



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN MATEMÁTICAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

El programa de Hilbert. Teoremas de Incompletitud de Gödel

Presentado por:

David García Curbelo

Tutor:

Miguel Delgado Calvo-Flores

Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial

Curso académico 2021-2022

El programa de Hilbert. Teoremas de Incompletitud de Gödel

David García Curbelo

David García Curbelo *El programa de Hilbert. Teoremas de Incompletitud de Gödel.*
Trabajo de fin de Grado. Curso académico 2021-2022.

**Responsable de
tutorización**

Miguel Delgado Calvo-Flores
*Ciencias de la Computación e Inteligencia
Artificial*

Grado en Matemáticas
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

D./Dña. David García Curbelo

Declaro explícitamente que el trabajo presentado como Trabajo de Fin de Grado (TFG), correspondiente al curso académico 2021-2022, es original, entendida esta, en el sentido de que no ha utilizado para la elaboración del trabajo fuentes sin citarlas debidamente.

En Granada a 8 de mayo de 2022

Fdo: David García Curbelo

*A mi buen amigo Diego,
por haberme hecho ver que las matemáticas no son sólo cosa de locos.*

Índice general

Summary	XI
Introducción	XIII
I. El programa de Hilbert	1
1. Una cortina hacia el futuro	3
1.1. Los objetivos	3
1.2. La lista	3
1.2.1. Los 23 problemas	4
1.3. El escenario previo	5
2. Una mancha en la cortina	7
2.1. Los defectos del programa	7
2.2. La axiomatización	7
2.3. La llegada de Gödel a escena	7
2.4. Bibliografía	8
II. Los teoremas de incompletitud de Gödel	9
3. La completitud del cálculo lógico de primer orden	11
3.1. Definiciones y lemas previos	11
3.2. Exposición y demostraciones	12
3.3. Corolarios	16
4. Sobre sentencias formalmente indecidibles	17
4.1. Definiciones y conceptos previos	17
A. Primer apéndice	23
Glosario	25
Bibliografía	27

Summary

An english summary of the project (around 800 and 1500 words are recommended).

File: preliminares/summary.tex

Introducción

De acuerdo con la comisión de grado, el TFG debe incluir una introducción en la que se describan claramente los objetivos previstos inicialmente en la propuesta de TFG, indicando si han sido o no alcanzados, los antecedentes importantes para el desarrollo, los resultados obtenidos, en su caso y las principales fuentes consultadas.

Ver archivo preliminares/introduccion.tex

Parte I.

El programa de Hilbert

1. Una cortina hacia el futuro

¿Quién de nosotros no se alegraría de levantar el velo tras el que se oculta el futuro; de echar una mirada a los próximos avances de nuestra ciencia y a los secretos de su desarrollo durante los siglos futuros?

(David Hilbert)

Con estas ambiciosas palabras comenzaba David Hilbert su conferencia desde el estrado de la universidad de La Sorbona, París, dando así comienzo al Congreso Internacional de Matemáticos de 1900. Dicha conferencia se distinguiría notablemente del resto de Congresos en los que ya había participado, debido a su gran influencia en la matemática de la época y a la ambición de la misma, que ha conseguido dejarnos retales hasta la actualidad.

1.1. Los objetivos

Hilbert tuvo como principal reto en su discurso el crear un punto de inflexión en la matemática de la época, tratando de trazar una dirección y un sentido hacia el avance y el futuro de la matemática. Dicho objetivo lo abordó mediante la propuesta de una lista de 23 problemas, ya que el propio Hilbert afirmaba que las matemáticas avanzaban proponiendo problemas, y que éstos en sí mismos son un signo de que la disciplina sigue viva.

Dicho programa ha tenido tal sonoridad y repercusión debido tanto a la diversidad de campos que abarca, como a la propia influencia del conferenciante en la matemática del siglo XX. Tal ha sido dicha importancia, que varios de estos problemas están aún sin resolver, en vistas de ideas y planteamientos matemáticos que aún no han sido organizados de manera correcta, o inclusive de nuevos campos y descubrimientos ocultos tras el velo de la ignorancia.

1.2. La lista

La recopilación de dichos 23 problemas abarca no sólo el campo que nos concierne, sino también otros tangenciales que eran de especial interés para Hilbert, como lo era la física. En este campo presentó especial interés gracias en gran medida a su buen amigo Hermann Minkowski, y gracias a él estuvo activo incluso muchos años después de la muerte de su compañero, participando en los principales avances de la física del momento.

Dentro de los problemas de las matemáticas que presenta, podemos ver varios campos de especial interés en la matemática de la época, tocando geometrías no euclídeas (todo un campo revolucionario de la época), un comienzo de atisbo en el análisis funcional (fundado en gran parte por el propio David Hilbert), o incluso problemas que afrontan la crisis fundacional de la matemática, un lastre del que la matemática parecía no poder librarse, pero en el que Hilbert tenía mucha fe y seguridad.

Como comentábamos anteriormente, Hilbert era uno de los grandes matemáticos de la época, y debido a esto, en sus estudios trabajaba con la matemática latente de la época. Por

1. Una cortina hacia el futuro

ello, en la lista de problemas podemos observar que gran número de ellos (alrededor de tres cuartas partes del programa) están constituidos por problemas de campos que el propio Hilbert trataba, y que por tanto, debían ser temas procedentes del motor de avance y del posible futuro que pudiera tomar la matemática debido al programa.

1.2.1. Los 23 problemas

En la siguiente **Tabla 1.1** se presenta una lista de los 23 problemas anunciados por Hilbert en el Congreso Internacional de Matemáticos en París, aunque dicha lista no fuera publicada hasta un tiempo después. Como se puede ver, muchos de ellos carecen de una explicación clara y concisa del objetivo del problema, y por éste motivo se ha considerado que muchos de ellos eran para Hilbert una dirección que tomar en el avance de la matemática.

