

Introducción a los Algoritmos - 2do. cuatrimestre 2012

Guía 5: Semántica y Cálculo de Lógica de Predicados

Docentes: Walter Alini, Luciana Benotti, Marcos Gómez y Gisela Rossi

La lógica de predicados o lógica de primer orden es el sistema lógico estándar que formaliza el sistema deductivo natural. El objetivo general de esta guía es aprender a utilizar fórmulas con cuantificadores universales (\forall) y existenciales (\exists), tanto para interpretar su significado, como para utilizarlas para realizar demostraciones formales en este sistema lógico.

Interpretación y construcción de modelos en Lógica de Predicados

La Lógica de Predicados cuenta con todos los operadores de la Lógica Proposicional ($\equiv, \neg, \wedge, \vee$, etcétera) e incorpora dos nuevos **operadores de cuantificación**. Por ejemplo, sea el predicado $T.x$, definido como

$$T.x \doteq x \text{ es múltiplo de } 3$$

el **cuantificador universal** \forall permite expresar que todo x es múltiplo de 3. Esto se denota por $\langle \forall x : : T.x \rangle$. El cuantificador universal indica que la propiedad es satisfecha por todos los valores de la variable. El **cuantificador existencial** \exists , expresa que la propiedad es satisfecha por al menos un valor de x . Por ejemplo $\langle \exists x : : T.x \rangle$ indica que existe un x que es múltiplo de 3. El conjunto de valores sobre el que la propiedad expresada se evalúa se especifica en el **rango** de la fórmula. Mientras que la propiedad se especifica en el **término**. El rango y el término se escriben en las siguientes ubicaciones:

$$\langle \forall x : \text{rango}.x : \text{termino}.x \rangle \quad \langle \exists x : \text{rango}.x : \text{termino}.x \rangle$$

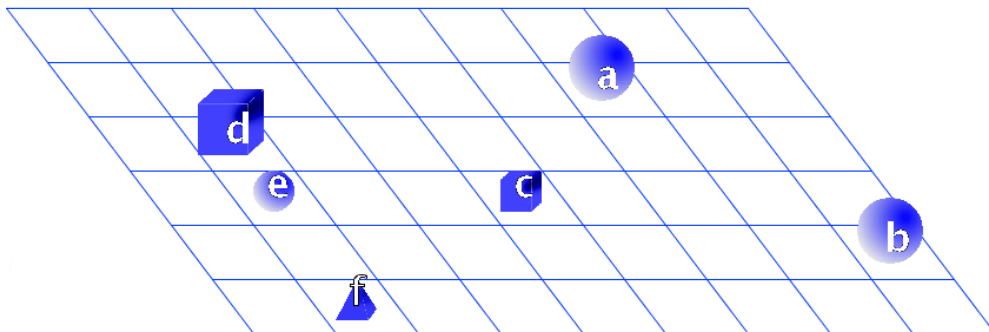
Por ejemplo, el enunciado “Todos los naturales son enteros” se formaliza como:

$$\langle \forall x : \text{naturales}.x : \text{enteros}.x \rangle$$

el enunciado sólo se evalúa sobre el conjunto de naturales (y no de los reales, por ejemplo).

El objetivo de los siguientes ejercicios es clarificar el significado de los nuevos operadores de cuantificación, para lograr la capacidad de leer y escribir fórmulas que los involucran.

1. Dado el siguiente mundo



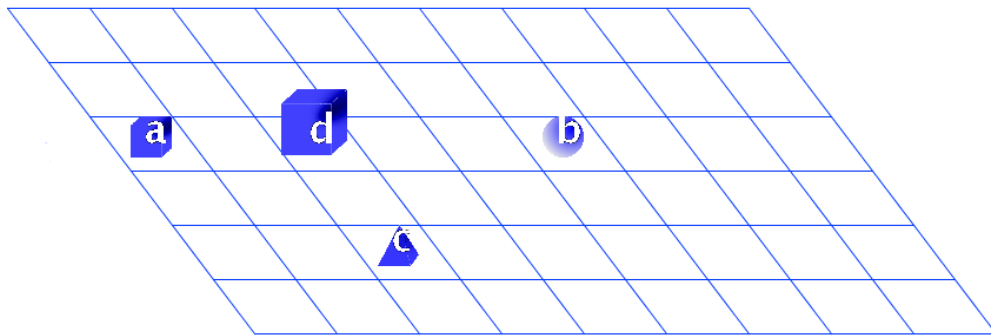
decidí si las siguientes sentencias son satisfechas o no (y por qué). Por ejemplo, la sentencia “Hay un cubo grande” se satisface por el objeto d. Sin embargo, la frase “Todas las esferas son grandes”, no se satisface a causa de la esfera pequeña e.

