-1,0004
CV_119	-3,2441	-4,736	-1,9427	-3,6763
CV_120	-0,45491	-0,96634	0,37464	0,7943
CV_121	-2,3733	-4,5984	-0,85038	-1,7327
CV_122	-2,8225	-4,6453	-1,2004	-2,4693
CV_123	-1,7647	-3,524	-0,45901	-1,0072
CV_124	-3,2555	-4,4951	-1,6969	-3,1687
CV_125	-1,4765	-3,0048	0,22338	0,47915
CV_126	-2,508	-4,5223	-0,99908	-2,1018

se explica debido a que los usuarios más propensos a aceptar políticas gubernamentales relacionadas con el mejoramiento del transporte prefieren los vehículos propulsados por energías alternativas.

Para la variable latente 'importancia de las características del vehículo' se obtuvo un signo negativo, lo que resulta explicable debido al poco conocimiento de las tecnologías, o por la existencia de ciertos prejuicios desfavorables con las nuevas tecnologías. Estos resultados parecen indicar que las personas más proclives a la utilización de vehículos con combustible tradicional prestan mayor atención al rendimiento, las características físicas y apariencia del vehículo.

En general las variables latentes son significativas dentro del modelo de elección discreta. La preocupación ambiental es significativa en todos los modos a excepción del correspondiente a los vehículos diesel e híbrido, posiblemente por la poca diferenciación entre combustibles o por el desconocimiento de las tecnologías. Los coeficientes de la variable latente 'aceptación de políticas gubernamentales' fueron todos significativos. En cuanto a la variable latente 'importancia de las características del vehículo' sólo resultó ser significativa para el caso del vehículo a diesel.

Las Tablas VII y VIII contienen las estimaciones de los parámetros dentro de las ecuaciones estructurales y de medición, respectivamente. Al analizar los datos de las ecuaciones de medición (Tabla VII) puede apreciarse que varios

umbrales resultaron significativos, pero otros no lo fueron, lo cual puede traducirse en que la variable latente no explica bien el indicador, o que hubiera sido necesario sólo un umbral. Sin embargo, este es un problema que se estudiará en etapas posteriores de la investigación.

Finalmente, debe notarse que los coeficientes de las ecuaciones estructurales del modelo (Tabla VIII) no resultaron significativas en su mayoría, confirmando la afirmación de que es muy difícil encontrar unas variables socioeconómicas que expliquen bien las variables latentes en los modelos híbridos (Walker, 2001). A pesar de la gran cantidad de variables recogidas, no fue fácil encontrar aquellas que mejor explicaran percepciones y valores subyacentes. Es importante aclarar que en general las personas encuestadas eran de estrato medio y alto, dado que en Colombia en general el vehículo no es asequible a las personas de bajo ingreso; ello influyó en la relativa poca variabilidad del atributo ingreso.

Conclusiones

En la presente investigación se presentó la estimación de un modelo híbrido sobre la escogencia de vehículos propulsados por energías alternativas. Los resultados muestran que la capacidad de estimación del modelo de elección discreta mejora significativamente al incluir variables latentes.

Los modelos estimados son robustos y demuestran que la preocupación ambiental y la posición ante políticas gubernamentales relacionadas con el

medio ambiente y la movilidad influyen significativamente en la compra de vehículos con tecnología limpia. Entretanto, las personas que prestan más atención a las características físicas del vehículo, su apariencia y rendimiento, son más proclives a seguir utilizando vehículos con combustible tradicional. Sin embargo, es necesario un mayor estudio de las variables socioeconómicas que explican las variables latentes, lo cual ha sido un problema recurrente en la literatura.

Pudo notarse que el precio es un factor relevante en la decisión respecto de que vehículo comprar, al igual que los costos operacionales. Por esta razón la factibilidad de popularizar vehículos de baja emisión depende en alto grado de políticas que lo incentiven; en particular, de exenciones arancelarias o subsidios. La política de imponer impuestos ambientales a los combustibles tradicionales, gasolina y diesel, hace también más atractiva la utilización de vehículos con tecnologías menos contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento del Atlántico y el Sistema General de Regalías por el financiamiento parcial a través del Proyecto LOGPORT, BPIN 20120001001911050672, y a la Universidad del Norte, Colombia, por el financiamiento a través de la IX Convocatoria interna para proyectos de investigación y desarrollo en el marco de la estrategia de fortalecimiento de grupos y centros de investigación Uninorte.