Problema	Enunciado	Estado
1	La hipótesis del continuo	Solución parcial
2	La compatibilidad de los axiomas de la aritmética	Resuelto
3	La igualdad de los volúmenes de dos tetraedros de la misma base y la misma altura	Resuelto
4	Construcción de todas las métricas cuyas rectas sean geodésicas	Demasiado genérico
5	El concepto de Lie de grupo continuo de transformaciones sin la hipótesis de la diferenciabilidad de las funciones que definen el grupo	Resuelto
6	Tratamiento matemático de los axiomas de la física	Solución parcial
7	Irracionalidad y trascendencia de ciertos números	Resuelto
8	Problemas de números primos	Sin resolver
9	Demostración de la ley de reciprocidad más general en cualquier campo de números	Parcialmente resuelto
10	Determinación de la resolubilidad de la ecuación diofántica	Resuelto
11	Formas cuadráticas con coeficientes numéricos algebraicos cualesquiera	Parcialmente resuelto
12	Extensión del teorema de Kronecker sobre campos abelianos a cualquier dominio de racionalidad algebraico	Sin resolver

13	Imposibilidad de la solución general de 7º grado por medio de funciones de sólo dos argumentos	Resuelto
14	Demostración de la finitud de ciertos sistemas completos de funciones	Resuelto
15	Fundamentación rigurosa del cálculo enumerativo de Schubert	Solución parcial
16	Problema de la topología de curvas y superficies algebraicas	Sin resolver
17	Expresión de formas definidas por cuadrados	Resuelto
18	Construcción del espacio a partir de poliedros congruentes	Resuelto
19	¿Son siempre necesariamente analíticas las soluciones de problemas regulares en el cálculo de variaciones?	Resuelto
20	El problema general de los valores de contorno	Resuelto
21	Demostración de la existencia de ecuaciones diferenciales lineales que tienen prescrito un grupo monodrómico	Resuelto
22	Uniformización de relaciones analíticas por medio de funciones automorfas	Resuelto
23	Desarrollo adicional de los métodos del cálculo de variaciones	Sin resolver

Tabla 1.1.: Lista de los 23 problemas del Programa

En la tabla podemos ver que muchos de los temas que trató no son un enunciado a un problema como tal, sino más bien a un campo de investigación, el cual en su discurso recogía varios problemas a resolver o simplemente unas directrices que seguir.

1.3. El escenario previo

No todos los problemas fueron motivo de estudio de Hilbert. Algunos, como los problemas que tienen que ver con la función zeta de Riemann o el teorema de uniformización, ya eran problemas resonantes de la época que no se podían ignorar como problemas relevantes para el próximo siglo. En éste sentido Hilbert quiso hacer un compendio, no sólo de problemas de su propio campo e inquietudes, sino también de las grandes obviedades de la época. Por éste motivo uno también puede intuir otros posibles problemas que hubieran podido ser motivo de estudio, y que sin embargo Hilbert ignoró.¹

Pero entre los problemas que ataviaban a la sociedad matemática de la época, uno de los temas más recurrentes era la crisis fundacional. Nos encontramos ante un marco histórico en

¹Un ejemplo resonante es el problema de dar una definición formal de integral de una función.

1. Una cortina hacia el futuro

el que resultados recientes hacen temblar los cimientos de la matemática², y por consiguiente todo campo natural sedimentado en ella. Es por ello por lo que Hilbert reclama parte del protagonismo en la escena y propone dos problemas de fundamentación axiomática: la axiomatización de la aritmética y de la física.³ Éste ve como necesario e imprescindible la resolución de dicho problema, en la que, a pesar de tener gran certeza en la veracidad de su consistencia, era necesario una demostración rigurosa y completa, que evitara la futura incertidumbre de posibles contradicciones no resolubles, y que quitaran de todo sentido a las matemáticas.⁴

Es por éste problema (que trataremos más adelante) junto con muchos otros, que fueron motivación para Hilbert para incluirlos en su programa, y no sólo ganar más resonancia con ellos sino también tratar de motivar en su solución para que el futuro de la matemática pisara con paso firme, como toda la sociedad matemática deseaba en aquella época.

²Cabe destacar como ejemplos resonantes a la teoría de conjuntos de Cantor y a la paradoja de Russel, entre otros.

³Hilbert tenía gran confianza y certeza en que la axiomatización de la aritmética y la demostración de completitud de la misma era cuestión de tiempo, y por tanto también propuso la axiomatización de la física, que era el campo en el que también estaba enfocado. Véase [Kre76]

⁴En este sentido se puede ver más profundamente en palabras de Morris Kline, en [KMoo]

2. Una mancha en la cortina

2.1. Los defectos del programa

Debido a la gran influencia de David Hilbert, el programa era algo que no se podía refutar ni sacar del plano principal de estudio para las próximas generaciones. Sin embargo, no por ello significa que el programa no tuviera objeciones. En efecto, muchos de los "problemas" propuestos no fueron más que un disparo al aire; una forma de que la matemática de la época mirara hacia donde Hilbert quería mirar.

Entre los problemas planteados se encuentran tanto problemas del propio estudio de Hilbert, como problemas relevantes de la época, e incluso incluyó intereses que él quería que se investigasen, pero que desgraciadamente no pertenecían a su campo de estudio. Ésto llevó a que quedaran problemas enunciados de forma demasiado vaga, lo que provocó un desinterés general en la sociedad y que, por ello, no fueran influyentes en el desarrollo posterior de la materia. Esto fue lo que ocurrió con el bloque de problemas del 13 al 18, siendo dentro de los 23 los menos coherentes, y sobre los que Hilbert tenía el tacto menos seguro.¹

2.2. La axiomatización

El problema de la axiomatización de la aritmética que comentábamos anteriormente (enunciado en el segundo problema), no tuvo la respuesta esperada que Hilbert quería.

Cierto es que en los años siguientes se dieron pequeños pasos en el avance de la consistencia de la aritmética (Newmann, y otra gente)

También puedo hablar aquí de los avances de Hilbert con el libro que se habla en la intro de Gödel.