- a) f está entre d y e.
- b) Todas las pirámides son pequeñas.

- c) Existe (al menos) un cubo pequeño.
- d) a está a la derecha de todo.
- e) Nada está a la derecha de b.

Eliminó la pirámide f, el inciso (b) se sigue satisfaciendo? Por qué?

2. Construí un mundo en el que se satisfagan progresivamente cada una de las siguientes sentencias, utilizando cubos, esferas y pirámides, pequeños o grandes.
 - a) Algo es grande.
 - b) Hay un cubo.
 - c) Hay un cubo grande.
 - d) Un cubo grande está a la izquierda de b.
 - e) Algo que está a la izquierda de b está detrás de c.
 - f) Alguna esfera no es grande.
3. Utilizando *ithaca* abrí el archivo *mundo2.itk*, que se muestra a continuación:



Notó que todos los enunciados del ejercicio anterior se satisfacen en este mundo. Luego,

- a) Introducí tus formalizaciones de los enunciados y verifiqué que se satisfagan. Si no es así, te equivocaste en algo ¿podés encontrar donde está el error de la traducción?
 - b) Mové el cubo grande a la esquina trasera derecha del tablero. Observé que el enunciado *d* no se satisface mientras que los restantes siguen valiendo. Verifiqué que lo mismo ocurra con tus formalizaciones.
 - c) A partir del mundo original, mové *c* hacia atrás por su propia columna hasta la fila final y hice grande a *b*. Ahora los enunciados *e* y *f* no se satisfacen. Verifiqué que lo mismo ocurra con tus formalizaciones.
4. Construí un único modelo como los de *ithaca*, en el que se satisfagan, simultáneamente, las siguientes propiedades
 - a) $\langle \forall x : esfera.x : rojo.x \equiv grande.x \rangle$
 - b) $\langle \exists x :: \langle \exists y : \neg(x = y) : grande.x \equiv (\neg rojo.y) \rangle \rangle$
 - c) $\langle \forall x : \neg esfera.x : \langle \exists y :: esfera.y \wedge rojo.y \rangle \rangle$
 - d) $\langle \forall x : grande.x : \langle \forall y :: (\neg rojo.y) \equiv pirámide.y \rangle \rangle$

Para evitar confusiones, dar un dibujo del modelo, nombrando todos los elementos, y luego indicar, para cada elemento qué propiedades (forma, color, tamaño) tiene. Ejemplo “*e*₁ es esfera, roja, grande”.

5. Construí un único modelo como los de *ithaca*, en el que se satisfagan, simultáneamente, las siguientes propiedades:

- a) $\langle \forall x : \neg \text{rojo}.x \vee \text{pirámide}.x : \langle \exists y : (x = y) : \text{grande}.y \rangle \rangle$
- b) $\langle \exists x : \text{rojo}.x : \langle \exists y :: \text{rojo}.x \equiv \neg \text{rojo}.y \rangle \rangle$
- c) $\langle \forall x : \text{cubo}.x : \langle \exists y : \neg(x = y) : \text{pirámide}.y \rangle \rangle$
- d) $\langle \forall x : \text{rojo}.x : \text{cubo}.x \wedge \langle \exists y :: \text{grande}.x \rangle \rangle$

Para evitar confusiones, dibujá el modelo nombrando cada figura, y luego indicá las propiedades (forma, color, tamaño) que cada una tiene. Por ejemplo “ e_1 es pirámide, roja, grande”.

Interpretación y formalización de enunciados en lógica de predicados

6. Expresá el significado de cada una de las siguientes fórmulas en lenguaje natural. Por ejemplo, en la fórmula

$$\langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i = 0 \rangle$$

debemos suponer que la variable xs es de tipo lista, para que el tipado sea correcto. Las siguientes sentencias son todas traducciones de esta fórmula al lenguaje natural:

“Todos los elementos de la lista xs son ceros”
 “La lista xs está compuesta únicamente por ceros”
 “La lista xs no tiene otro valor que cero”...

- a) $\langle \forall x : x \in \text{Num} : \langle \exists y : y \in \text{Int} : x < y \rangle \rangle$
- b) $\langle \exists x : x \in \text{Num} : \langle \forall y : y \in \text{Int} : x < y \rangle \rangle$ ¿Es lo mismo que el anterior?
- c) $\langle \forall x, z : x, z \in \text{Num} \wedge x < z : \langle \exists y : y \in \text{Num} : x < y < z \rangle \rangle$.
- d) $\langle \forall p, q : 0 \leq p \wedge 0 \leq q \wedge p + q = \#xs - 1 : xs.p = xs.q \rangle$.
- e) $N \leq \#xs \wedge \langle \exists i : 0 \leq i < N : xs.i = 0 \rangle$
- f) $\langle \exists N : N \leq \#xs : \langle \forall i : 0 \leq i < N : xs.i \geq 0 \rangle \rangle$
- g) $\#xs = \#ys \Rightarrow \langle \exists i : 0 \leq i < \#xs \text{ mín } \#ys : xs.i \neq ys.i \rangle$.