REFERENCIAS

Bliemer MCJ, Rose JM (2009) *Efficiency and Sample Size Requirements for Stated Choice Experiments*. Paper #09-2421. Transportation Research Board 88th Annual Meeting, Washington DC, EEUU. 27 pp.

Bolduc D, Boucher N, Alvarez-Daziano R (2008) Hybrid choice modeling of new technologies for car choice in Canada. *Transp. Res. Rec.* 2082: 63-71.

Bolívar R, Mostany J, García MC (2006) Petróleo versus energías alternativas. Dilema futuro. *Interciencia* 31: 10-12.

Brownstone D, Bunch DS, Train K (2000) Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles. *Transp. Res. B* 34: 315-338.

Calfee J (1985) Estimating the demand for electric automobiles using fully disaggregated probabilistic choice analysis. *Transp. Res. B* 19: 287-301.

Chapman L (2007) Transport and climate change: a review. *J. Transp. Geogr.* 15: 354-367.

Collantes G (2010) Do green tech policies need to pass the consumer test? The case of ethanol fuel. *Energy Econ.* 32: 1235-1244.

Daly A, Hess S, Patrulli B, Potoglou D, Rohr C (2012) Using ordered attitudinal indicators in a latent variable choice model: a study of the impact of security on travel behaviour. *Transportation* 39: 267-297.

Doornik JA (2007) *Object-Oriented Matrix Programming Using Ox*. 3^a ed. Timberlake Consultants Press. Londres, RU.

Hess S, Train K, Polak J (2006) On the use of a modified latin hypercube sampling (MLHS) method in the estimation of a mixed logit model for vehicle choice. *Transp. Res. B* 40: 147-163.

Hidrué MK, Parsons GR, Kempton W, Gardner MP (2011) Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource Energy Econ.* 33: 686-705.

Leo Vargas A, Adame Martínez S, Jiménez Jiménez J (2012). Movilidad, sustentabilidad y combustibles de los sistemas de transporte rápido de autobús articulado en México. *Interciencia* 37: 154-160.

Janssen A, Lienin SF, Gassmann F, Wokaun A (2006) Model aided policy development for the market penetration of natural gas vehicles in Switzerland. *Transp. Res. A* 40: 316-333.

McFadden D (2001) Economic choices. *Am. Econ. Rev.* 91: 351-378.

Raveau S, Alvarez-Daziano R, Yáñez MF, Bolduc D, Ortúzar JD (2010) Sequential and Simultaneous estimation of hybrid discrete choice models: some new findings. *Transp. Res. Rec.* 2156: 131-139.

Sándor Z, Wedel M (2001) Designing conjoint experiments using manager's prior beliefs. *J. Market. Res.* 38: 430-444.

Train K (1980) The potential demand for electric vehicles. *Transp. Res. A* 14: 405-414.

Train K (1986) *Qualitative Choice Analysis: Econometrics and Application to Automobile Demand*. MIT Press. Cambridge, MA, EEUU. 252 pp.

Train K (2009) *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2^a ed. Cambridge University Press. Nueva York, EEUU. 408 pp.

Walker J (2001) *Extended Discrete Choice Models: Integrated Error Structures, and Latent Variables*. Tesis. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, EEUU. 208 pp.

TABLA VIII
RESULTADOS ECUACIONES ESTRUCTURALES

Coeficiente γ (Variable SE-VL)	Modelo Híbrido	
	Coeficiente	Test t robusto
Sexo-PG	-0,15915	-1,1005
Sexo-PA	0,024747	0,13922
Sexo-CV	-0,069878	-0,36384
Edad-PG	-0,064958	-0,38772
Edad-PA	0,021787	0,1342
Edad-CV	0,27931	1,432
Vehipers-PG	0,0073899	0,026411
Vehipers-PA	-0,12611	-0,42727
Vehipers-CV	0,52712	1,3026
D ₃ -PG	0,047638	0,15045
D ₃ -PA	0,47166	2,13
D ₃ -CV	0,15116	0,39373