2.3. La llegada de Gödel a escena

Sam enunció: "Lo que va a decir es falso"

Kurt replicó: "Lo que acaba de decir es verdadero"

(Samuel Beckett)

En verano de 1928, el joven y recién licenciado en matemáticas Kurt Gödel, se encuentra con un libro que le hace entrar en escena: *Elementos de la lógica teórica*, de Hilbert y Ackermann². Dicho libro no sólo se presenta un cálculo deductivo, sino que por primera vez se plantea la cuestión de si ése cálculo es completo o no, dejando dicho problema abierto. Debido a la inquietud que causó en la matemática de la época, y del impacto y la novedad que causó en el propio Gödel, fue motivo suficiente para tomar como tema para su tesis doctoral el tema de la completitud del cálculo lógico de primer orden.

¹Esto sin embargo no ocurrió con los últimos 5 problemas, en los que Hilbert tenía terreno más firme, e incluso había avanzado en algunos de ellos. Véase [BB98, Pág. 85]

²Publicado en 1928, siendo el primer libro de texto de lógica en el sentido actual. Véase [HAdZ62]

2. *Una mancha en la cortina*

Para Gödel, el campo de estudio, a pesar de ser de su interés, era completamente nuevo para él, el cual le planteaba como reto a largo plazo la resolución del segundo problema de Hilbert en el intento de formalización de la aritmética.

Como vimos, Hilbert ya había hecho pequeños avances en el tema, llegando a construir un cálculo deductivo de primer orden, el cual fue celebrado por toda la sociedad matemática como un gran avance en la solución del problema.

2.4. Bibliografía

[Zac07, FdCTF20, GR⁺00, Ste87, Gra03, Sie13]

Parte II.

Los teoremas de incompletitud de Gödel

Aqui metemos resumen de los teoremas

3. La completitud del cálculo lógico de primer orden

3.1. Definiciones y lemas previos

Definamos previamente el sistema axiomático sobre el que vamos a trabajar: ¹

- Signos básicos primitivos: ²
 - \neg
 - \vee
 - \forall
- Axiomas formales:
 1. $X \vee X \rightarrow X$
 2. $X \rightarrow X \vee Y$
 3. $Y \vee X \rightarrow X \vee Y$
 4. $(X \rightarrow Y) \rightarrow (Z \vee X \rightarrow Z \vee Y)$
 5. $\forall x Px \rightarrow Py$
 6. $\forall x (X \vee Px) \rightarrow X \vee \forall x Px$
- Reglas de inferencia: ³
 1. El esquema de inferencia: De α y $\alpha \rightarrow \beta$ se puede inferir β .
 2. La regla de sustitución para variables sentenciales y predicativas.
 3. De $\alpha(x)$ puede inferirse $\forall x \alpha(x)$.
 4. Unas variables individuales (libres o ligadas) pueden ser reemplazadas por cualesquiera otras, con tal de que ello no produzca ningún solapamiento de los alcances de las variables designadas mediante el mismo signo.

Para las deducciones que van a proceder, también es conveniente establecer algunas abreviaturas en calidad de notación:

1. Las notaciones $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \rho, \dots$ designan prefijos ⁴ cualesquiera, es decir, filas de signos finitas de la forma $\forall x \exists y, \forall x \forall y \exists z \forall u, \dots$
2. Las letras alemanas minúsculas x, y, u, v, \dots , designan *n-tuplos* de variables individuales, es decir, filas de signos del tipo $xyz, x_2x_1x_2x_3, \dots$, donde la misma variable puede aparecer varias veces en la misma sentencia.

¹ Coincide, exceptuando el principio de asociatividad (que es redundante), con lo expuesto en los apartados 1 y 10 de *Principia Mathematica* (Véase [AR10])

² A partir de ellos pueden definirse $\wedge, \rightarrow, \leftrightarrow$ y \exists del modo habitual.

³ No todas ellas están explícitamente formuladas en los resultados de Russel y Whitehead, pero todas ellas son usadas continuamente en sus deducciones.

⁴ Con prefijos se hace referencia a conjuntos de signos básicos primitivos.

3. La completitud del cálculo lógico de primer orden

Nota: Del modo correspondiente hay que entender sentencias como $\forall x \exists y$, etc. Si una misma variable aparece varias veces en x , hay que pensar, naturalmente, que sólo está escrita una vez en $\forall x \exists y$, ...

Consideremos a continuación una serie de lemas, para las que no presentamos demostración por no ser relevantes para el desarrollo del resto de resultados (además de ser demostraciones relativamente sencillas de realizar).

Lema 3.1. Para cada n -tuplo x los siguientes resultados son deducibles:

- a) $\forall x Fx \rightarrow \exists x Fx$
- b) $\forall x Fx \wedge \exists x Gx \rightarrow \exists x (Fx \wedge Gx)$
- c) $\forall x \neg Fx \leftrightarrow \exists x Fx$

Lema 3.2. Si x y x' sólo se diferencian por el orden en que están escritas las variables, entonces el siguiente enunciado es deducible:

$$\exists x Fx \rightarrow \exists x' Fx'$$

Lema 3.3. Si todas las variables x son distintas entre sí y x' tiene el mismo número de miembros que x , entonces el siguiente enunciado es deducible:

$$\forall x Fx \rightarrow \forall x' Fx'$$

Lema 3.4. Si π_i designa uno de los prefijos $\forall x_i, \exists x_i$; y ρ_i designa uno de los prefijos $\forall y_i, \exists y_i$, entonces el siguiente es deducible:⁵

$$\pi_1 \pi_2 \cdots \pi_n Fx_1 x_2 \cdots x_n \wedge \rho_1 \rho_2 \cdots \rho_m Gy_1 y_2 \cdots y_m \leftrightarrow \pi(Fx_1 x_2 \cdots x_n \wedge Gy_1 y_2 \cdots y_m)$$

para cada prefijo π que se componga de los π_i y ρ_i y que satisfaga la condición de que π_i esté delante de π_k para $i < k \leq n$ y de que ρ_i esté delante de ρ_k para $i < k \leq m$

Lema 3.5. Toda fórmula puede ponerse en forma normal prenexa, es decir, para cada fórmula α hay una fórmula prenexa γ , tal que $\alpha \leftrightarrow \gamma$ es deducible.