7. Formalizá las siguientes sentencias escritas en lenguaje natural, utilizando cuantificadores y predicados arbitrarios para aquellas propiedades elementales. Por ejemplo, para la sentencia “Hay enteros pares” puede formalizarse con la fórmula:

$$\langle \exists x : \text{entero}.x : x \bmod 2 = 0 \rangle$$

- a) Todo entero es par o impar.
- b) El producto de dos impares es impar.
- c) Dados dos números enteros positivos, existe un tercer entero tal que el primer entero multiplicado por el tercer entero es mayor que el segundo entero.
- d) x está en la lista xs .
- e) La lista xs consiste sólo de 0's y 1's.
- f) Si el 1 está en xs , entonces también el 0 está.
- g) Todos los elementos de xs son iguales.
- h) Todos los elementos de la lista son distintos.
- i) La lista xs es capicúa.
- j) La lista xs está ordenada de manera decreciente.
- k) Las listas xs e ys tienen los mismos elementos.
- l) Todos los elementos de xs tienen al menos un elemento. ¿Cuál debe ser el tipo de xs ? los otros.

Demostraciones de lógica de predicados

En los siguientes ejercicios se deben hacer demostraciones en el Cálculo de Predicados, utilizando los axiomas y teoremas sobre cuantificadores, además de los axiomas y teoremas del Cálculo Proposicional que venimos utilizando.

8. Evaluar las siguientes expresiones usando los axiomas de cuantificadores:

- a) $\langle \forall i : 0 \leq i < 3 : [0, 2, 4, 1].i \text{ mód } 2 = 0 \rangle$.
- b) $\langle \forall i : 0 \leq i < 4 : [0, 2, 4, 1].i \text{ mód } 2 = 0 \rangle$.

9. Justificar las respuestas de estos ejercicios usando los axiomas.

- a) Evaluar $\langle \forall i : 0 \leq i < 3 : \langle \forall j : 0 \leq j < 3 : [0, 2, 1].i = [0, 2, 1].j \rangle \rangle$.
- b) Decidir si la fórmula $\langle \forall i : 0 \leq i < 3 : \langle \forall j : 0 \leq j < 3 : xs.i = xs.j \rangle \rangle$ es satisfactible.
- c) Encontrar valores de x e y que satisfagan la siguiente fórmula:

$$\langle \forall i : 0 \leq i < 4 : [0, x, 2, y, 6].i < [0, x, 2, y, 6].(i + 1) \rangle$$

10. Demostrá justificando cada paso los siguientes teoremas sobre el cuantificador existencial:

- a) *Distributividad de \vee con \exists* : $\langle \exists x : T.x \rangle \vee \langle \exists x : U.x \rangle \equiv \langle \exists x : T.x \vee U.x \rangle$.
- b) *Rango unitario*: $\langle \exists x : x = Y : T.x \rangle \equiv T.Y$, siempre que Y no ocurra cuantificada en T .
- c) *Partición de rango para \exists* : $\langle \exists x : R.x \vee S.x : T.x \rangle \equiv \langle \exists x : R.x : T.x \rangle \vee \langle \exists x : S.x : T.x \rangle$.
- d) *Rango vacío*: $\langle \exists x : False : T.x \rangle \equiv False$.

11. Evaluar las siguientes expresiones usando los axiomas de cuantificadores y comparar con el ejercicio 8:

- a) $\langle \exists i : 0 \leq i < 3 : [0, 2, 4, 1].i \text{ mód } 2 = 1 \rangle$.
- b) $\langle \exists i : 0 \leq i < 4 : [0, 2, 4, 1].i \text{ mód } 2 = 1 \rangle$.

12. Sea $elem : A \rightarrow [A] \rightarrow Bool$ definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} elem.y.[] &\doteq False \\ elem.y.(x \triangleright xs) &\doteq y = x \vee elem.y.xs \end{aligned}$$

Describí con tus palabras qué hace esta función y evaluá las siguientes fórmulas, usando la definición de $elem$ y las propiedades de los cuantificadores.