Lema 3.6. Si $\alpha \leftrightarrow \beta$ es deducible, entonces también lo es $\varphi(\alpha) \leftrightarrow \varphi(\beta)$, donde $\varphi(\alpha)$ designa una fórmula cualquiera que contenga α como parte.⁶

Lema 3.7. Cada fórmula conectiva válida es deducible, es decir, los axiomas 1-4 constituyen un sistema suficiente de axiomas para el cálculo conectivo.

Con estos resultados previos ya estamos en condiciones de afrontar el problema que nos concierne.

3.2. Exposición y demostraciones

El teorema de completitud semántica de la lógica de primer orden aparece en el artículo de Gödel de 1930 como Teorema I:

⁵Un resultado análogo vale para \forall en vez de para \wedge .

⁶Estos dos últimos resultados se pueden estudiar en detalle en la tercera sección de [HAdZ62].

Teorema 3.1. *Cada fórmula válida de la lógica de primer orden es deducible.*

El presente teorema, objeto principal de estudio de esta sección, sería trivialmente demostrable si pudiesemos probar el siguiente:

Teorema 3.2. *Cada fórmula de la lógica de primer orden es o refutable⁷ o satisfacible (sobre un universo infinito numerable).*

Y por ello surge el siguiente resultado:

Proposición 3.1. *Teorema 3.2 \Rightarrow Teorema 3.1*

Demostración. Sea α una fórmula válida. Siendo esto así, $\neg\alpha$ no es satisfacible, y aplicando **Teorema 3.2** tenemos que α es refutable. Por tanto, con ello se tiene que $\neg\neg\alpha$ (y como consecuencia, también α) es una fórmula deducible.⁸ \square

Definición 3.1. Una *K-fórmula* es una fórmula κ perteneciente a una clase del conjunto de fórmulas K cumpliendo las siguientes condiciones:

1. κ es una fórmula prenexa.
2. κ carece de variables individuales libres.
3. El prefijo de κ comienza con un cuantificador universal y termina con un cuantificador particular.

Entonces con la presente definición podemos deducir el siguiente resultado:

Teorema 3.3. *Si cada K-fórmula es refutable o satisfacible, también lo es cualquier fórmula.*

Demostración. Sea α una fórmula que no pertenece a K . Sea \mathfrak{x} el conjunto de sus variables libres. Como se puede ver directamente, si α es refutable (o satisfacible), se sigue la refutabilidad (o satisfacibilidad) de $\exists\mathfrak{x}\alpha$, e igualmente a la inversa.

Sea ahora $\pi\varphi$ la forma normal prenexa de $\exists\mathfrak{x}\alpha$, de tal modo que

$$\exists\mathfrak{x}\alpha \leftrightarrow \pi\varphi \quad (3.1)$$

es deducible. Además estipulemos que

$$\beta = \forall x\pi\exists y(\varphi \wedge Fx \vee \neg Fy)^9$$

Entonces

$$\pi\varphi \leftrightarrow \beta \quad (3.2)$$

es deducible (por el **Lema 3.4** y por la deducibilidad de $\forall x\pi\exists y(\varphi \wedge Fx \vee \neg Fy)$). β pertenece a K y, por tanto, es o satisfacible o refutable. Pero por (3.1) y (3.2) la satisfacibilidad de β implica la de $\exists\mathfrak{x}\alpha$ y consiguientemente también la de α , y lo mismo se puede aplicar para la refutabilidad. Por tanto, concluimos que también α es o satisfacible o refutable. \square

Teniendo en cuenta el **Teorema 3.3** anterior, basta para demostrar el **Teorema 3.2** con probar la siguiente:

⁷« φ es refutable» significa « $\neg\varphi$ es deducible».

⁸El recíproco del anterior resultado también es cierto y con una demostración igual de simple, aunque no la demostraremos por no ser relevante en la demostración del **Teorema 3.1**.

⁹Las variables x e y no deben aparecer en π .

3. La completitud del cálculo lógico de primer orden

Proposición 3.2. *Cada K -fórmula es satisfacible o refutable.*

Para ello definimos previamente el concepto de grado de una K -fórmula, y probaremos algunos resultados para poder probar la anterior proposición.

Definición 3.2. Llamaremos grado de una K -fórmula ¹⁰ al número de series de cuantificaciones universales de su prefijo, separadas unas de otras por cuantificadores existenciales.

Probamos primeramente el siguiente resultado.

Teorema 3.4. *Si cada K -fórmula de grado n es o refutable o satisfacible, entonces también lo es cada K -fórmula de grado $n + 1$.*

Demostración. Sea $\pi_1\alpha$ una K -fórmula de grado $n + 1$. Sea $\pi_1 = \forall x\exists y\pi_2$ y $\pi_2 = \forall u\exists v\pi_3$, donde π_2 tiene grado n y π_3 el grado $n - 1$. Sea además F una variable predicativa que no aparezca en α . Establezcamos:

$$\beta = \forall x'\exists y'F x'y' \wedge \forall x\forall y(Fxy \rightarrow \pi_2\alpha)$$

y

$$\gamma = \forall x'\forall y\forall y'\forall u\exists y'\exists v\pi_3(Fx'y' \wedge (Fxy \rightarrow \alpha))^{11}$$

Aplicando ahora dos veces el **Lema 3.4** junto con el **Lema 3.6**, obtenemos la deducibilidad de

$$\beta \leftrightarrow \gamma \quad (3.3)$$

Además, es claro que la fórmula

$$\beta \rightarrow \pi_1\alpha \quad (3.4)$$

es válida. Ahora bien, γ tiene grado n , y por tanto es por hipótesis o satisfacible o refutable. Si γ es satisfacible, entonces también lo es $\pi_1\alpha$ (por (3.3) y (3.4)). Si en caso contrario γ es refutable, entonces también lo es β (por (3.3)), es decir, entonces $\neg\beta$ es deducible. Sustituyendo ahora F por $\pi_2\alpha$ en $\neg\beta$, obtenemos que en este caso la siguiente sentencia es deducible:

$$\neg(\forall x'\exists y'\pi_2\alpha \wedge \forall x\forall y(\pi_2\alpha \rightarrow \pi_2\alpha))$$

Se puede observar que, naturalmente,

$$\forall x\forall y(\pi_2\alpha \rightarrow \pi_2\alpha)$$

es deducible, y por ello también lo es $\neg\forall x'\exists y'\pi_2\alpha$, es decir, en este caso $\pi_2\alpha$ es refutable. Por tanto, de hecho $\pi_2\alpha$ es o refutable o satisfacible. \square

Ahora, para acabar de probar la **Proposición 3.2**, sólo necesitamos probar el siguiente resultado:

Teorema 3.5. *Cada K -fórmula de primer grado es o satisfacible o refutable.*

La demostración de este teorema requiere algunas definiciones previas, así como algunos resultados derivados de las definiciones que vamos a establecer, por lo que se deja la presente demostración para más adelante.

¹⁰También, en el mismo sentido se le puede llamar "grado de un prefijo".

¹¹En esta sentencia suponemos que las sucesiones de variables x, x', y, y', u, v son disjuntas entre sí.

Sea $\forall \mathbf{x} \exists \mathbf{y} \alpha(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ —abreviado como $\pi\alpha$ — una fórmula cualquiera de primer grado. Mediante \mathbf{x} representamos un r -tuplo de variables, con \mathbf{y} un s -tuplo. Consideremos los r -tuplos sacados de la sucesión $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i \dots$ ordenados por la suma creciente de sus índices en una sucesión:

$$\mathbf{x}_1 = (x_0, x_0, \dots, x_0), \quad \mathbf{x}_2 = (x_1, x_0, \dots, x_0), \quad \mathbf{x}_3 = (x_0, x_1, x_0, \dots, x_0) \quad \dots$$

y definamos una sucesión $\{\alpha_n\}$ de fórmulas derivadas a partir de $\pi\alpha$ del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha(\mathbf{x}_1; x_1, x_2, \dots, x_s) \\ \alpha_2 &= \alpha(\mathbf{x}_2; x_{s+1}, x_{s+2}, \dots, x_{2s}) \wedge \alpha_1 \\ &\dots \\ \alpha_n &= \alpha(\mathbf{x}_n; x_{(n-1)s+1}, x_{(n-1)s+2}, \dots, x_{ns}) \wedge \alpha_{n-1} \end{aligned}$$

Designemos mediante η_n el s -tuplo $x_{(n-1)s+1}, x_{(n-1)s+2}, \dots, x_{ns}$ de tal modo que:

$$\alpha_n = \alpha(\mathbf{x}_n; \eta_n) \wedge \alpha_{n-1}$$

Además, definimos $\pi_n \alpha_n$ estableciendo como sigue:

$$\pi_n \alpha_n = \exists x_0 \exists x_1 \dots \exists x_{ns} \alpha_n$$

Como fácilmente se comprueba, en α_n aparecen precisamente las variables desde x_0 hasta x_{ns} , que están también ligadas por el prefijo π_n . Además, es evidente que las variables del r -tuplo \mathbf{x}_{n+1} ya aparecen en π_n (y por tanto son distintas de las que aparecen en η_{n+1}). Designemos mediante π'_n lo que queda de π_n cuando suprimimos las variables de r -tuplo \mathbf{x}_{n+1} . Si nos olvidamos del orden de aparición de las variables, tenemos que $\exists \mathbf{x}_{n+1} \pi'_n = \pi_n$.

Supuestas todas estas notaciones previas, tenemos como resultado directo el teorema siguiente:

Teorema 3.6. *Para cada n es deducible $\pi\alpha \rightarrow \pi_n \alpha_n$.*

Demostración. Probaremos el teorema mediante inducción.

- Para $n = 1$ tenemos que $\pi\alpha \rightarrow \pi_1 \alpha_1$ es deducible, ya que, por el **Lema 3.3** y la cuarta regla de inferencia, tenemos:

$$\forall \mathbf{x} \exists \mathbf{y} \alpha(\mathbf{x}; \mathbf{y}) \rightarrow \forall \mathbf{x}_1 \exists \mathbf{y}_1 \alpha(\mathbf{x}_1; \mathbf{y}_1)$$

y además, por el **Lema 3.1** tenemos:

$$\forall \mathbf{x}_1 \exists \mathbf{y}_1 \alpha(\mathbf{x}_1; \mathbf{y}_1) \rightarrow \exists \mathbf{x}_1 \exists \mathbf{y}_1 \alpha(\mathbf{x}_1; \mathbf{y}_1)$$

- Para un n arbitrario tenemos que $\pi\alpha \wedge \pi_n \alpha_n \rightarrow \pi_{n+1} \alpha_{n+1}$ es deducible ya que, al igual que antes, aplicando el **Lema 3.3** y la cuarta regla de inferencia, tenemos:

$$\forall \mathbf{x} \exists \mathbf{y} \alpha(\mathbf{x}; \mathbf{y}) \rightarrow \forall \mathbf{x}_{n+1} \exists \mathbf{y}_{n+1} \alpha(\mathbf{x}_{n+1}; \mathbf{y}_{n+1}) \quad (3.5)$$

y además, por el **Lema 3.2** tenemos:

$$\pi_n \alpha_n \rightarrow \exists \mathbf{x}_{n+1} \pi'_n \alpha_n \quad (3.6)$$

3. La completitud del cálculo lógico de primer orden

Ahora, aplicamos el **Lema 3.1** y sustituimos F por $\exists x_{n+1}\alpha(x_{n+1}; \eta_{n+1})$ y G por $\pi'\alpha_n$, con lo que obtenemos:

$$\forall x_{n+1}\exists \eta_{n+1}\alpha(x_{n+1}; \eta_{n+1}) \wedge \exists x_{n+1}\pi'_n\alpha_n \rightarrow \exists x_{n+1}(\exists \eta_{n+1}\alpha(x_{n+1}; \eta_{n+1}) \wedge \pi'_n\alpha_n) \quad (3.7)$$

Fijándonos ahora en que el antecedente del condicional (3.7) es la conyunción de los consiguientes de (3.5) y (3.6), obtenemos que es deducible:

$$\pi\alpha \wedge \pi_n\alpha_n \rightarrow \exists x_{n+1}(\exists \eta_{n+1}\alpha(x_{n+1}; \eta_{n+1}) \wedge \pi'_n\alpha_n) \quad (3.8)$$

Por otro lado, de (3.5) y de los lemas 2, 4 y 6 obtenemos la deducibilidad de:

$$\exists x_{n+1}(\exists \eta_{n+1}\alpha(x_{n+1}; \eta_{n+1}) \wedge \pi'_n\alpha_n) \leftrightarrow \pi_{n+1}\alpha_{n+1} \quad (3.9)$$

Y gracias a (3.8) y (3.9) obtenemos la inducción, y por tanto la prueba del teorema.