- a) $\langle \forall x : elem.x.[0, 1, 3] : x \leq 3 \rangle$.
- b) $\langle \exists x : elem.x.[0, 1, 3] : x \geq 3 \rangle$.

13. Demostrá justificando cada paso los siguientes teoremas sobre el cuantificador existencial:

- a) *Intercambio entre rango y término*: $\langle \exists x : R.x : T.x \rangle \equiv \langle \exists x : R.x \wedge T.x \rangle$.
- b) *Intercambio de cuantificadores*: $\langle \exists x : \langle \exists y : T.x.y \rangle \rangle \equiv \langle \exists y : \langle \exists x : T.x.y \rangle \rangle$.
- c) *Testigo*: $T.Y \Rightarrow \langle \exists x : T.x \rangle$, siempre que Y no ocurra cuantificada en T .
- d) Enunciá y demostrá la propiedad de *Cambio de Variable* para el cuantificador existencial.

14. Demostrá que las siguientes fórmulas son válidas, justificando en cada paso el axioma o teorema del Cálculo de Predicados utilizado.

- a) $\langle \forall x : esfera.x : grande.x \rangle \equiv \langle \forall x : \neg grande.x : \neg esfera.x \rangle$
- b) $\langle \exists x : cubo.x : pequeño.x \rangle \Rightarrow \langle \exists x : cubo.x \rangle$
- c) $\neg \langle \exists x : pirámide.x \rangle \Rightarrow \langle \forall x : pirámide.x : roja.x \rangle$

$$d) \langle \exists x :: \text{cubo}.x \rangle \wedge \langle \forall y :: \text{grande}.y \rangle \Rightarrow \langle \exists x :: \text{cubo}.x \wedge \text{grande}.x \rangle$$

En todos los items anteriores, ¿es posible cambiar los predicados *esfera*, *grande*, *cubo*, etc. por predicados arbitrarios *R*, *T*, *S*, etc. manteniendo la validez de las fórmulas? Dicho de otro modo ¿la validez de las formulas anteriores depende de los predicados específicos *esfera*, *grande*, *cubo*, etc?

15. a) Expresá en tus propias palabras lo que significan las expresiones a cada lado de \equiv :

$$\langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i < 0 \rangle \equiv (xs.0 < 0) \wedge \langle \forall i : 1 \leq i < \#xs : xs.i < 0 \rangle.$$

- b) Probá que esta equivalencia es un teorema.

16. Probar:

$$\langle \forall i : 1 \leq i < \#(x \triangleright xs) : (x \triangleright xs).i < 10 \rangle \equiv \langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i < 10 \rangle.$$

Ayuda: Usar el Teorema de *Reenumeración* o *Cambio de Variable*.

17. Usando la siguiente definición de *todosMenores10*: $[Num] \rightarrow Bool$

$$\begin{aligned} \text{todosMenores10}[] &\doteq True \\ \text{todosMenores10}(x \triangleright xs) &\doteq x < 10 \wedge \text{todosMenores10}.xs, \end{aligned}$$

probá por inducción que

$$\text{todosMenores10}.xs \equiv \langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : xs.i < 10 \rangle.$$

Ayuda: Aquí te serán útiles tus soluciones de los ejercicios 15 y 16.

18. Probar por inducción en *xs*:

$$\langle \forall x : \text{elem}.x.xs : T.x \rangle \equiv \langle \forall i : 0 \leq i < \#xs : T.(xs.i) \rangle.$$

19. Decidí si cada una de las siguientes fórmulas es válida o no. En caso que una fórmula no sea válida, decidí si es satisfactible o no. En todos los casos justificá con una demostración, ejemplo o contraejemplo.

Ayuda: Podés usar *ithaca* para definir mundos que sirvan como ejemplo de satisfacción de una fórmula, o (contra)ejemplo de invalidez de una fórmula.

$$a) \langle \forall x : \text{cubo}.x : \text{pequeño}.x \rangle \Rightarrow (\langle \forall x :: \text{cubo}.x \rangle \Rightarrow \langle \forall x :: \text{pequeño}.x \rangle)$$

$$b) \langle \forall x : \text{cubo}.x : \text{pequeño}.x \rangle \Leftarrow (\langle \forall x :: \text{cubo}.x \rangle \Rightarrow \langle \forall x :: \text{pequeño}.x \rangle)$$

$$c) \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{grande}.x \rangle \wedge \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{azul}.x \rangle \Rightarrow \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{grande}.x \wedge \text{azul}.x \rangle$$

$$d) \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{grande}.x \rangle \wedge \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{azul}.x \rangle \Leftarrow \langle \exists x : \text{pirámide}.x : \text{grande}.x \wedge \text{azul}.x \rangle$$