Con esto tenemos probado el **Teorema 3.6**, que como consecuencia queda probado el **Teorema 3.5**, que junto con resultados anteriores hemos conseguido probar la **Proposición 3.2**. Como vimos anteriormente, esta proposición era el resultado que nos faltaba para acabar la demostración del **Teorema 3.2**, con lo que hemos probado la tesis de este apartado. Es decir, hemos dado una demostración de que toda fórmula válida de primer orden es deducible. \square

3.3. Corolarios

4. Sobre sentencias formalmente indecidibles

El logro de Gödel en la lógica moderna es singular y monumental - más que monumental, es una señal que permanecerá visible lejos en el espacio y en el tiempo.¹

(John von Neumann)

4.1. Definiciones y conceptos previos

Tendremos como objetivo principal probar la existencia de sentencias indecidibles para un sistema formal P . Dicho sistema P es esencialmente el sistema que se obtiene cuando a los axiomas de Peano se les añade la lógica de *Principia Mathematica* (PM de aquí en adelante).²

Los signos primitivos del sistema P son los siguientes:

1. Constantes: « \sim » (no), « \vee » (o), « Π » (para todo), « 0 » (cero), « s » (el siguiente de), « $()$ » (paréntesis).
2. Variables tipo 1 (para individuos³, incluyendo el 0): « x_1 », « y_1 », « z_1 », ...
Variables tipo 2 (para clases de individuos): « x_2 », « y_2 », « z_2 », ...
Variables tipo 3 (para clases de clases de individuos): « x_3 », « y_3 », « z_3 », ...
...
etc., para cada número natural como tipo.⁴

Observación: No necesitamos disponer de variables para relaciones binarias o n -arias ($n > 2$) como signos primitivos, ya que podemos definir las relaciones como clase de pares ordenados y los pares ordenados a su vez como clases de clases. Por ejemplo, podemos considerar el par ordenado $\langle a, b \rangle$ como $\{\{a\}, \{a, b\}\}$, donde $\{x, y\}$ denota la clase cuyos únicos elementos son x e y , y $\{x\}$ la clase cuyo único elemento es x .⁵

Llamaremos *signo de primer tipo* a una combinación de signos que tenga una de las siguientes formas:

$a, sa, ssa, sssa, \dots, \text{etc.},$

Donde a es 0 ó es variable de tipo 1. En el primer caso llamamos a tal signo un numeral. Para $n > 1$ entendemos por *signo de tipo n* lo mismo que por *variable de tipo n* . Llamaremos *fórmulas elementales* a las combinaciones de signos de la forma $a(b)$, donde b es un signo de tipo n , y a es un signo de tipo $n + 1$. Definimos la clase de las *fórmulas* como la mínima clase que abarca todas las fórmulas elementales y que, siempre que contenga α y β , contiene también

²El hecho de de los axiomas de Peano, así como todas las otras modificaciones del sistema PM introducidas en toda la demostración, sólo tienen como finalidad simplificar la prueba, y por ellos son prescindibles.

³Cuando tratamos de individuos hacemos referencia al conjunto de los números naturales.

⁴Suponemos que disponemos de una cantidad infinita numerable de signos para cada tipo de variables.

⁵Las relaciones no homogéneas también pueden definirse de esta manera; por ejemplo, una relación entre individuos y clases puede definirse como una clase de elementos de la forma $\{\{x_2\}, \{\{x_1\}, x_2\}\}$. Todos los teoremas deducibles en PM son también deducibles cuando se los reformula de esta manera.

4. Sobre sentencias formalmente indecidibles

$\sim (\alpha)$, $(\alpha) \vee (\beta)$ y $\Pi x(\alpha)$ (donde x es una variable cualquiera) ⁶. Llamamos a $(\alpha) \vee (\beta)$ la *disyunción* de α y β , a $\sim (\alpha)$ la *negación* de α y a $\Pi x(\alpha)$ una *generalización* de α . Una *sentencia* es una fórmula sin variables libres (donde la noción de variable libre se define del modo usual). A una fórmula con exactamente n variables libres (y ninguna otra variable libre) la llamaremos *signo relacional n -ario*; para $n = 1$ lo llamaremos también *signo de clase*.

Por $\neg_v^b \alpha$ (donde α designa una fórmula, v una variable y b un signo del mismo tipo que v) entendemos la fórmula que resulta de reemplazar en α cada aparición libre de v por b ⁷. Decimos que una fórmula α es una *elevación de tipo* de otra fórmula β si α se obtiene a partir de β mediante una elevación por el mismo número de cada variable que aparece en β .

Las siguientes fórmulas (de I a V) se llaman *axiomas* (están escritas con ayuda de abreviaturas: $\wedge, \supset, \equiv, \Sigma, =$ ⁸, definidas del modo usual y conforme a las convecciones habituales sobre la omisión de paréntesis) ⁹:

- I. 1. $\sim (sx_1 = 0)$
 2. $sx_1 = sy_1 \supset x_1 = y_1$
 3. $x_2(0) \wedge \Pi x_1 (x_2(x_1) \wedge x_2(sx_1)) \supset \Pi x_1 (x_2(x_1))$
- II. Cada fórmula que resulta de sustituir X, Y por cualesquiera fórmulas en los siguientes esquemas:

1. $X \vee X \supset X$
2. $X \supset X \vee Y$
3. $X \vee Y \supset Y \vee X$
4. $(X \supset Y) \supset (Z \vee X \supset Z \vee Y)$

III. Cada fórmula que resulta de uno de estos dos esquemas:

1. $\Pi v \alpha \supset \neg_v^c \alpha$
2. $\Pi v (\beta \vee \alpha) \supset \beta \vee \Pi v (\alpha)$

Cuando sustituimos α, v, β, c del siguiente modo (y realizamos la operación indicada por « \neg » en 1.):

Sustituimos por α por una fórmula cualquiera, v por una variable cualquiera, β por una fórmula en la que no aparezca libre v y c por un signo del mismo tipo que v , siempre que c no contenga alguna variable que pase a estar ligada en un lugar de α donde v estaba libre. ¹⁰

⁶Por tanto, $\Pi x(\alpha)$ es también una fórmula cuando x no aparece o no está libre en α . Naturalmente, en este caso $\Pi x(\alpha)$ significaría lo mismo que α .

⁷Si v no aparece libre en α , entonces $\neg_v^b \alpha = \alpha$. Nótese que \neg es un signo matemático.

⁸Como en *PM*, consideramos que $x_1 = y_1$ está definido por $\Pi x_2 (x_2(x_1) \supset x_2(y_1))$; de igual modo para los tipos superiores.

⁹Para obtener los axiomas a partir de los esquemas indicados debemos (después de realizar las sustituciones permitidas en II, III y IV), además,

- (1) eliminar las abreviaturas
- (2) añadir los paréntesis omitidos.

Nótese que las expresiones así obtenidas deben ser "fórmulas" en el sentido arriba definido.

¹⁰Por tanto, c es o una variable o el 0 o un signo de la forma $s \dots su$, donde u es 0 o una variable de tipo 1. Respecto de la noción de estar (una variable) libre o ligada en un lugar de α , véase [vN27].

IV. Cada fórmula que resulta del esquema

$$\Sigma u \Pi v (u(v) \equiv \alpha)$$

cuando sustituimos v por una variable cualquiera de tipo n , sustituimos u por una variable cualquiera de tipo $n + 1$ y sustituimos α por una fórmula, en la que u no esté libre. Este axioma desempeña el papel de axioma de reducibilidad (el axioma de comprensión de la teoría de conjuntos).

V. Cada fórmula que resulta de

$$\Pi x_1 (x_2(x_1) \equiv y_2(x_1)) \supset x_2 = y_2$$

por elevación de tipo (así como esta fórmula misma). Este axioma dice que una clase está completamente determinada por sus elementos.

Una fórmula γ se llama una *inferencia inmediata* de α y β , si α es la fórmula $\sim \beta \vee \gamma$ (y γ se llama una *inferencia inmediata* de α , si γ es la fórmula $\Pi v \alpha$, donde v designa una variable cualquiera). La clase de las *fórmulas deducibles* se define como la mínima clase de fórmulas que contiene los axiomas y está clausurada respecto a la relación de «inferencia inmediata»¹¹.

Ahora asignamos unívocamente números naturales a los signos primitivos del sistema P del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \langle 0 \rangle & \dots 1 \\ \langle s \rangle & \dots 3 \\ \langle \sim \rangle & \dots 5 \\ \langle \vee \rangle & \dots 7 \\ \langle \Pi \rangle & \dots 9 \\ \langle (\rangle & \dots 11 \\ \langle \rangle \rangle & \dots 13 \end{aligned}$$

A las variables de tipo n asignamos los números de la forma ρ^n (donde ρ es un número primo > 13). Mediante esta asignación a cada fila finita de signos primitivos (y en especial a cada fórmula) corresponde biunívocamente una secuencia finita de números naturales. Ahora asignamos (de nuevo biunívocamente) números naturales a las secuencias finitas de números naturales, haciendo corresponder a la secuencia n_1, n_2, \dots, n_k el número $2^{n_1} \cdot 3^{n_2} \cdot \dots \cdot \rho_k^{n_k}$ donde ρ_k denota el k -avo número primo (en orden de magnitud creciente). Así asignamos biunívocamente un número natural no sólo a cada signo primitivo, sino también a cada secuencia finita de signos primitivos. Mediante $nu(a)$ denotamos el número natural asignado al signo primitivo (o a la secuencia de signos primitivos) a . Supongamos que esté dada cierta clase o relación n -aria R entre signos primitivos. Le asignamos la clase o relación n -aria R' entre números naturales, en la que están los números x_1, x_2, \dots, x_n si y sólo si hay signos primitivos o secuencias de signos primitivos a_1, a_2, \dots, a_n , tales que $x_i = nu(a_i)$ (para $i = 1, 2, \dots, n$) y a_1, a_2, \dots, a_n están en la relación R . Las clases y relaciones de números naturales, que corresponden de este modo a los conceptos metamatemáticos hasta ahora definidos, como por ejemplo «variable», «fórmula», «sentencia», «axioma», «fórmula deducible», etc., serán designadas por las mismas palabras escritas con letras mayúsculas pequeñas. Por ejemplo,

¹¹La regla de sustitución resulta aquí supreflua, pues en los axiomas mismo ya tenemos realizadas todas las sustituciones posibles (véase [vN27])

4. Sobre sentencias formalmente indecidibles

el enunciado de que en el sistema P hay problemas indecidibles se convierte en la siguiente afirmación: Hay SENTENCIAS a , tales que ni a ni la NEGACIÓN de a son FÓRMULAS DEDUCIBLES.

Ahora vamos a insertar aquí una digresión que por el momento no tiene nada que ver con el sistema formal P . Empecemos por dar la siguiente definición: Decimos que una función numérica¹² $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ está *recursivamente definida a partir* de las funciones numéricas $h(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ y $g(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$, si para cada x_2, \dots, x_n , k vale lo siguiente:¹³

$$\begin{aligned} f(0, x_2, \dots, x_n) &= h(x_2, \dots, x_n) \\ f(k+1, x_2, \dots, x_n) &= g(k, f(k, x_2, \dots, x_n), x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Una función numérica f se llama *recursiva primitiva* si hay una secuencia finita de funciones f_1, f_2, \dots, f_n , que acaba con f y que tiene la propiedad de que cada función f_k de la secuencia está recursivamente definida a partir de dos de las funciones precedentes o resulta de alguna de las funciones precedentes por sustitución¹⁴, o, finalmente, es una constante o la función del siguiente, $x+1$. La longitud de la mínima secuencia de f_i corresponde a una función recursiva primitiva f se llama su *grado*. Una relación n -ara R entre números naturales se llama *recursiva primitiva*¹⁵ si hay una función n -aria recursiva primitiva f tal que para cada n números naturales x_1, x_2, \dots, x_n

$$Rx_1, x_2, \dots, x_n \leftrightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0^{16}$$

Los siguientes teoremas valen:

Teorema 4.1. *Cada función (o relación) obtenida a partir de funciones (o relaciones) recursivas primitivas por sustitución de las variables por funciones recursivas primitivas es recursiva primitiva; igualmente lo es cada función obtenida a partir de funciones recursivas primitivas por definición recursiva según el esquema de (4.1).*

Teorema 4.2. *Si R y S son relaciones recursivas primitivas, también lo son $\neg R$ y $R \vee S$ (por tanto, también $R \wedge S$).*

Teorema 4.3. *Si las funciones $f(\mathfrak{x})$, $h(\mathfrak{y})$ son recursivas primitivas, entonces también lo es la relación $f(\mathfrak{x}) = h(\mathfrak{y})$ ¹⁷.*

Teorema 4.4. *Si la función $f(\mathfrak{x})$ y la relación Rx, \mathfrak{y} son recursivas primitivas, también lo son las*

¹²Es decir, su dominio definicional es la clase de los números naturales (o de los n -tuplos de números naturales) y sus valores son números naturales.

¹³En lo sucesivo las letras latinas minúsculas (a veces con subíndices) son siempre variables para números naturales (a no ser que se indique explícitamente lo contrario).

¹⁴Más precisamente: por introducción de algunas de las funciones precedentes en los lugares argumentales de una de las funciones precedentes, por ejemplo, $f_k(x_1, x_2) = f_p(f_q(x_1, x_2), f_r(x_2))$, con $p, q, r < k$. No es necesario que todas las variables del lado izquierdo aparezcan también en el derecho.

¹⁵Incluimos las clases entre las relaciones (como relaciones monarias). Las relaciones recursivas primitivas tienen desde luego la propiedad de que para cada n -tuplo dado de números naturales x_1, x_2, \dots, x_n se puede decidir si Rx_1, x_2, \dots, x_n o no.

¹⁶Para todas las consideraciones intuitivas (y especialmente para las metamatemáticas) usamos el simbolismo de Hilbert definido en [HAdZ62].

¹⁷Usamos las letras alemanas $\mathfrak{x}, \mathfrak{y}$ como abreviaturas para cualesquiera n -tuplos de variables, como por ejemplo x_1, x_2, \dots, x_n .

relaciones S y T definidas por

$$S(\mathfrak{x}, \mathfrak{y}) \leftrightarrow \exists x (x \leq f(\mathfrak{x}) \wedge Rx, \mathfrak{y})$$

$$T(\mathfrak{x}, \mathfrak{y}) \leftrightarrow \forall x (x \leq h(\mathfrak{x}) \wedge Rx, \mathfrak{y})$$

así como la función

$$q(\mathfrak{x}, \mathfrak{y}) = \mu x (x \leq f(\mathfrak{x}) \wedge Rx, \mathfrak{y}),$$

donde $\mu x \varphi(x)$ significa el mínimo número x , para el que vale $\varphi(x)$, si hay algún tal, y 0, si no lo hay.

A. Primer apéndice

Los apéndices son opcionales.

Archivo: `apendices/apendice01.tex`

Glosario

La inclusión de un glosario es opcional.

Archivo: `glosario.tex`

\mathbb{R} Conjunto de números reales.

\mathbb{C} Conjunto de números complejos.

\mathbb{Z} Conjunto de números enteros.

Bibliografía

Las referencias se listan por orden alfabético. Aquellas referencias con más de un autor están ordenadas de acuerdo con el primer autor.

- [AR10] Whitehead AN and B Russell. Principia mathematica. *Cambridge University*, 1, 1910. [Citado en pág. 11]
- [BB98] Haiim Brezis and Felix Browder. Partial differential equations in the 20th century. *Advances in Mathematics*, 135:76–144, 1998. [Citado en pág. 7]
- [FdCTF20] Max Fernández de Castro and Yolanda Torres Falcón. La constitución del programa de hilbert. *Metatheoria - Revista de Filosofía e Historia de la Ciencia*, 10(2):31–50, abr. 2020. [Citado en pág. 8]
- [GR⁺00] Jeremy Gray, David Rowe, et al. *The Hilbert Challenge*. Oxford University Press on Demand, 2000. [Citado en pág. 8]
- [Grao3] Jeremy J Gray. *El reto de Hilbert: Los 23 problemas que desafiaron a la matemática*. Crítica, 2003. [Citado en pág. 8]
- [HAdZ62] David Hilbert, Wilhelm Ackermann, and Víctor Sánchez de Zavala. *Elementos de lógica teórica*. Tecnos, 1962. [Citado en págs. 7, 12, and 20]
- [KM00] M. Kline and A.R. Merino. *Matemáticas: La pérdida de la Certidumbre*. Ciencia y técnica. Siglo XXI Ediciones, 2000. [Citado en pág. 6]
- [Kre76] Georg Kreisel. What have we learnt from hilbert’s second problem. *Browder [8: 1, pp. 93–130]*, 67:8–12, 1976. [Citado en pág. 6]
- [Sie13] Wilfried Sieg. *Hilbert’s programs and beyond / Wilfried Sieg*. Logic and computation in philosophy. Oxford University Press, Oxford, [England] ;, 2013 - 2013. [Citado en pág. 8]
- [Ste87] Ian Stewart. *The problems of mathematics*. Oxford University Press Oxford, 1987. [Citado en pág. 8]
- [vN27] J v. Neumann. Zur hilbertschen beweistheorie. *Mathematische Zeitschrift*, 26(1):1–46, 1927. [Citado en págs. 18 and 19]
- [Zac07] Richard Zach. Hilbert’s program then and now. In *Philosophy of Logic*, pages 411–447. Elsevier, 2007. [Citado en pág. 8]